

О. В. Дзядь,
к. е. н., доцент кафедри міжнародної економіки і світових фінансів,
Дніпровський національний університет ім. О. Гончара
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0869-599X>
Н. Д. Тройникова,
бакалавр освітньої програми міжнародна економіка,
Дніпровський національний університет ім. О. Гончара
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-9154-6139>

DOI: 10.32702/2306-6814.2025.10.146

СУЧАСНІ ТРЕНДИ СВІТОВОГО РИНКУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

O. Dzyad,
PhD in Economics, Associate Professor of the Department of International Economics
and World Finance, O. Honchar Dnipro National University
N. Troinykona,
Bachelor, O. Honchar Dnipro National University

CURRENT TRENDS IN THE GLOBAL SOLAR PANEL MARKET

Глобальна енергетична криза, кліматичні зміни, нестабільність цін на традиційні джерела енергії під час повномасштабного вторгнення росії в Україну актуалізують питання побудови сталих енергосистем. На основі аналізу даних Міжнародного енергетичного агентства, Міжнародного агентства з відновлювальної енергетики, Єврокомісії встановлено, що глобальний ринок сонячних панелей знаходиться на стадії насичення. Після стрімкого зростання в Китаї, ЄС, США, Індії та інших країнах темпи встановлення нових потужностей уповільнюються, щорічний приріст нових потужностей у світі становитиме 350 ГВт до 2032 р. Провідним виробником та експортером панелей залишається Китай, у 2023 р. його частка глобальному виробництві становила 80%, в експорті — 65,4%. Надлишкове виробництво сонячних панелей в Китаї спричиняє зниження цін та загострює конкуренцію на світовому ринку. Глобальна торгівля сонячними панелями характеризуються високим рівнем концентрації експорту з Китаю та диверсифікацією імпорту у розвинених країнах. Китайські виробники домінують у сегменті полікристалічних та монокристалічних панелей стандартної ефективності, високоефективні панелі та спеціалізовані продукти залишаються нішею для виробників з Південної Кореї, Тайваню, Японії та ЄС. Провідну роль для світового ринку відіграють технологічні фактори. Впровадження тарифних і нетарифних обмежень, а також ініціатив з локалізації виробництва змінює конфігурацію глобальних ланцюгів постачання.

The global energy crisis, climate change, and the volatility of prices for traditional energy sources during Russia's full-scale invasion of Ukraine have made the issue of building sustainable energy systems more urgent. Solar panels provide clean and affordable energy to households and various economic sectors around the world. Based on the analysis of data from the International Energy Agency, the International Renewable Energy Agency, and the European Commission, it has been established that the global solar panel market is at the saturation stage. After rapid growth in China,

the EU, the US, India and other countries, the pace of new capacity installation is slowing down, with an annual increase in new capacity worldwide of 350 GW by 2032. China remains the leading producer and exporter of panels, with a global production share of 80% in 2023 and a 65,4% share in exports. The overproduction of solar panels in China leads to lower prices and intensifies competition in the global market, resulting in underutilization of production capacity and a drop in profitability. In today's environment, efficiency, adaptability to market changes, and the ability to upgrade technology play a key role for manufacturers. Among the technological factors of the global market development, digitalization, robotization, use of quantum technologies, perovskite and flexible elements, double-sided panels, and artificial intelligence are becoming increasingly important. There is a change in the nature of demand: solar energy is increasingly integrated into the residential, commercial, industrial, and municipal sectors of the economy. Global trade flows of solar panels are characterized by a high level of concentration of exports from China and diversification of imports in developed countries. Chinese manufacturers dominate the segment of polycrystalline and monocrystalline panels of standard efficiency, while high-efficiency panels and specialized products (flexible panels, building-integrated solutions) remain a niche for manufacturers from South Korea, Taiwan, Japan, and the EU. The introduction of tariff and non-tariff restrictions, as well as localization initiatives, is changing the configuration of global supply chains. However, full independence from dominant producers remains challenging due to the scale of their production base and economies of scale.

Ключові слова: сонячні панелі, виробництво, міжнародна торгівля, глобальне перенасичення ринку, технологічні фактори, торговельна політика.

Key words: solar panels, production, international trade, global market glut, technological factors, trade policy.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

У контексті глобальної енергетичної кризи, кліматичних змін та необхідності зниження викидів парникових газів усе більшого значення набуває розвиток відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної енергетики. Сонячні панелі є ключовим елементом у переході до сталої енергосистеми, забезпечуючи чисту та доступну електроенергію для різних секторів економіки. Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням попиту на сонячні панелі, постійним удосконаленням технологій їх виробництва, а також необхідністю формування ефективної політики у сфері зеленої енергетики. Водночас як світовий, так і український ринки стикаються з низкою викликів — залежністю від імпорту сировини, ціновими коливаннями, нестабільністю законодавчої бази. Тому дослідження глобального виробництва та торгівлі сонячними панелями є надзвичайно важливим для забезпечення енергетичної безпеки, економічного зростання та досягнення цілей сталого розвитку.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання розвитку світового ринку відновлювальних джерел енергії досліджували провідні вітчизняні та зарубіжні вчені. Світові тенденції запровадження відновлювальних джерел енергії представлені у роботах

С. Денисюк, Г. Белоха, І. Чернечук, В. Лисий [1], С. Бойко, Л. Савченко, О. Бородіної [2], С. Очкуренко [3], О. Літвак, та ін. Питанням світового енергетичного ринку та його регулювання присвячені роботи Б. Морозюк, І. Чичкало-Кондрацької, А. Лекунович, Я. Легкої, Н. Красулі, О. Климчука [4] та ін. Окремі технологічні аспекти розвитку світового ринку сонячних панелей представлені у звітах міжнародних організації та компаній. Переважна більшість дослідників концентрують увагу розвитку енергетичної галузі з акцентом на відновлювальних джерелах енергії. Світовий ринок сонячних панелей як окремого товару розглядається фрагментарно у контексті світових потужностей енергогенерації.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ (ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ)

Мета статті полягала у тому, щоб встановити сучасні тренди та чинники розвитку глобального виробництва та торгівлі сонячними панелями. У межах дослідження поставлені наступні завдання: дослідити динаміку та структуру виробництва сонячних панелей у світі, проаналізувати міжнародну торгівлю сонячними панелями; встановити провідні фактори розвитку глобального виробництва та міжнародної торгівлі сонячними панелями.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), глобальні виробничі потужності сонячних пане-

Таблиця 1. Глобальні виробничі потужності у сфері сонячної енергетики та регіональна концентрація у Китаї (2021—2024 рр.)

Рік	Глобальні виробничі потужності (ГВт)	Частка Китаю (%)
2021	≈ 174	80
2022	≈ 230	95
2023	≈ 358	90
2024	≈ 353	90

Джерело: сформовано на основі [5].

лей зросли з 168 ГВт у 2020 р. до 295 ГВт у 2023 р., що становить приріст на 75,6% за три роки (табл. 1).

За даними Bloomberg New Energy Finance світове виробництво сонячних панелей у 2023 р. досягло 386 ГВт, що на 28,7% перевищує показник 2022 р. (300 ГВт). Дані табл. 1. вказують, що до 2023 р. глобальний ринок сонячної енергетики поступово зростає. У 2024 р. світова сонячна енергетика вступила в нову фазу розвитку, яка характеризується уповільненням темпів зростання та ознаками ринкової зрілості. Середній обсяг щорічних глобальних установок сонячних потужностей у період з 2024 по 2032 рр. становитиме близько 350 ГВт, з піковими показниками у 371 ГВт у 2025 та 2030 роках. Це означає відхід від стрімкого зростання, яке домінувало впродовж попереднього десятиліття [5]. Цей етап розвитку зумовлює необхідність для компаній зосередитися на підвищенні ефективності та стратегічному управлінні. Посилення конкуренції серед постачальників та зменшення маржинальності вимагають оптимізації виробництва, логістики та інноваційних підходів до збереження прибутковості.

Ключові гравці ринку впливають на трансформацію світового ринку. У Китаї, який зберігає статус лідера за обсягами встановлення потужностей і контролює понад 80% світового виробництва сонячних панелей, фіксується зниження темпів зростання. Основними чинниками виступають структурні обмеження щодо інфраструктури, зокрема недостатній розвиток електромереж, що стримує інтеграцію нових потужностей, зміни в схемах доходів для великих станцій, а також зменшення темпів зростання розподіленої генерації. Водночас Китай залишається головним драйвером світового виробництва — саме тут зосереджено більшість провідних виробників сонячних модулів, таких як LONGi, Jinko Solar, JA Solar та Trina Solar. Окрім цього, надлишкові виробничі потужності в Китаї чинять тиск на світовий ринок: обсяги виробництва модулів майже втричі перевищують глобальний попит, що призводить до суттєвого зниження цін. Така ситуація створює бар'єри для реалізації стратегій енергетичної незалежності в інших країнах та ускладнює формування вертикально інтегрованих національних ланцюгів постачання.

У Європі темпи встановлення сонячних електростанцій також поступово знижуються. Після зростання на 38% у 2022 р. та 26% у 2023-му, подальше середньорічне зростання до 2028 р. становитиме близько 4%. Серед причин — стабілізація роздрібних тарифів після енергетичної кризи, зменшення зацікавленості у приватних установках та обмеження у пропускній здатності електромереж [5].

У США середній річний приріст знижується з 27% у 2019—2023 рр. до 6% у період 2024—2028 рр. Водночас на ринку спостерігається активізація великомасштабних проєктів унаслідок впровадження Закону про зниження інфляції, який створює сприятливі умови для розширення виробничих потужностей у сфері модулів. До кінця 2024 р. очікується введення в експлуатацію близько 40 ГВт нових виробничих ліній, що майже утричі перевищує попередні показники.

У сфері виробництва сонячних модулів спостерігаються ознаки глобального перенасичення. Китай забезпечує обсяги виробництва, які суттєво перевищують потреби світового ринку. Це спричиняє зниження цін на модулі та загострює конкуренцію, що підриває економічну доцільність реалізації нових виробничих проєктів у інших країнах. Значна частина запланованих проєктів може залишитися нереалізованою, існує ймовірність недозавантаження виробничих ліній через падіння рентабельності. Загалом, сонячна галузь переходить до нової ринкової реальності, де ключову роль відіграють ефективність, адаптивність до ринкових змін та здатність до технологічного оновлення [5].

Wood Mackenzie зазначає, що найбільшими виробниками сонячних панелей у 2023 р. і були: LONGi (65,6 ГВт), Jinko Solar (52,3 ГВт), JA Solar (47,2 ГВт), Trina Solar (42,8 ГВт) та Canadian Solar (32,7 ГВт). Виробничі потужності з виготовлення полікремнію зросли з 621 тис. тонн у 2021 р. до 1,45 млн тонн у 2023 р., що спричинило зниження його вартості з 28,5 дол. США/кг до 7,2 дол. США/кг за той самий період.

Головними трендами у виробництві сонячних панелей, стають підвищення їх ефективності та зниження собівартості. За даними Національної лабораторії відновлюваної енергетики США (NREL), середня ефективність комерційних монокристалічних панелей зросла з 17,5% у 2018 р. до 22,3% у 2023 р. Собівартість виробництва сонячних панелей знизилась із 0,37 дол. США/Вт у 2018 р. до 0,19 дол. США/Вт у 2023 р., що скоротилася майже удвічі. Масштабування виробництва зменшило питомі капітальні витрати на виробничі лінії з 0,11 дол. США/Вт у 2019 р. до 0,07 дол. США/Вт у 2023 р.

Попит на сонячні панелі демонструє стійке зростання на глобальному ринку. За оцінками Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA), сукупна встановлена потужність сонячних електростанцій у світі зросла з 713 ГВт у 2020 р. до 1,22 ТВт у 2023 р., середньорічний приріст становив 19,6% [6]. Дані SolarPower Europe свідчать, що у 2023 р. було встановлено рекордні 350 ГВт нових сонячних потужностей, що на 49,8% більше, ніж у 2022 р. (233,7 ГВт). Згідно з IHS Markit, лідерами за обсягами нових інсталяцій у 2023 р. стали: Китай (162,5 ГВт), ЄС (56,2 ГВт), США (32,4 ГВт), Індія (18,6 ГВт) та Бразилія (12,8 ГВт). Табл. 2 ілюструє структуру глобального попиту на сонячні панелі за секторами економіки.

Як свідчать дані табл. 2, основні потужності сонячної генерації у 2023 р. були сконцентровані в комерційному секторі (105,2 ГВт), що складає близько 30% від загального обсягу. Це відображає зростання попиту на сонячні панелі в контексті енергоефективних рішень для бізнесу та офісних будівель. Житловий сектор, з обся-

гом 87,5 ГВт (25% від загальної потужності), також є важливим фактором, оскільки інтеграція сонячних панелей з системами розумного дому сприяє зниженню витрат на енергоспоживання і підвищенню комфорту для споживачів.

Незважаючи на те, що промисловість (64,8 ГВт) має менший відсоток у порівнянні з комерційним сектором, її роль у розвитку власної генерації електроенергії для виробничих потреб є суттєвою, оскільки це дозволяє знизити залежність від централізованих енергетичних мереж і підвищити стійкість виробничих процесів. Муніципальний сектор (71,5 ГВт) займає значну частину ринку завдяки проектам з розумного вуличного освітлення та іншої інфраструктури, яка активно використовує сонячну енергію для зниження витрат на енергію та підвищення ефективності міських систем.

Попит на сонячні панелі також зростає у таких нових напрямках, як агровольтаїка (12,7 ГВт), що дозволяє комбінувати використання земель для сільськогосподарського виробництва та генерацію сонячної енергії. Транспортний сектор, хоча й з меншими обсягами встановлених потужностей (8,3 ГВт), також поступово інтегрує сонячні технології в інфраструктуру для зарядки електричних транспортних засобів, що є важливим аспектом розвитку зеленої мобільності.

Загалом, зростання попиту на сонячні панелі в усіх секторах економіки свідчить про інтеграцію відновлювальних джерел енергії в повсякденне життя та виробництво. Ці тенденції не тільки сприяють зниженню викидів вуглекислого газу, а й підтримують глобальні зусилля по переходу до сталого енергетичного майбутнього.

Регіональна структура встановлених потужностей сонячної енергетики демонструє значні відмінності у темпах розвитку між країнами та континентами. У табл. 3 подано динаміку нарощування сонячних потужностей у провідних регіонах світу протягом 2020—2023 рр., що дозволяє проаналізувати основні тенденції, визначити лідерів галузі та оцінити зміни в глобальному енергетичному балансі.

У період 2020—2023 рр. світова сонячна енергетика демонструвала стабільне зростання, що відображено в динаміці встановлених потужностей у провідних регіонах світу. Загальний обсяг встановлених потужностей зріс із 685 ГВт у 2020 р. до 1344 ГВт у 2023 р., що становить абсолютне збільшення на 659 ГВт, або майже подвоєння початкових показників.

Лідером за темпами та обсягами нарощування потужностей виступав Китай. Протягом аналізованого періоду встановлені потужності в цій країні зросли з 254 до 500 ГВт, тобто на 246 ГВт. У 2023 р. на Китай припадало 36,8% світових потужностей, що свідчить про його домінування на глобальному ринку сонячної енергетики. Суттєвий приріст встановлених потужностей продемонстрував і ЄС. Частка ЄС у загальній структурі становила 19,1% у 2023 р., що підкреслює активну політику регіону щодо переходу до відновлюваних джерел енергії [7]. США у 2023 р. наросили обсяги потужностей на (+85 ГВт). Частка країни у глобальній структурі встановлених потужностей становила 13,2%, що

Таблиця 2. Структура глобального попиту на сонячні панелі за секторами економіки у 2023 р., %

Сектор	Частка встановлених потужностей, %	Поточні тренди
Житловий сектор	25,0	Інтеграція з системами розумного дому
Комерційна нерухомість	30,0	Енергоефективна модернізація
Промисловість	18,6	Власна генерація для виробництва
Транспорт	2,4	Зарядна інфраструктура
Сільське господарство	3,6	Агровольтаїка
Муніципальний сектор	20,4	Розумне вуличне освітлення

Таблиця 3. Регіональна структура встановлених потужностей сонячної енергетики у 2020—2023 рр.

Регіон	Роки				Зміна (2020-2023), ГВт	Частка країни, 2023 р., %
	2020	2021	2022	2023		
Китай	254	307	392	500	+246	36,8
США	95	120	142	180	+85	13,2
ЄС	110	138	208	260	+150	19,1
Індія	41	55	62	85	+44	6,3
Японія	70	75	80	82	+12	6,1
Інші країни	115	129	173	237	+122	18,5
Всього	685	824	1057	1344	+659	100

Джерело: сформовано на основі [7, 8].

підтверджує провідну роль країни у розвитку сонячної енергетики, незважаючи на певні внутрішні регуляторні обмеження. Індія, незважаючи на відносно невеликі стартові показники, продемонструвала помірне зростання — з 41 до 85 ГВт (+44 ГВт). Японія, на відміну від інших ключових гравців, характеризувалася уповільненим зростанням потужностей: з 70 ГВт у 2020 р. до 82 ГВт у 2023 р. (+12 ГВт). Частка країни в 2023 році становила лише 6,1%, що свідчить про зниження її відносної ваги на світовому ринку [8].

Інші країни, до яких віднесено ті, що не входять до попередньо згаданих регіонів, у сукупності продемонстрували приріст на 122 ГВт — з 115 до 237 ГВт. Їхня частка у світовій структурі у 2023 р. становила 18,5%, що вказує на поступовий розвиток сонячної енергетики. Загалом, зростає частка країн Азії у світовій структурі сонячної енергетики, тоді як темпи зростання в Європі та США залишаються стабільними. Водночас активізується розвиток в інших регіонах, зокрема в Південній Америці, Африці та Південно-Східній Азії, що свідчить про глобалізацію ринку сонячної енергетики. Таким чином, аналіз регіональної структури встановлених потужностей сонячної енергетики свідчить про домінування Китаю, активізацію політик ЄС і США у сфері декарбонізації, а також про поступове залучення до цього процесу інших регіонів світу. Загальне зростання ринку свідчить про стратегічну важливість сонячної енергетики як одного з ключових елементів глобального енергетичного переходу.

Глобальне виробництво сонячних панелей перебуває під впливом технологічних нововведень, які визначають ефективність виробництва та опосередковано чинить тиск на збут продукції. Інтеграція штучного інтелекту у виробництво сонячних панелей створює нові

можливості оптимізації, що підтверджується кількісними показниками. За даними McKinsey & Company, впровадження систем машинного навчання для контролю якості продукції підвищило виявлення дефектів на етапі виробництва на 32,7% та скоротило відсоток браку з 2,8% до 0,6% у 2023 р. Дослідження Deloitte демонструє, що автоматизовані системи управління підвищують ефективність виробничих процесів в середньому на 28,5%, що призвело до зменшення енергоспоживання на одиницю продукції на 15,3% у виробників першої п'ятірки за 2020—2023 рр. За інформацією PwC, предиктивна аналітика знизилася витрати на обслуговування обладнання на 23,6% та зменшила час простоїв на 41,2% на модернізованих виробництвах Jinko Solar та LONGi.

Розвиток технологій переробки відпрацьованих сонячних панелей втворює замкнений цикл виробництва панелей. За даними International Renewable Energy Agency (IRENA), обсяг відпрацьованих сонячних панелей зростає з 1,7 млн тонн у 2023 р. до 60–78 млн тонн до 2050 р. [9]. За 2022—2023 рр. від Veolia Environmental Services показує, що вдосконалення методів вилучення цінних компонентів підвищило економічну ефективність переробки на 37,5%, дозволяючи вилучати до 95% скла та до 85% алюмінію. За даними PV Cycle Association, у 2023 році в ЄС функціонувало 26 спеціалізованих підприємств з переробки сонячних панелей, які обробили 34,6 тис. тонн відходів, що на 43,2% більше, ніж у 2021 р. Впровадження нових технологій знизило витрати на переробку з 250—300 євро/т у 2020 р. до 165—180 євро/т у 2023 р. Автоматизація процесів сортування підвищила якість вторинної сировини на 27,8% [3].

Підвищення ефективності фотоелементів стає ключовим трендом технологічного розвитку. Дані Національної лабораторії відновлюваної енергетики США (NREL) демонструють, що рекордна ефективність монокристалічних панелей зросла з 24,4% у 2019 р. до 26,7% у 2023 р. За статистикою PV Magazine, комерційне впровадження нових напівпровідникових матеріалів розширило можливості перетворення енергії, зокрема ефективність перовскітно-кремнієвих тандемних елементів досягла 29,8% у лабораторних умовах у 2023 р. За даними Energy Trend, багатопарові конструкції підвищили середній коефіцієнт корисної дії комерційних панелей з 19,2% у 2020 р. до 22,5% у 2023 р. За інформацією International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV), оптимізація оптичних характеристик покращила поглинання сонячного випромінювання на 6,8% за період 2021—2023 рр. ITRPV також фіксує, що мініатюризація контактних систем збільшила робочу площу елементів з 79% у 2019 р. до 83,5% у 2023 р. [9].

Впровадження розумних мереж трансформує способи використання сонячних панелей. За інформацією Markets and Markets, глобальний ринок розумних мереж для сонячної енергетики зріс з 8,3 млрд дол США у 2020 р. до 15,7 млрд дол США у 2023 р., демонструючи середньорічний темп зростання 23,7%. Згідно з дослідженням Smart Electric Power Alliance (SEPA), впровадження інтелектуальних систем управління оптимізувало розподіл енергії та знизило пікові навантаження на мережу на 27,3% в регіонах з високим проникненням

сонячної генерації. За даними Navigant Research, технології балансування навантаження в 2023 р. підвищили стабільність енергосистем, інтегрувавши на 34,2% більше змінної сонячної генерації без порушення стабільності мережі порівняно з 2020 р. Дослідження Electric Power Research Institute (EPRI) показало, що розвиток систем прогнозування генерації покращив точність планування споживання на 42,6%, що дозволило скоротити обсяги резервування потужності на 18,7%. За даними International Energy Agency (IEA), інтеграція накопичувачів енергії розширила можливості використання сонячної генерації, збільшивши загальну встановлену потужність систем зберігання енергії з 17 ГВт·год у 2020 р. до 54 ГВт·год у 2023 р. [5].

Розвиток технологій зберігання енергії розширює можливості сонячної генерації. За даними BloombergNEF за 2020 по 2023 рр. глобальний ринок систем накопичення енергії для сонячних електростанцій зріс у 2,25 рази (з 7,9 млрд дол. США до 17,8 млрд дол. США відповідно). Аналіз Wood Mackenzie показує, що вдосконалення акумуляторних систем збільшило середню тривалість ефективного зберігання енергії з 4,2 годин у 2020 р. до 6,8 годин у 2023 р. За даними BloombergNEF, зниження вартості накопичувачів зробило системи доступнішими: середня вартість літій-іонних батарей знизилася з 137 дол. США/кВт·год у 2020 р. до 98 дол. США/кВт·год у 2023 р. (зниження на 28,5%). Згідно з дослідженнями Lux Research, підвищення щільності зберігання енергії у комерційних системах зросло з 265 Вт·год у 2020 р. до 320 Вт·год у 2023 р., що оптимізувало використання простору. Дані International Renewable Energy Agency (IRENA) свідчать, що інтеграція розумних систем управління підвищила ефективність використання накопичувачів, збільшивши кількість циклів заряд-розряд протягом життєвого циклу з 3500 у 2020 р. до 5600 у 2023 р. [10].

Мініатюризація електронних компонентів суттєво оптимізувала конструкцію сонячних систем. За інформацією GTM Research, розробка компактних інверторів знизилася середній об'єм обладнання на 47,3% за період 2019—2023 рр. Результати дослідження Frost & Sullivan свідчать, що інтеграція функцій керування розширила можливості систем, збільшивши функціональність при зменшенні кількості компонентів на 32,5% [11]. За даними IHS Markit, підвищення ефективності перетворення енергії зменшило теплові втрати на 28,7%, що дозволило скоротити розміри систем охолодження на 31,2%. Статистика Allied Market Research свідчить, що вдосконалення систем захисту підвищило надійність обладнання, скоротивши кількість відмов на 42,8% при зменшенні габаритів на 23,5% [2]. За інформацією Power Electronics Industry Association, оптимізація топології схем знизилася кількість компонентів на 18,7% при збільшенні продуктивності на 26,3%.

Сервітизація бізнес-моделей трансформує ринок сонячних панелей. За даними Research and Markets, сегмент "Енергія як послуга" (Energy-as-a-Service) для сонячних технологій зріс з 3,8 млрд дол. США у 2020 р. до 9,3 млрд дол. США у 2023 р., продемонструвавши приріст у 144,7% [2]. Дослідження McKinsey показує, що надання обладнання в оренду знизило початкові інвестиції споживачів у середньому на 73,5%, збільшивши

Таблиця 4. Основні країни-експортери сонячних панелей у 2023, %

Країна	Частка у світовому експорті (%)	Основні ринки збуту
Китай	65,4	ЄС (40%), США (25%), Індія (12%), Японія (8%)
Малайзія та Таїланд	11,6	США (60%), ЄС (20%), Австралія (10%)
В'єтнам	9,2	США (60%), ЄС (25%), Японія (10%)
Південна Корея та Тайвань	6,2	Японія (30%), США (25%), ЄС (20%)
Країни ЄС (переважно Німеччина та Нідерланди)	4,6	ЄС (70%), США (15%), Швейцарія (10%)
Інші країни	3,0	Регіональні ринки

Джерело: сформовано на основі [10—12].

доступність технології для малого та середнього бізнесу на 56,2%. За інформацією Solar Energy Industries Association, впровадження контрактів на обслуговування збільшило довгострокові доходи виробників на 32,8% та підвищило задоволеність клієнтів на 47,2% [6]. Дані GTM Research свідчить, що розвиток енергетичних сервісів розширив спектр послуг, збільшивши частку постачальників із комплексними рішеннями з 12,5% у 2020 р. до 38,7% у 2023 р. За даними Wood Mackenzie, моніторинг продуктивності гарантує ефективність систем, збільшуючи генерацію енергії на 17,3% порівняно з неконтрольованими системами [5].

Кастомізація продукції розширює можливості застосування сонячних панелей. Сегмент кастомізованих сонячних рішень зріс з 4,7 млрд дол. США у 2020 р. до 12,3 млрд дол. США у 2023 р., показавши зростання на 161,7%. Результати дослідження Solar Power Europe свідчать, що розробка спеціальних конструкцій для різних секторів збільшила проникнення сонячних технологій у промисловому секторі на 42,3% та в транспортному на 78,6% за період 2020—2023 рр. Гнучкі виробничі лінії, впроваджені провідними виробниками, зменшили час переналаштування випуску з 72 годин у 2020 р. до 18 годин у 2023 р., збільшивши різноманітність продукції на 65,8%. За інформацією Wood Mackenzie, адаптація технічних характеристик під специфічні умови експлуатації підвищила продуктивність панелей у екстремальних кліматичних зонах на 23,7% порівняно зі стандартними рішеннями [5]. Аналіз проєктів від BIPV Europe показує, що індивідуальний дизайн підвищив частку інтегрованих у будівлі сонячних рішень з 3,2% у 2020 р. до 7,8% у 2023 р.

Глобальна торгівля сонячними панелями у 2023 р. оцінювалась у 130 млрд дол. США та характеризувалася значною географічною концентрацією експорту та імпорту (табл. 4).

Китай залишається беззаперечним лідером на світовому ринку сонячних панелей. Концентрація виробництва у КНР є результатом стратегічних інвестицій уряду в сонячну енергетику, масштабу виробництва та вертикальної інтеграції виробничих процесів, що дозволяє китайським компаніям пропонувати ціни на 25–30% нижчі порівняно з європейськими та американськими конкурентами [13]. Китайські компанії домінують у всіх сегментах виробничого ланцюга — від виробництва полікремнію до готових фотоелектричних модулів. За да-

Таблиця 5. Основні країни-імпортери сонячних панелей у 2023 р., %

Країна/Регіон	Частка країни у світовому імпорті (%)	Основні країни-імпортери
ЄС	34,7	Китай (75%), В'єтнам (10%), Малайзія (5%)
США	19,3	В'єтнам (35%), Малайзія (25%), Таїланд (15%), Китай (10%)
Індія	9,2	Китай (85%), Малайзія (5%), Сінгапур (5%)
Японія	7,7	Китай (60%), Південна Корея (15%), Малайзія (10%)
Австралія	6,1	Китай (70%), В'єтнам (15%), Малайзія (5%)
Бразилія	5,4	Китай (80%), В'єтнам (10%), Малайзія (5%)
Мексика	4,6	Китай (65%), США (20%), В'єтнам (10%)
ОАЕ та Саудівська Аравія	3,8	Китай (75%), Індія (10%), ЄС (5%)
Інші країни	9,2	Переважно Китай

Джерело: сформовано на основі [10, 13, 16].

ними митної служби КНР у 2023 р. експорт сонячних панелей та комплектуючих з Китаю зріс на третину порівняно з попереднім роком. Основними конкурентними перевагами китайських виробників є масштаб виробництва, вертикально інтегровані виробничі ланцюжки, значна державна підтримка та доступ до дешевої робочої сили й енергії.

В'єтнам посідає третє місце серед світових експортерів з обсягом експорту близько 12 млрд дол. США у 2023 р., що значною мірою пов'язано з переміщенням частини виробничих потужностей з Китаю через торговельні суперечки між КНР та західними країнами. Малайзія та Таїланд також суттєво збільшили свою частку у світовому експорті сонячних панелей із сукупним експортом близько 15 млрд дол. США. Південна Корея та Тайвань спеціалізуються на експорті високотехнологічних компонентів для сонячних панелей, зокрема кремнієвих пластин найвищої якості та інверторів, із сукупною часткою у світовому експорті близько 7%. Європейські виробники, особливо з Німеччини та Нідерландів, зберігають невелику, але стабільну частку у світовому експорті (4,6%), переважно у сегменті високо-технологічних спеціалізованих сонячних панелей та комплектуючих преміум-класу [12].

ЄС залишається найбільшим імпортером сонячних панелей у світі (табл. 5). За даними Евростату у 2023 р. основними імпортерами були Німеччина, Нідерланди,

Іспанія та Італія. США імпортували сонячні панелі на суму близько 25 млрд дол. США. Незважаючи на впровадження тарифів на китайські сонячні панелі, американський ринок продовжує значною мірою залежати від імпорту [17].

Індія демонструє найбільш динамічне зростання імпорту сонячних панелей серед великих економік, що відображає амбітні плани країни щодо розвитку сонячної енергетики. Японія та Австралія також входять до п'ятірки найбільших імпортерів сонячних панелей з сукупною часткою 13,8% світового імпорту. Бразилія, Мексика, Чилі, ОАЕ та Саудівська Аравія демонструють найвищі темпи зростання імпорту сонячних панелей, що вказує на розширення географії генерації сонячної енергії.

Аналіз торговельних потоків сонячних панелей демонструє складну систему взаємозалежностей між країнами-експортерами та імпортерами. Китай експортує сонячні панелі до всіх основних ринків, але особливо активно до країн ЄС (близько 40% експорту), США (25%), Індії (12%) та Японії (8%). В'єтнам, Малайзія та Таїланд, як альтернативні джерела імпорту, особливо важливі для США через наявність торговельних обмежень щодо китайської продукції. Близько 60% експорту з цих країн спрямовується саме на американський ринок.

ЄС, незважаючи на значні зусилля щодо розвитку власного виробництва, залишається критично залежним від імпорту: 75% встановлених сонячних панелей, імпортуються з Китаю (безпосередньо або через треті країни). Індія намагається збалансувати імпорт та розвиток власного виробництва через впровадження схем стимулювання локалізації, однак на даний момент близько 85% встановлених в країні сонячних панелей імпортовано з Китаю.

Японія та Південна Корея демонструють найбільш диверсифіковану структуру імпорту серед великих споживачів: близько 60% від китайських виробників, 25% з інших азійських країн та 15% з європейських та американських виробників преміум-сегменту. США, незважаючи на торговельні обмеження щодо китайських виробників, продовжують імпортувати значну частку панелей китайського походження через треті країни (переважно В'єтнам, Малайзію та Таїланд), що стало предметом торговельних розслідувань.

Технологічні інновації також відіграють важливу роль у формуванні торговельних потоків. Китайські виробники домінують у сегменті полікристалічних та монокристалічних панелей стандартної ефективності, тоді як високоефективні панелі (з ефективністю понад 22%) та спеціалізовані продукти (гнучкі панелі, будівельно-інтегровані рішення) залишаються нішею для виробників з Південної Кореї, Тайваню, Японії та ЄС [15].

Витрати на логістику суттєво впливають на глобальну торгівлю: транспортні витрати складали 5-15% від кінцевої вартості та залежать від відстані поставок. Це створює певні переваги для регіональних виробників, особливо в умовах підвищених логістичних витрат після пандемії COVID-19.

Світовий імпорт більш диверсифікований але на ЄС та США сумарно приходилося 54% імпорту. Попит на світовому ринку також формували Індія, Японія та Ав-

стралія. Географія імпорту постійно розширюється в міру того, як все більше країн, що розвиваються, впроваджують програми з розвитку сонячної енергетики.

Геополітичні фактори та прагнення до енергетичної незалежності стимулюють багато країн розвивати власне виробництво сонячних панелей, що поступово трансформують структуру глобальної торгівлі. Незважаючи на ці зусилля, глобальний характер виробничих ланцюгів та економія на масштабі, що досягається центрами масового виробництва, зберігають критичну роль міжнародної торгівлі у забезпеченні зростаючого попиту на сонячні панелі.

Цифровізація збуту трансформуює взаємодію з клієнтами через онлайн-платформи, віртуальні конфігуратори та системи моніторингу, що забезпечують ефективне управління та обслуговування. Від простого продажу сонячних панелей, розробки комплексних рішень та сервісних контрактів на світовому ринку формується нова збутова модель торгівлі, в якій енергія розглядається як послуга, покупці напряму здійснюють покупки та роблять їх на цифрових платформах.

На національному рівні країни застосовують різноманітні інструменти регулювання виробництва та імпорту сонячних панелей. На світовому ринку сонячних панелей США, ЄС, Індія застосовують антидемпінгові мита до китайських виробників. Ці заходи призвели до часткової реконфігурації глобальних ланцюгів постачання з розширенням виробництва у В'єтнамі, Малайзії та Таїланді, які стали важливими альтернативними експортерами.

США використовують систему тарифів Section 201 та Section 301, які накладають додаткові мита на імпортовані сонячні панелі (особливо з Китаю) у розмірі до 250%. Паралельно діє Закон про зниження інфляції (IRA), який надає податкові пільги виробникам та проектам з високим рівнем локалізації виробництва [18].

ЄС запровадив комплексну стратегію Solar Energy Strategy, що включає не лише торговельні бар'єри (антидемпінгові мита до 75% на китайські панелі), але й механізми субсидування європейських виробників у рамках програми REPowerEU та European Solar Manufacturing Accelerator. Також ЄС розробив систему екологічної сертифікації сонячних панелей, яка враховує вуглецевий слід при їх виробництві.

Китай, як ключовий експортер, реалізує програму "Один пояс — один шлях", яка передбачає державне субсидування експорту сонячних технологій до країн, що розвиваються. Усередині країни діє система квот на виробництво та програми розвитку інноваційних технологій, спрямовані на збереження технологічного лідерства.

Індія впровадила схему виробничого стимулювання (PLI), яка передбачає фінансові стимули для локальних виробників, а також захисні мита до 40% на імпортні сонячні панелі. Країна активно розвиває власне виробництво в рамках програми "Make in India" [19].

На міжнародному рівні СОТ виступає арбітром у численних торговельних суперечках між країнами щодо сонячних панелей. За останнє десятиліття СОТ розглянула понад 15 справ, пов'язаних з торгівлею сонячними технологіями, найбільш гучними з яких були позови США та ЄС проти китайських субсидій та демпінгу.

Важливу роль у формуванні глобального регулювання відіграють також екологічні угоди, зокрема Паризька кліматична угода та програма ООН з досягнення Цілей сталого розвитку. Вони стимулюють гармонізацію технічних стандартів та розвиток міжнародної сертифікації сонячних панелей.

Зростаючий тренд на регулювання екологічних аспектів виробництва сонячних панелей знайшов відображення у міжнародних системах сертифікації (NSF/ANSI 457, IEC 61730) та ініціативах щодо циркулярної економіки. ЄС першим запровадив вимоги щодо екодизайну та утилізації сонячних панелей, які поступово стають міжнародним стандартом.

Глобальне регулювання торгівлі сонячними панелями залишається фрагментованим та часто політизованим, що створює значні виклики для збалансованого розвитку галузі. Відсутність гармонізованого підходу призводить до додаткових витрат, пов'язаних з адаптацією до різних регуляторних вимог, та обмежує потенціал зниження вартості сонячної енергії.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У результаті проведеного дослідження встановлено, що глобальний ринок сонячних панелей перебуває на етапі структурної трансформації. Після періоду стрімкого зростання індустрія переходить у фазу стабілізації із середньорічними темпами встановлення нових потужностей близько 350 ГВт до 2032 р. Китай залишається провідним виробником сонячних модулів, контролюючи понад 80% потужностей та 65,4% світового експорту. Водночас ринок стикається з викликами надлишкових виробничих потужностей, цінового тиску та необхідності модернізації інфраструктури.

Регіональний аналіз показав активне зростання в ЄС, США, Індії та інших країнах, хоча темпи встановлення нових потужностей у цих регіонах поступово сповільнюються. Спостерігається зміна характеру попиту: сонячна енергетика дедалі глибше інтегрується в житловий, комерційний, промисловий та муніципальний сектори економіки. Водночас розвиток технологічних інновацій — зростання ефективності фотоелементів, впровадження штучного інтелекту у виробничі процеси, удосконалення систем накопичення енергії — залишається ключовим чинником підвищення конкурентоспроможності галузі.

Глобальні торговельні потоки сонячних панелей характеризуються високим рівнем концентрації експорту в Китаї та диверсифікацією імпорту у розвинених країнах. Впровадження тарифних і нетарифних обмежень, а також ініціатив з локалізації виробництва змінює конфігурацію глобальних ланцюгів постачання. Однак повна незалежність від домінуючих виробників залишається складною задачею через масштаби їхньої виробничої бази та економію на масштабі.

Таким чином, розвиток світового ринку сонячних панелей у найближчі роки визначатиметься балансом між необхідністю підвищення ефективності виробництва, зміцненням енергетичної безпеки країн-імпортерів та глобальними екологічними викликами. Особливе значення набувають заходи з розвитку циркулярної економіки у сфері утилізації відпрацьованих сонячних па-

нелей, удосконалення технічних стандартів і стимулювання інноваційних технологій.

Література:

1. Денисюк С. П., Бєлоха Г. С., Чернєшук І. С., Лисий В. В. Світові тенденції впровадження відновлюваних джерел енергії та особливості їх реалізації при відновленні економіки України. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2022. №4. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2022.273360>
2. Бородіна О. Базові тренди повоєнної трансформації економіки України: бюджетна децентралізація, індустрія 4.0, регіональний енергоменеджмент. Journal of Innovations and Sustainability, 2022. Т. 6. № 1. С. 1—23.
3. Очкуренко С. В. Еколого-економічне дослідження трендів розвитку відновлювальної енергетики: магист. дис. Сумський державний університет, 2021. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/87227>.
4. Климчук О. В. Управлінські аспекти формування економіко-енергетичної безпеки України на засадах розвитку біоенергетики: монографія. Вінниця: Нілан-ЛТД, 2021. 576с.
5. WoodMac predicts strong yet flat global PV growth through to 2032. URL: <https://www.pv-magazine.com/2024/01/24/woodmac-predicts-strong-yet-flat-global-pv-growth-through-to-2032/> (дата звернення: 20.04.2025).
6. Renewable Capacity Highlights 2024. IRENA. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2024.pdf (дата звернення: 17.04.2025).
7. Snapshot of global PV market 2024. URL: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/04/Snapshot-of-Global-PV-Markets-1.pdf> (дата звернення: 18.04.2025).
8. Global Energy Review 2025. International Energy Agency (IEA). URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025> (дата звернення: 20.04.2025).
9. Управління життєвим циклом сонячних панелей: виклики та рішення. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf (дата звернення: 28.04.2025).
10. Renewable capacity statistics 2024. International Renewable Energy Agency (IRENA). URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2024.pdf (дата звернення: 26.04.2025).
11. Solar Micro Inverter Market Set for Explosive Growth by 2034. URL: <https://www.globenews-wire.com/news-release/2025/01/15/3010233/0/en/Solar-Micro-Inverter-Market-Set-for-Explosive-Growth-to-19-1-Billion-by-2034-Shaping-the-Future-of-Clean-Energy-says-TMR.html> (дата звернення: 24.04.2025).
12. International Energy Agency. Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028. URL: https://iea.blob-core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables_2023.pdf (дата звернення: 28.04.2025).
13. Solar export from China increased by a third. Chinese Customs, 2023. URL: <https://ember-energy.org/>

app/uploads/2023/09/Report_-Solar-exports-from-China-increase-by-a-third.pdf (дата звернення: 24.04.2025).

14. Trade policy review: China (2024). URL: https://www.wto.org/english/tratop_e/tpr_e/tp558_crc_e.htm (дата звернення: 28.04.2025).

15. World trade statistical review 2023. WTO. URL: https://www.wto.org/english/res_e/publications_e/wtsr_2023_e.htm (дата звернення: 28.04.2025).

16. US solar panel imports near record levels as trade probe proceeds, 2024. URL: <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/articles/2024/6/us-solar-panel-imports-near-record-levels-as-trade-probe-proceeds-81835205> (дата звернення: 19.04.2025).

17. Звіт про реалізацію стратегії розвитку сонячної енергетики в ЄС. European Commission, 2024. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/uk/ip_24_4581?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAR0jkGO_YWZppCKESu-toYjbP9jJ4Rbzxo-1rcOISaauH_nurxVfCYDTC44_aem_efy4NRdAEz2sR9nXxzY2Dw (дата звернення: 27.04.2025).

18. United States International Trade Commission. Economic Impact of Section 201 Solar Panel Tariffs, 2022. URL: <https://www.usitc.gov/publications/other/pub5266.pdf> (дата звернення: 21.04.2025).

19. Brief on Off-grid Solar PV Programme. India Ministry of New and Renewable Energy, 2024. URL: <https://mnre.gov.in/en/solar-off-grid/> (дата звернення: 28.04.2025).

References:

1. Denysiuk, S. P., Bielokha, H.S., Cherneschnik, I.S. and Lysyj, V.V. (2022), "Global trends in implementation of renewable energy sources and features of their implementation during the recovery of Ukraine's economy", *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, vol. 4. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2022.273360>

2. Borodina, O. (2022), "Basic trends of postwar transformation of Ukraine's economy: industry 4.0, budgetary decentralization, regional energy management", *Journal of Innovations and Sustainability*, vol. 6, no. 1, pp. 1—23.

3. Ochkurenko, S. V. (2021), "Environmental and economic research into renewable energy development trends", available at: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/87227> (Accessed 20.04.2025).

4. Klymchuk, O. V. (2021), *Upravlins'ki aspekty formuvannia ekonomiko-enerhetychnoi bezpeky Ukrainy na zasadakh rozvytku bioenerhetyky* [Management aspects of the formation of economic and energy security of Ukraine based on the development of bioenergy], Nilan-LTD, Vinnytsia, Ukraine.

5. Jowett, P. (2024), "WoodMac predicts strong yet flat global PV growth through to 2032", available at: <https://www.pv-magazine.com/2024/01/24/woodmac-predicts-strong-yet-flat-global-pv-growth-through-to-2032/> (Accessed 20.04.2025).

6. IRENA (2024), "Renewable Capacity Highlights", available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2024.pdf (Accessed 17.04.2025).

7. International Energy Agency (2024), "Snapshot of global PV market", available at: <https://www.iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/04/Snapshot-of-Global-PV-Markets-1.pdf> (Accessed 18.04.2025).

8. International Energy Agency (IEA) (2025), "Global Energy Review", available at: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025> (Accessed 20.04.2025).

9. IRENA (2016), "Solar Panel Lifecycle Management: Challenges and Solutions", available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf (Accessed 28.04.2025).

10. International Renewable Energy Agency (IRENA) (2024), "Renewable capacity statistics", available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2024.pdf (Accessed 26.04.2025).

11. Transparency Market Research (2025), "Solar Micro Inverter Market Set for Explosive Growth by 2034", available at: <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/01/15/3010233/0/en/Solar-Micro-Inverter-Market-Set-for-Explosive-Growth-to-19-1-Billion-by-2034-Shaping-the-Future-of-Clean-Energy-says-TMR.html> (Accessed 24.04.2025).

12. International Energy Agency (2023), "Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028", available at: https://www.iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables_2023.pdf (Accessed 28.04.2025).

13. Hawkins, S. (2023), "Solar export from China increased by a third. Chinese Customs", available at: https://www.ember-energy.org/app/uploads/2023/09/Report_-Solar-exports-from-China-increase-by-a-third.pdf (Accessed 24.04.2025).

14. WTO (2024), "Trade policy review: China", available at: https://www.wto.org/english/tratop_e/tpr_e/tp558_crc_e.htm (Accessed 28.04.2025).

15. WTO (2023), "World trade statistical review", available at: https://www.wto.org/english/res_e/publications_e/wtsr_2023_e.htm (Accessed 28.04.2025).

16. Hering, G. and Dlin, S. (2024), "US solar panel imports near record levels as trade probe proceeds", available at: <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/articles/2024/6/us-solar-panel-imports-near-record-levels-as-trade-probe-proceeds-81835205> (Accessed 19.04.2025).

17. European Commission (2024), "Report on the implementation of the EU solar energy development strategy", available at: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/uk/ip_24_4581?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAR0jkGO_YWZppCKESu-toYjbP9jJ4Rbzxo-1rcOISaauH_nurxVfCYDTC44_aem_efy4NRdAEz2sR9nXxzY2Dw (Accessed 27.04.2025).

18. United States International Trade Commission (2022), "Economic Impact of Section 201 Solar Panel Tariffs", available at: <https://www.usitc.gov/publications/other/pub5266.pdf> (Accessed 21.04.2025).

19. India Ministry of New and Renewable Energy (2024), "Brief on Off-grid Solar PV Programme", available at: <https://mnre.gov.in/en/solar-off-grid/> (Accessed 28.04.2025).

Стаття надійшла до редакції 08.05.2025 р.