

DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2026-85-81>

УДК 620.92

ЕРА СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ: СВІТОВІ ОБСЯГИ ТА СТРУКТУРА

THE ERA OF SOLAR POWER: GLOBAL CAPACITY AND STRUCTURE

Ткаченко Володимир Валентинович
кандидат економічних наук, доцент,
Державний податковий університет
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4915-2518>

Тkachenko Volodymyr
State Tax University

Стаття присвячена дослідженню актуальних аспектів світового розвитку сонячної генерації. У роботі проаналізовано та систематизовано ключові фактори, що визначають масштаби та структуру: фізичні засади сонячної іррадіації, фундаментальні обмеження ефективності кремнієвих елементів, динаміку зниження вартості генерації та регіональний розподіл інсоляційного потенціалу, зокрема в Україні. Розглянуто світовий досвід розвитку сонячної генерації та визначено порівняльні переваги перед альтернативними технологіями – вітровою та ядерною енергетикою – за показниками масштабованості, логістики та коефіцієнта використання потужності. Визначено ключові тенденції подальшого розвитку галузі, серед яких – досягнення сонячною генерацією рівня ядерної у найближчі роки, перехід до тандемної архітектури як шляху подолання фундаментальних обмежень ефективності.

Ключові слова: сонячна енергетика, вітрова енергетика, альтернативна енергетика, фотовольтаїка, сонячна іррадіація.

The article is devoted to the study of current aspects of global solar power generation development. The paper analyses and systematises the key factors determining the scale and structure of solar generation: the physical foundations of solar irradiance, the fundamental efficiency limitations of silicon photovoltaic cells, the dynamics of generation cost reduction, and the regional distribution of insolation potential, particularly in Ukraine. The global volumes and structure of solar generation are analysed, leading to the conclusion that Solar PV has ceased to be a promising technology of the future – it is already the dominant force of the global energy transformation of today, and its role will only continue to grow. The article argues that the economic trajectory of the industry confirms its unrivalled position. The 90% reduction in LCOE over fourteen years is unprecedented in the history of energy. No other generation technology has demonstrated a comparable cost reduction curve. This means that Solar PV will remain the cheapest alternative source of generation in most regions, while the competitive gap with other technologies will continue to widen. It is noted that Solar PV is a strategic priority for Ukraine. The insolation across the entire territory of the country exceeds the average figures of Germany – a recognised global industry leader. The difference between regions, on a 25-year system lifespan scale, affects the payback period by only 1.5–2 years, which is non-critical under any investment planning horizon. The global experience of solar generation development is examined, and the comparative advantages over alternative technologies – wind and nuclear power – are identified in terms of scalability, logistics, and capacity factor. Key trends in the further development of the industry are determined, among which are the achievement of nuclear-level generation by solar power in the coming years and the transition to tandem architectures as a pathway to overcoming fundamental efficiency limitations. It is concluded that the inexhaustibility of the resource, the unprecedented cost reduction curve, unique scalability, and the enormous volume of global capital investment create for Solar PV a competitive position that no other renewable generation technology will be able to constitute a real alternative to in any foreseeable perspective.

Keywords: solar energy, wind energy, alternative energy, photovoltaics, solar irradiance.

Постановка проблеми. Глобальна енергетика переживає структурну трансформацію, центральним елементом якої стає Solar PV: у 2024 році сонячна генерація вперше пере-

вищила 2000 ТВт·год, забезпечивши найбільший абсолютний приріст серед усіх джерел електроенергії у світі. Обґрунтовані управлінські та інвестиційні рішення у цій сфері



потребують системного розуміння не лише економічної динаміки, а й фізичних засад, технологічних обмежень і структурних особливостей Solar PV. Відсутність такого комплексного аналізу у вітчизняному науковому дискурсі формує прогалину між темпами світового розвитку галузі та рівнем її наукового осмислення в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання розвитку відновлюваної енергетики активно досліджуються як у світовій, так і у вітчизняній науковій літературі. Динаміку та прогнози світового ринку Solar PV систематично аналізують провідні міжнародні організації – IEA, IRENA, Ember – у щорічних доповідях Global Electricity Review, Renewable Power Generation Costs та Electricity. Питання щільності потужності та просторових обмежень відновлюваної генерації висвітлено у працях van van Zalk J. & Behrens P. [28], Enevoldsen P. & Jacobson M.Z. [5], Meyers J. & Meneveau C. [18]. Температурні ефекти та лінійну залежність виробітку від інсоляції вивчали Al-Bashir A. et al. [3] та Mahmoud Y. et al. [17]. Вітчизняні дослідники зосереджуються переважно на економічних механізмах підтримки відновлюваної енергетики, інвестиційній привабливості галузі та перспективах її розвитку в умовах євроінтеграції та воєнного стану.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значний масив публікацій, наявні дослідження розглядають фізичні засади сонячної іррадіації, технологічні обмеження ефективності кремнієвих панелей та макроекономічну динаміку галузі переважно відокремлено одне від одного, без урахування їх взаємозалежності.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Основним завданням статті є комплексний аналіз світових обсягів і структури сонячної генерації – від фізичних засад сонячної іррадіації до макроекономічної динаміки галузі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сонячна енергія, що надходить на Землю, є практично невичерпним ресурсом в масштабах людської цивілізації. Кількісно її визначає повна сонячна іррадіація (Total Solar Irradiance, TSI) – потужність сонячного випромінювання за межами атмосфери на одиницю поверхні, перпендикулярної до напрямку Сонце-Земля. Її величина, за даними Королівської бельгійської обсерваторії з 1947 по 2026 рік, становить $\approx 1362,9$ Вт/м² [21], що узгоджується з вимірами NASA: на

середній відстані Землі від Сонця (~150 млн км) інтенсивність сонячної енергії у верхніх шарах атмосфери становить приблизно 1360 Вт/м² [19].

TSI вимірюється в одній точці – перпендикулярно до Сонця. Але половина поверхні Землі завжди знаходиться в тіні, а на сонячній стороні промені падають під кутом – тим меншим, чим далі від екватора. Якщо розподілити весь сонячний потік рівномірно по всій поверхні планети (день + ніч + полюси + екватор), то середнє значення виявляється меншим в чотири рази за TSI: замість ≈ 1363 Вт/м² – лише ≈ 340 Вт/м². Саме ця усереднена величина визначає енергетичний баланс Землі та її клімат. Проте, навіть цього вистачає з колосальним запасом. 70% сонячної енергії, що надходить на Землю, поглинається атмосферою, океанами та сушею – це приблизно 3,85 млн ЕДж (екзаджоулів) на рік [27]. Для порівняння: Програма розвитку ООН у доповіді World Energy Assessment 2000 року оцінила практично досяжний потенціал сонячної енергії в 1575-49837 ЕДж на рік – що в рази перевищує, як колишнє, так і сучасне світове енергоспоживання [26].

Загальна річна сонячна радіація, що падає на Землю, більш ніж у 7500 разів перевищує світове річне енергоспоживання [29]. Якщо 0,1% від поглиненої поверхнею Землі сонячної енергії вдасться перетворити в електроенергію з ефективністю 10%, це було б у чотири рази більше, ніж вся встановлена у світі генеруюча потужність. Іншими словами, захоплення менш ніж 0,01% сонячної радіації, що досягає поверхні Землі, теоретично здатне задовольнити всі поточні енергетичні потреби людства.

Варто також чітко розрізняти TSI та реальну інсоляцію на поверхні: атмосфера послаблює сонячне випромінювання, і максимальна нормальна поверхнева іррадіація на рівні моря в ясну погоду становить приблизно 1000 Вт/м² – саме це значення є стандартом для вимірювання ефективності сонячних панелей (STC, Standard Test Conditions). Реальна середня інсоляція по поверхні суші – 170-240 Вт/м² з урахуванням хмарності, ночі та кута падіння.

У порівнянні з багатьма країнами Україна не має ідеальних місць для збору сонячної енергії. Проте, в Україні, всупереч поширеній думці, є дуже багато місць, де вигідно перетворювати сонячну енергію на електроенергію за допомогою сонячних панелей. Звичайно, в зимовий період вироблення енергії

сонячними панелями суттєво знижується, але все одно вартість електроенергії від сонячної електростанції залишається суттєво нижчою, ніж від дизельного або бензинового генератора.

Інсоляція в Україні варіюється від 1100 до 1500 кВт·год/м², що робить практично всю територію країни придатною для розміщення сонячних електростанцій. Для порівняння: Німеччина – світовий лідер за встановленою потужністю сонячних станцій – має інсоляцію 900-1200 кВт·год/м². Тобто в Україні умови навіть кращі [1].

Основний вплив на продуктивність сонячної електростанції має кількість сонячної радіації, а не температура повітря. У зимовий час при чистому небі вироблення електрики вище, ніж у весняні похмурі дні. Водночас при надто високих температурах обсяг генерації знижується через нагрівання панелі – в середньому втрати потужності становлять близько 5% при нагріванні на кожні 10 градусів понад 25°C [2]. Тому «найсонячніший» регіон не завжди дає максимальну річну генерацію.

Головне фундаментальне обмеження сонячної генерації – фізична неможливість працювати вночі та у хмарну погоду. Це безпосередньо відбивається у показнику КВП (коефіцієнт використання потужності, англ. Capacity Factor): за даними IRENA, середній світовий КВП комунальної сонячної генерації у 2023 році склав 16,2% – найнижчий серед усіх основних видів генерації.

Для порівняння: атомні електростанції, що працюють у звичайному режимі цілодобово, показують інші цифри. За даними World Nuclear Association, у 2024 році глобальний середній КВП атомних реакторів склав 83% [30]. МАГАТЕ фіксує медіанний КВП світового ядерного парку на рівні 88% за підсумками 2023 року [35]. Розрив із сонячною генерацією – майже п'ятикратний.

Це означає, що рівна встановлена потужність виробляє принципово різний обсяг електроенергії. За розрахунками Nuclear Energy Institute, для отримання того ж річного обсягу виробітку, що дає 1000 МВт атомної потужності, необхідно 3300-5400 МВт сонячних потужностей [20]. Стосовно широт України і більшості країн Європи, де реальний КВП сонця не перевищує 15-17%, це співвідношення зміщується до верхньої межі діапазону – 5-6 ГВт на кожен гігават атомної генерації, що заміщується.

Кремній залишається основним матеріалом світової сонячної індустрії, і його фізичні

властивості задають жорстку межу ефективності. Відповідно до межі Шоклі-Квайссера, максимально можливий ККД одинарного р-п переходу становить 33,7%. Для кремнію з його менш вигідними параметрами ця межа нижче: з урахуванням неминучої Оже-рекомбінації теоретичний максимум становить близько 29,4% [4].

На практиці масові комерційні панелі працюють значно нижче цієї верхньої межі. За даними National Renewable Energy Laboratory, медіанний ККД модулів у житлових сонячних системах США у 2023 році становив 20,8% [6]. Лабораторні рекорди для великоформатних кремнієвих модулів досягають 25-26%, сертифікованих NREL [11], однак у серійному виробництві типовий діапазон залишається на рівні 20-24%.

Таким чином, сучасні панелі освоїли від 60% до 75% теоретично доступного потенціалу кремнію. Подальше зростання в межах одинарного переходу обмежений фундаментальною фізикою; подолання цього бар'єру потребує переходу до тандемних архітектур – наприклад, до перовскіт-кремнієвих напівпровідникових структур, теоретична межа яких становить вже 43% [16].

На відміну від вітрової генерації, де потужність турбіни пропорційна кубу швидкості вітру, сонячні панелі підкоряються значно простішій залежності: існує пряма лінійна пропорційність між інтенсивністю інсоляції і вихідним струмом модуля, а отже, і його потужністю [3]. Подвоєння світлового потоку за інших рівних дає близьке до подвоєння збільшення генерації.

Однак тут виникає фізичний парадокс: сонячні – і, як правило, найспекотніші дні не є оптимальними з точки зору ефективності панелі. Кристалічний кремній, з якого виготовлено більшість комерційних модулів, є хорошим провідником тепла, через що температура панелі в реальних умовах нерідко на 20-30°C перевищує температуру навколишнього повітря [8]. Кількісно цей ефект описується температурним коефіцієнтом потужності: для стандартних кристалічних панелей він становить близько – 0,5%/°C щодо стандартних умов тестування (25°C) [22]. Насправді це означає, що панель потужністю 400 Вт за нормальної температури 45°C – типової для сонячного літнього дня – зробить близько 369 Вт: зниження на 7,6% лише за рахунок нагрівання [23].

У світовій сонячній генерації існують два принципово різні підходи до перетворення

сонячної енергії на електричну. Перший і абсолютно домінуючий фотовольтаїка (Solar PV): пряме перетворення світла в електричний струм через напівпровідниковий ефект. За даними IRENA, в кінці 2024 року сумарна встановлена потужність Solar PV у світі досягла 1865 ГВт, тоді як потужність всіх концентруючих сонячних електростанцій (CSP) склала близько 6,9 ГВт [15] – тобто на фотовольтаїку припадає понад 99,6% всієї сонячної генерації.

Другий підхід – концентрована сонячна енергетика (Concentrated Solar Power, CSP) – заснований на принципово іншому фізичному процесі. Поле дзеркал фокусує сонячне випромінювання на приймачі, нагріваючи теплоносії, який потім рухає парову турбіну – за тією ж схемою, що й традиційні теплові електростанції. Історично найпоширенішою архітектурою були параболічні трюги (жолоби): вигнуті дзеркала спрямовують світло на трубку з теплоносієм, нагріваючи його до 150-350°C. У баштових системах поле плоских дзеркал-геліостатів концентрує сонячне світло на приймачі на вершині вежі, розігріваючи теплоносії до 500-1000°C [24]. Принципова перевага CSP перед фотовольтаїкою – можливість зберігати тепло в баках з розплавленими солями та виробляти електрику після заходу сонця; тривалість зберігання протягом 12 годин сьогодні стала економічно обґрунтованою [15].

Solar PV має суттєву логістичну перевагу перед вітроенергетикою в частині масштабування. Сонячні панелі перевозяться у стандартних морських контейнерах і використовують одні й ті самі базові компоненти незалежно від масштабу проекту.

Нестабільний характер сонячної генерації – її залежність від часу доби та хмарності – створює реальну потребу в балансуєчих потужностях та накопичувачах енергії. Тренд на спільне встановлення сонячних панелей та акумуляторів прискорюється.

Водночас твердження про те, що накопичувачі встановлюються завжди одночасно із сонячними проектами, не відповідає поточній статистиці. За даними Міністерства енергетики США, в 2023 році лише 26% потужностей комунальної сонячної генерації в США вводилися як гібридні проекти PV та акумулятори [25] – переважна більшість об'єктів, як і раніше, підключається до мережі без власного накопичувача енергії.

Точніше характеризувати генерацію Solar PV не як «непередбачувану», а як змінну з

високим ступенем прогнозованості: добовий та сезонний профіль вироблення добре відомий заздалегідь, що дозволяє операторам системи розподілу планувати балансування без накопичувачів на об'єкті.

Зниження вартості сонячної генерації протягом останніх десятиліть немає аналогів в історії енергетики. За даними IRENA, сумарні капітальні витрати на будівництво комунальних сонячних електростанцій (Total Installed Cost, TIC) знизились з \$5283/кВт у 2010 році до \$691/кВт у 2024 році – зниження на 87%, або у 7,6 разів [14]. Собівартість генерації (LCOE) скоротилася ще радикальніше: з \$0,460/кВт·год у 2010 році до \$0,043/кВт·год у 2024 році – падіння на 90% за чотирнадцять років. Головними драйверами стали здешевлення модулів та інверторів (60% зниження TIC) та скорочення витрат на монтаж та розробку проектів (30%) [13].

Глобальний середньозважений показник у \$0,043/кВт·год робить сонячну генерацію на 41% дешевшою за найменш витратну альтернативу серед корисних копалин.

Низька щільність потужності – одне з фундаментальних фізичних обмежень сонячної та вітрової генерації. Комунальні сонячні електростанції забезпечують у середньому 5,8–6,8 Вт/м² з урахуванням усієї площі об'єкта, включаючи міжпанельні проміжки обслуговування; у найбільш інсольованих районах планети (Близький Схід, південний захід США) цей показник наближається до 20 Вт/м² [28].

Фізичною причиною таких низьких показників служить ефект аеродинамічного сліду: турбіна, що потрапляє у набігаючий потік від сусідніх, різко втрачає генерацію. Традиційний інженерний норматив – відстань 3-5 діаметрів ротора у ряді та 5-9 діаметрів між рядами [7]. Для сучасних офшорних машин з діаметром ротора 200-240 м це означає міжтурбінні відстані в 1-2 км, при яких значні втрати сліду не усуваються повністю. Для порівняння: газові електростанції з комбінованим циклом забезпечують потужність 1000-2000 Вт/м², вугільні – 500-1000 Вт/м²; щільність невідновлюваної генерації перевищує відновлювану приблизно на три порядки [28].

За даними [9], у 2024 році глобальна сонячна генерація вперше перевищила 2000 ТВт·год – 6,9% світового виробництва електроенергії.

Щоб зрозуміти масштаб перетворень, достатньо поглянути на хронологію світової сонячної генерації. У 2010 році весь світ

виробляв близько 34 ТВт·год сонячної електроенергії; у 2015-му – 256 ТВт·год; 2020-го – 856 ТВт·год; 2024-го – 2131 ТВт·год. У 2004 році, коли промислова сонячна генерація тільки зароджувалася, цей показник не перевищував кількох ТВт·год.

Ключовий ефект прискорення: світова генерація Solar PV подвоювалася приблизно кожні три роки, починаючи з 2016 року, і зробила це знову в період з 2021 по 2024 рік. Іншими словами, за три роки людство побудувало стільки ж сонячної генерації, скільки за всі попередні десятиліття.

У 2024 році Solar PV забезпечила найбільший приріст серед усіх джерел енергії – близько 480 ТВт·год. [10]. Цей показник можна порівняти з сукупною світовою сонячною генерацією, накопиченою за всю історію аж до 2016 року включно. Шлях від 1000 до 2000 ТВт·год зайняв лише три роки – тоді як на зростання від 100 до 1000 ТВт·год знадобилося вісім років.

Solar PV займає особливе місце серед відновлювальних джерел енергії саме як фактор зростання. У 2024 році відновлювані джерела забезпечили майже 75% сумарного приросту світової електрогенерації, і Solar PV очолив це зростання – близько 480 ТВт·год додаткового виробництва, більше, ніж будь-яке інше джерело. За прогнозом IEA, Solar PV забезпечить більше половини всього приросту відновлюваної генерації у період 2024-2030 роки [10].

Причина домінування – саме універсальність і простота масштабування: фотовольтаїка однаково ефективно розгортається від трикіловатної дахової системи до гігаватного парку в пустелі, не вимагає спеціалізованої важкої техніки і не залежить від вузького набору географічних умов, як вітер чи гідроенергетика.

Не менш значима динаміка у співвідношенні з атомною енергетикою. У 2024 році Solar PV виробив 2131 ТВт·год (6,9% світової генерації), тоді як ядерна енергетика – близько 2700 ТВт·год (9%). Розрив стрімко скорочується: за прогнозом IEA, Solar PV перевищить генерацію ядерних електростанцій у 2026 році. У 2025 році очікується зростання Solar PV приблизно на 40%, що наблизить її до атомної генерації, і момент фактичного перетину прогнозується у 2026-2027 роках.

Висновки. Аналіз світових обсягів та структури сонячної генерації дозволяє стверджувати, що Solar PV перестала бути перспективною технологією майбутнього – вона

вже є домінуючою силою глобальної енергетичної трансформації сьогодення, і її роль лише зростатиме.

Фізичний потенціал сонячної енергії є практично невичерпним у будь-якому реалістичному горизонті планування. Жодне інше відновлювальне джерело – вітер, гідроенергетика, геотермальна енергія – не має ресурсної бази навіть близької за масштабом. Це робить Solar PV безальтернативною основою майбутньої глобальної енергосистеми: не одним із варіантів, а єдиним джерелом, здатним забезпечити необмежене зростання виробництва електроенергії без вичерпання первинного ресурсу.

Економічна траєкторія галузі підтверджує цю безальтернативність. Зниження LCOE на 90% за чотирнадцять років – є безпрецедентним в історії енергетики. Жодна інша технологія генерації не демонструвала подібної кривої здешевлення. Це означає, що Solar PV залишатиметься найдешевшим альтернативним джерелом генерації у більшості регіонів, а конкурентний розрив з іншими технологіями продовжуватиме збільшуватись.

Масштабованість Solar PV не має аналогів серед енергетичних технологій. Це принципово відрізняє Solar PV від вітрової генерації з її складною логістикою надгабаритних компонентів, від гідроенергетики з її жорсткою географічною прив'язкою. Саме ця масштабованість – від децентралізованої генерації до промислової – забезпечує Solar PV унікальну здатність проникати в будь-які сегменти ринку одночасно.

Технологічний горизонт галузі залишається відкритим. Тандемні структури здатні у наступному десятилітті забезпечити черговий стрибок ефективності серійних модулів – без принципової зміни виробничої інфраструктури. Паралельно зростання гібридних проєктів поступово нівелює головне операційне обмеження Solar PV – залежність від часу доби – перетворюючи її на повноцінне керове джерело базової генерації.

Для України Solar PV є стратегічним пріоритетом. Інсоляція на всій території країни перевищує середні показники Німеччини – визнаного світового лідера галузі. Різниця між регіонами в масштабах 25-річного терміну служби системи позначається на окупності лише на 1,5-2 роки, що є некритичним при будь-якому горизонті інвестиційного планування.

Таким чином, Solar PV у найближчі десятиліття стане не просто найбільшим, а сис-

темоутворюючим джерелом світової електроенергетики – технологією, навколо якої будуватиметься вся решта енергосистеми: накопичувачі, гнучкі мережі, водневі проекти та міжнародні енергетичні коридори. Невичерпність ресурсу, безпрецедентна крива зде-

шевлення, унікальна масштабованість і колосальний обсяг глобальних капіталовкладень формують для Solar PV конкурентну позицію, яку жодна інша технологія відновлюваної генерації не зможе оспорити у доступній перспективі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Інсоляція: що це таке, якою вона буває та від чого залежить. Green System – 06.06.2025. URL: <https://greensystem.com.ua/blog/insolyacziya-shho-cze-take-yakoyu-vona-buvaye-ta-vid-chogo-zalezhyt> (дата звернення: 16.04.2026).
2. Сонячні електростанції України на мапі. Альтернативна енергетика і технології майбутнього в Україні. URL: <https://eenergy.com.ua/solar/sonyachni-elektrostantsiyi-ukrayiny-na-mapі/> (дата звернення: 16.04.2026).
3. Al-Bashir, A., Al-Dweri, M., Al-Ghandoor, A., Hammad, B., & Al-Kouz, W. (2020). Analysis of effects of solar irradiance, cell temperature and wind speed on photovoltaic systems performance. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(1). URL: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/download/8591/4791/21445> (дата звернення: 16.04.2026).
4. Andreani, L. C., Bozzola, A., Kowalczewski, P., Liscidini, M., & Redorici, L. (2022). *The Shockley–Queisser limit and the conversion efficiency of silicon-based solar cells*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666950122001092> (дата звернення: 16.04.2026).
5. Enevoldsen, P., & Jacobson, M. Z. (2021). Data investigation of installed and output power densities of onshore and offshore wind turbines worldwide. *Energy for Sustainable Development*, 60, 40–51. URL: <https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles//WindSpacing.pdf> (дата звернення: 16.04.2026).
6. Feldman, D., & Zuboy, J. (2024). *Fall 2024 Solar Industry Update*. National Renewable Energy Laboratory. URL: <https://docs.nrel.gov/docs/fy25osti/92257.pdf> (дата звернення: 16.04.2026).
7. Fleming, P., et al. (2019). Wind farm power optimization through wake steering. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(29), 14495–14500. URL: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1903680116> (дата звернення: 16.04.2026).
8. Futurasun. (2024). *What is the temperature coefficient of solar panels*. URL: <https://www.futurasun.com/en/temperature-coefficient/> (дата звернення: 16.04.2026).
9. *Global Electricity Review 2025: Global electricity source trends*. Ember. (2025). URL: <https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2025/global-electricity-source-trends/> (дата звернення: 16.04.2026).
10. *Global Energy Review 2025: Electricity*. IEA. (2025). URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/electricity> (дата звернення: 16.04.2026).
11. Green, M. A., et al. (2025). Solar cell efficiency tables (Version 66). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.3919> (дата звернення: 16.04.2026).
12. International Atomic Energy Agency. (2024). *IAEA releases nuclear power data and operating experience for 2023*. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-releases-nuclear-power-data-and-operating-experience-for-2023> (дата звернення: 16.04.2026).
13. International Renewable Energy Agency. (2024). *Renewable power generation costs in 2023: Executive summary*. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023_executive_summary.pdf (дата звернення: 16.04.2026).
14. International Renewable Energy Agency. (2025). *Renewable power generation costs in 2024: Summary*. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_TEC_RPGC_in_2024_Summary_2025.pdf (дата звернення: 16.04.2026).
15. International Renewable Energy Agency. (2025). *Solar energy*. URL: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy> (дата звернення: 16.04.2026).
16. LONGi Green Energy Technology. (2025). *34.85%! LONGi breaks world record for crystalline silicon-perovskite tandem solar cell efficiency*. URL: <https://www.longi.com/en/news/silicon-perovskite-tandem-solar-cells-new-world-efficiency/> (дата звернення: 16.04.2026).
17. Mahmoud, Y., et al. (2023). Effect of various parameters on the performance of solar PV power plant: a review and the experimental study. *Sustainable Energy Research*. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40807-023-00076-x> (дата звернення: 16.04.2026).
18. Meyers, J., & Meneveau, C. (2021). Spatial constraints in large-scale expansion of wind power plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(27). URL: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2103875118> (дата звернення: 16.04.2026).

19. NASA Earth Observatory. (2009). *Climate and Earth's Energy Budget*. URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance/page2.php> (дата звернення: 16.04.2026).
20. Nuclear Energy Institute. (2015). *Land needs for wind, solar dwarf nuclear plant's footprint*. URL: <https://www.nei.org/news/2015/land-needs-for-wind-solar-dwarf-nuclear-plants> (дата звернення: 16.04.2026).
21. Royal Observatory of Belgium. (2026). *TSI composite dataset 1947–2026*. URL: https://www.sidc.be/users/stevend/ROB_TSI_composite_latest.txt (дата звернення: 16.04.2026).
22. Sinovoltaics. (2024). *Measuring the temperature coefficient of a PV module*. URL: <https://sinovoltaics.com/solar-basics/measuring-the-temperature-coefficients-of-a-pv-module/> (дата звернення: 16.04.2026).
23. Solar Tech Online. (2025). *Solar panel operating temperature: Complete guide 2025*. URL: <https://solartechonline.com/blog/solar-panel-operating-temperature-guide/> (дата звернення: 16.04.2026).
24. SolarPACES. (2023). *How concentrated solar power works: Tower, trough, Fresnel or dish*. URL: <https://www.solarpaces.org/worldwide-csp/how-concentrated-solar-power-works/> (дата звернення: 16.04.2026).
25. U.S. Department of Energy. (2024). *Quarterly Solar Industry Update, Fall 2024*. URL: <https://www.energy.gov/eere/solar/quarterly-solar-industry-update> (дата звернення: 16.04.2026).
26. United Nations Development Programme, UN Department of Economic and Social Affairs, & World Energy Council. (2000). *World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability* (p. 163). UNDP. URL: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/World%20Energy%20Assessment-2000.pdf> (дата звернення: 16.04.2026).
27. University of California, Davis. (2021). *Solar Power: How is solar power generated*. URL: <https://www.ucdavis.edu/climate/definitions/how-is-solar-power-generated> (дата звернення: 16.04.2026).
28. van Zalk, J., & Behrens, P. (2018). The spatial extent of renewable and non-renewable power generation. *Energy Policy*, 123, 83–91. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421518305512> (дата звернення: 16.04.2026).
29. World Energy Council. (2013). *World Energy Resources: Solar* (p. 8.1). URL: https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2013/10/WER_2013_8_Solar_revised.pdf (дата звернення: 16.04.2026).
30. World Nuclear Association. (2024). *Global nuclear industry performance*. URL: <https://world-nuclear.org/our-association/publications/world-nuclear-performance-report/global-nuclear-industry-performance> (дата звернення: 16.04.2026).

REFERENCES:

1. Green System. (2025, June 6). *Insoliatsiia: shcho tse take, yakoiu vona buvaie ta vid choho zalezhyt [Insolation: what it is, what types it has and what it depends on]*. <https://greensystem.com.ua/blog/insolyacziya-shho-cze-take-yakoyu-vona-buvaye-ta-vid-chogo-zalezhyt> (accessed: 16.04.2026).
2. *Soniachni elektrostantsii Ukrainy na mapi [Solar power plants of Ukraine on the map]*. (n.d.). *Alternatyvna enerhetyka i tekhnolohii maibutnoho v Ukraini [Alternative energy and technologies of the future in Ukraine]*. <https://eenergy.com.ua/solar/soniachni-elektrostantsiyi-ukrayiny-na-mapil> (accessed: 16.04.2026).
3. Al-Bashir, A., Al-Dweri, M., Al-Ghandoor, A., Hammad, B., & Al-Kouz, W. (2020). Analysis of effects of solar irradiance, cell temperature and wind speed on photovoltaic systems performance. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(1). <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/download/8591/4791/21445> (accessed: 16.04.2026).
4. Andreani, L. C., Bozzola, A., Kowalczewski, P., Liscidini, M., & Redorici, L. (2022). The Shockley–Queisser limit and the conversion efficiency of silicon-based solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666950122001092> (accessed: 16.04.2026).
5. Enevoldsen, P., & Jacobson, M. Z. (2021). Data investigation of installed and output power densities of onshore and offshore wind turbines worldwide. *Energy for Sustainable Development*, 60, 40–51. <https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/WindSpacing.pdf> (accessed: 16.04.2026).
6. Feldman, D., & Zuboy, J. (2024). *Fall 2024 solar industry update*. National Renewable Energy Laboratory. <https://docs.nrel.gov/docs/fy25osti/92257.pdf> (accessed: 16.04.2026).
7. Fleming, P., et al. (2019). Wind farm power optimization through wake steering. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(29), 14495–14500. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1903680116> (accessed: 16.04.2026).
8. Futurasun. (2024). *What is the temperature coefficient of solar panels*. <https://www.futurasun.com/en/temperature-coefficient/> (accessed: 16.04.2026).
9. Ember. (2025). *Global Electricity Review 2025: Global electricity source trends*. <https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2025/global-electricity-source-trends/> (accessed: 16.04.2026).

10. International Energy Agency. (2025). *Global Energy Review 2025: Electricity*. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/electricity> (accessed: 16.04.2026).
11. Green, M. A., et al. (2025). Solar cell efficiency tables (Version 66). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.3919> (accessed: 16.04.2026).
12. International Atomic Energy Agency. (2024). *IAEA releases nuclear power data and operating experience for 2023*. <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-releases-nuclear-power-data-and-operating-experience-for-2023> (accessed: 16.04.2026).
13. International Renewable Energy Agency. (2024). *Renewable power generation costs in 2023: Executive summary*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023_executive_summary.pdf (accessed: 16.04.2026).
14. International Renewable Energy Agency. (2025). *Renewable power generation costs in 2024: Summary*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_TEC_RPGC_in_2024_Summary_2025.pdf (accessed: 16.04.2026).
15. International Renewable Energy Agency. (2025). *Solar energy*. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy> (accessed: 16.04.2026).
16. LONGi Green Energy Technology. (2025). *34.85%! LONGi breaks world record for crystalline silicon-perovskite tandem solar cell efficiency*. <https://www.longi.com/en/news/silicon-perovskite-tandem-solar-cells-new-world-efficiency/> (accessed: 16.04.2026).
17. Mahmoud, Y., et al. (2023). Effect of various parameters on the performance of solar PV power plant: A review and the experimental study. *Sustainable Energy Research*. <https://link.springer.com/article/10.1186/s40807-023-00076-x> (accessed: 16.04.2026).
18. Meyers, J., & Meneveau, C. (2021). Spatial constraints in large-scale expansion of wind power plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(27). <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2103875118> (accessed: 16.04.2026).
19. NASA Earth Observatory. (2009). *Climate and Earth's energy budget*. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance/page2.php> (accessed: 16.04.2026).
20. Nuclear Energy Institute. (2015). *Land needs for wind, solar dwarf nuclear plant's footprint*. <https://www.nei.org/news/2015/land-needs-for-wind-solar-dwarf-nuclear-plants> (accessed: 16.04.2026).
21. Royal Observatory of Belgium. (2026). *TSI composite dataset 1947–2026*. https://www.sidc.be/users/stevend/ROB_TSI_composite_latest.txt (accessed: 16.04.2026).
22. Sinovoltaics. (2024). *Measuring the temperature coefficient of a PV module*. <https://sinovoltaics.com/solar-basics/measuring-the-temperature-coefficients-of-a-pv-module/> (accessed: 16.04.2026).
23. Solar Tech Online. (2025). *Solar panel operating temperature: Complete guide 2025*. <https://solartechonline.com/blog/solar-panel-operating-temperature-guide/> (accessed: 16.04.2026).
24. SolarPACES. (2023). *How concentrated solar power works: Tower, trough, Fresnel or dish*. <https://www.solarpaces.org/worldwide-csp/how-concentrated-solar-power-works/> (accessed: 16.04.2026).
25. U.S. Department of Energy. (2024). *Quarterly solar industry update, Fall 2024*. <https://www.energy.gov/eere/solar/quarterly-solar-industry-update> (accessed: 16.04.2026).
26. United Nations Development Programme, UN Department of Economic and Social Affairs, & World Energy Council. (2000). *World energy assessment: Energy and the challenge of sustainability* (p. 163). UNDP. <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/World%20Energy%20Assessment-2000.pdf> (accessed: 16.04.2026).
27. University of California, Davis. (2021). *Solar power: How is solar power generated*. <https://www.ucdavis.edu/climate/definitions/how-is-solar-power-generated> (accessed: 16.04.2026).
28. van Zalk, J., & Behrens, P. (2018). The spatial extent of renewable and non-renewable power generation. *Energy Policy*, 123, 83–91. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421518305512> (accessed: 16.04.2026).
29. World Energy Council. (2013). *World energy resources: Solar* (p. 8.1). https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2013/10/WER_2013_8_Solar_revised.pdf (accessed: 16.04.2026).
30. World Nuclear Association. (2024). *Global nuclear industry performance*. <https://world-nuclear.org/our-association/publications/world-nuclear-performance-report/global-nuclear-industry-performance> (accessed: 16.04.2026).

Дата надходження статті: 03.04.2026

Дата прийняття статті: 24.04.2026

Дата публікації статті: 04.05.2026