

УДК 339.9

DOI: <https://doi.org/10.30838/EP.196.187-192>

Корогод А.Я.  
Державний торговельно-економічний університет  
Korohod Alona  
State University of Trade and Economics  
<https://orcid.org/0000-0003-3566-8038>

## СЦЕНАРІЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ГЛОБАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ ДО 2050 РОКУ

У статті представлено підхід до моделювання сценаріїв трансформації глобальної енергетичної системи, який враховує історичну тенденцію недооцінки темпів зростання відновлюваної енергетики. Запропонований підхід до моделювання енергетичних сценаріїв базується на корегуванні базових прогнозів Світового енергетичного огляду (WEO) 2024 року з використанням комплексу динамічних факторів та додаткових параметрів. Окрім того, проаналізовано роль імовірності технологічного прориву та індексу жорсткості політики в коригуванні базових прогнозів. Розроблений підхід дозволяє формувати реалістичні, оптимістичні та песимістичні сценарії розвитку на основі відкритих даних. Практична цінність методики полягає у вдосконаленні інструментів планування енергетичної політики та довгострокового прогнозування з урахуванням складних динамічних чинників глобальних енергетичних процесів.

**Ключові слова:** енергетична система, відновлювані джерела енергії (ВДЕ), технологічний прорив, енергетична політика, сталий розвиток, декарбонізація.

## SCENARIOS OF TRANSFORMATION OF THE GLOBAL ENERGY SYSTEM UNTIL 2050

This article introduces an innovative methodology for modeling energy transition scenarios, addressing the historical bias of underestimating renewable energy growth rates. Traditional energy forecasting often fails to capture the rapid pace of technological advancements, the dynamic nature of policy evolution, and the transformative potential of market disruptions. To overcome these limitations, the study proposes a comprehensive approach integrating dynamic adjustment factors, technological breakthrough probabilities, and a policy stringency index. This methodology ensures that scenario modeling is not only grounded in historical data but also adaptable to the rapidly evolving energy landscape. A key feature of the research is the development of a Python-based script that operationalizes the proposed framework. This tool allows for the generation of flexible and detailed energy scenarios, which account for variables such as accelerated adoption of renewable energy technologies, advancements in storage solutions, and changes in policy priorities. Using the World Energy Outlook 2024 dataset as a foundation, the study applies rigorous data analysis and scenario modeling techniques to highlight the potential for diverse energy futures. The results underscore the importance of integrating dynamic elements into energy transition modeling. Findings reveal that accelerated renewable energy adoption, coupled with technological innovations and adaptive policy measures, can lead to significant variations in energy system trajectories. This highlights the inadequacy of static models that fail to consider the complex interplay of innovation, policy shifts, and market dynamics. The practical implications of this research are substantial. Policymakers, energy strategists, and investors can leverage the findings to enhance decision-making processes and align long-term energy planning with realistic, adaptable, and scientifically robust scenarios. By offering a more accurate representation of potential energy futures, the study provides a valuable tool for fostering sustainable energy transitions and addressing global challenges such as climate change and energy security.

**Keywords:** energy system, renewable energy sources (RES), technological breakthrough, energy policy, sustainable development, decarbonization.

**JEL Classification:** Q42, Q48, F01, F20, F42

**Постановка проблеми.** Глобальна енергетична система стоїть на порозі безпрецедентних змін, зумовлених необхідністю боротьби зі зміною клімату, забезпечення енергетичної безпеки та доступу до енергії. Прогнозування майбутнього сталого розвитку енергетичного сектору є критично важливим для прийняття

обґрунтованих рішень у сфері енергетичної політики та інвестицій. В контексті прогнозування трансформацій глобальної енергетичної системи важливо враховувати історичну недооцінку розвитку відновлюваних джерел енергії. Так, прогнози МЕА 2002 року щодо вітрової енергетики на 2030 рік були перевищені вже в

2010 році [1]. Також у 2010 році МЕА прогнозувало, що до 2024 року буде встановлено 180 ГВт сонячних фотоелектричних потужностей. Цей показник був досягнутий вже в січні 2015 року [2]. І це не єдині приклади. Причина може ховатись у тому, що такі організації, як МЕА, схильні до консервативних оцінок, що може призводити до недооцінки тенденцій, які швидко розвиваються. Невирішеною частиною загальної проблеми є інтеграція динамічних змін, пов'язаних із технологічним проривом та політичною жорсткістю, безпосередньо в кількісну модель. Запропонований підхід у цій статті заповнює цю прогалину шляхом поєднання базових сценаріїв із мультиплікаторами для відновлюваної та викопної енергетики, а також показниками ймовірності технологічного прориву та індексу політичної жорсткості.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Світовий енергетичний прогноз (World Energy Outlook, WEO) Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) є одним з найвпливовіших джерел аналізу та прогнозування у сфері енергетики. Однак, як і будь-який прогноз, він має свої обмеження та потребує критичного осмислення.

В свою чергу Ю. Фенг та Т. Джао справедливо підкреслюють важливість врахування нелінійної динаміки, зокрема технологічних змін в енергетичному секторі [3]. Це особливо актуально в контексті швидкого розвитку технологій відновлюваної енергетики та зберігання енергії.

Нелінійні зміни можуть призвести до раптових проривів у ефективності технологій, швидкого зниження вартості виробництва, несподіваних змін у структурі енергетичного ринку. Наприклад, М. В. Халед підкреслює [4], що на перехід до відновлюваної енергії та її розподіл дедалі більше впливають цифрові платформи, які революціонізують виробництво, споживання та управління енергією. Віртуальні електростанції, громадські енергетичні проекти та однорангові торгові платформи є прикладами цього переходу, дозволяючи окремим особам і громадам брати активну участь у виробництві та розподілі відновлюваної енергії. Ці платформи демократизують виробництво енергії та сприяють інноваціям у сховищах, електромобільності та інвестиціях у проекти відновлюваної енергетики.

Р. Фріман наголошує на необхідності включення соціально-політичних факторів у моделювання енергетичних систем. Це критично важливо, оскільки енергетичний перехід не є суто технічним процесом, а залежить від багатьох соціальних, економічних та політичних чинників [5]. Важливо також враховувати вплив глобальних подій на енергетичний сектор. Наприклад, російська війна проти України призвела до значних змін у глобальному енергетичному ландшафті, викликавши енергетичну та фінансову кризу та змінивши траєкторію розвитку відновлюваної енергетики [6].

Загалом, дослідники продовжують пошук шляхів до підвищення точності прогнозів та працюють над новими підходами. Незважаючи на значний прогрес у цій

галузі, існуючі моделі все ще мають обмеження щодо врахування динамічної взаємодії між технологічними інноваціями, політичними змінами та ринковими силами. Незважаючи на численні зусилля щодо вдосконалення прогнозів, проблема інтеграції нелінійних змін та їхнього впливу на довгострокові сценарії залишається невирішеною і потребує більш детального дослідження.

**Мета статті полягає в** розробленні та апробації підходу до формування більш гнучких сценаріїв сталого розвитку глобальної енергетичної системи з урахуванням історичного недооцінювання відновлюваних джерел енергії, а також впливу технологічного прогресу та політичних чинників на темпи змін.

**Виклад основних результатів дослідження.** Запропонований підхід базується на корегуванні базових сценаріїв Світового енергетичного огляду (WEO) 2024 року з використанням Python-скрипта, який вводить наступні ключові елементи:

- **Динамічні фактори корегування.** Ці фактори варіюються залежно від сценарію та типу енергетичного продукту, з вищими коефіцієнтами для відновлюваних джерел енергії та нижчими для викопного палива.
- **Ймовірність технологічного прориву.** Цей фактор зростає з часом, представляючи збільшення ймовірності появи революційних інновацій.
- **Індекс жорсткості політики.** Відображає еволюцію політичного ландшафту з різними базовими рівнями для кожного сценарію та поступовим збільшенням з часом.
- **Скориговані значення.** Кінцеві значення коригуються на основі як технологічних проривів, так і політичних змін.

Розглянемо декілька прикладів технологічних проривів, про які йдеться. Приміром, розробка літій-іонних акумуляторів у 1980-х роках та їх подальше вдосконалення призвели до революції в портативній електроніці та електромобілях. Це також відкрило нові можливості для зберігання енергії в електромережах. За оцінками експертів, вартість акумуляторів для електромобілів знизилася на 85-90% за останнє десятиліття [7]. Крім того, вдосконалення характеристик акумуляторів позитивно вплинуло на розвиток систем накопичення енергії для відновлюваних джерел. Більш ефективні та доступні акумулятори дозволяють краще інтегрувати сонячну та вітрову енергетику в електромережі, забезпечуючи стабільне енергопостачання навіть при змінній генерації [8].

За останні десятиліття зазнала значного розвитку і технологія сонячних фотоелектричних панелей, що призвело до різкого зниження вартості сонячної енергії та сприяло її широкому впровадженню. У понад 30 країнах світу сонячна енергія стала дешевшою за електроенергію з викопних джерел, а щорічний приріст встановлених потужностей сонячної енергетики становить 40-50% [9]. При цьому розвиток технології

продовжується, зокрема розробка нових матеріалів для підвищення ефективності та зниження вартості панелей [10], пошук механізмів масової інтеграції сонячних панелей у міську інфраструктуру та транспортні засоби.

World Energy Outlook 2024 від Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) представляє три основні сценарії сталого розвитку світової енергетики до 2050 року: Сценарій заявлених політик (Stated Policies Scenario - STEPS), Сценарій оголошених зобов'язань (Announced Pledges Scenario - APS) та Сценарій чистих нульових викидів до 2050 року (Net Zero Emissions by 2050 - NZE).

Сценарій заявлених політик відображає поточний напрямок розвитку енергетичного сектору на основі існуючих політик та заявлених цілей країн. Прогнозується пік викидів CO<sub>2</sub> до 2025 року, але після цього значного зниження не очікується. Сценарій оголошених зобов'язань розглядає ситуацію, якщо всі заявлені національні цілі з енергетики та клімату, включаючи цілі щодо досягнення нульових викидів, будуть виконані повністю та вчасно. Сценарій чистих нульових викидів до 2050 року окреслює шлях до досягнення нульових чистих викидів до середини століття, обмежуючи глобальне потепління до 1,5°C (табл.1).

Таблиця 1

Прогнозований світовий енергетичний мікс за сценаріями Міжнародного енергетичного агентства у 2030 та 2050 роках, %

Джерело	Частка джерел енергії в системі світового постачання, %								
	STEPS			APS			NZE		
	2023	2030	2050	2023	2030	2050	2023	2030	2050
Нафта	30	29	24	30	28	16	30	26	7
Вугілля	27	23	13	27	22	6	27	17	3
Сонце	1	4	12	1	5	19	1	6	26
Вітер	1	3	6	1	3	10	1	4	15
Гідро	2	3	3	2	3	4	2	3	5
Біопаливо	7	7	10	7	10	15	7	12	17
Ядерна енергія	5	5	7	5	6	11	5	7	14
Природний газ	23	23	21	23	22	14	23	21	5

Джерело: World Energy Outlook 2024 [11]

Для кожного сценарію обрано стартові коефіцієнти, що відбивають посилені/прискорені (або навпаки) темпи змін порівняно з первинними даними. Історичні дані свідчать, що ВДЕ часто зростають швидше від прогнозованих показників. Тому для цих категорій застосовується додатковий множник 1,5, а для інших джерел – 1,0. З урахуванням глобальної тенденції до декарбонізації, для викопних видів палива запроваджується коригувальний чинник 0,9, що означає додатковий спад відносно вихідних даних. Для інших типів енергоносіїв цей коефіцієнт дорівнює 1,0.

Наступним кроком є додавання показника «Ймовірність технологічного прориву», який зростає на 2%

Щороку, але не перевищує 50%. Це відображає імовірність суттєвого технологічного стрибка, що уможливує швидше проникнення нових технологій у структуру енергоспоживання.

Додатково введено «Індекс жорсткості політики», який базується на початкових значеннях для кожного сценарію і щорічно зростає на 1%, але не перевищує 1,0. Цей індекс характеризує позапланове посилення регуляторних заходів держав та міжнародних організацій, спрямованих на підтримку чистої енергії. Залежно від отриманих значень, кінцевий скоригований показник для кожного спостереження в сценарії розраховується за формулою:

Скоригований показник = Попередній показник \* (1 + «Ймовірність технологічного прориву») \* «Індекс жорсткості політики»).

Це дає змогу врахувати одночасно технологічні можливості та політичну волю до змін, що впливають на фактичні обсяги та темпи розвитку кожного ресурсу. Отримані сценарії були розподілені на три напрями за ймовірним варіантом розвитку: реалістичний, оптимістичний та песимістичний. Порівняння з офіційними прогнозами МЕА засвідчило підвищену чутливість

розробленої моделі до динаміки відновлюваних джерел та впровадження нових технологій. Наприклад, у оптимістичному сценарії для сонячної енергетики в 2040 році темпи зростання були майже вдвічі вищими за базові оцінки, тоді як для вугілля спостерігалось значне зниження (рис. 1-3).

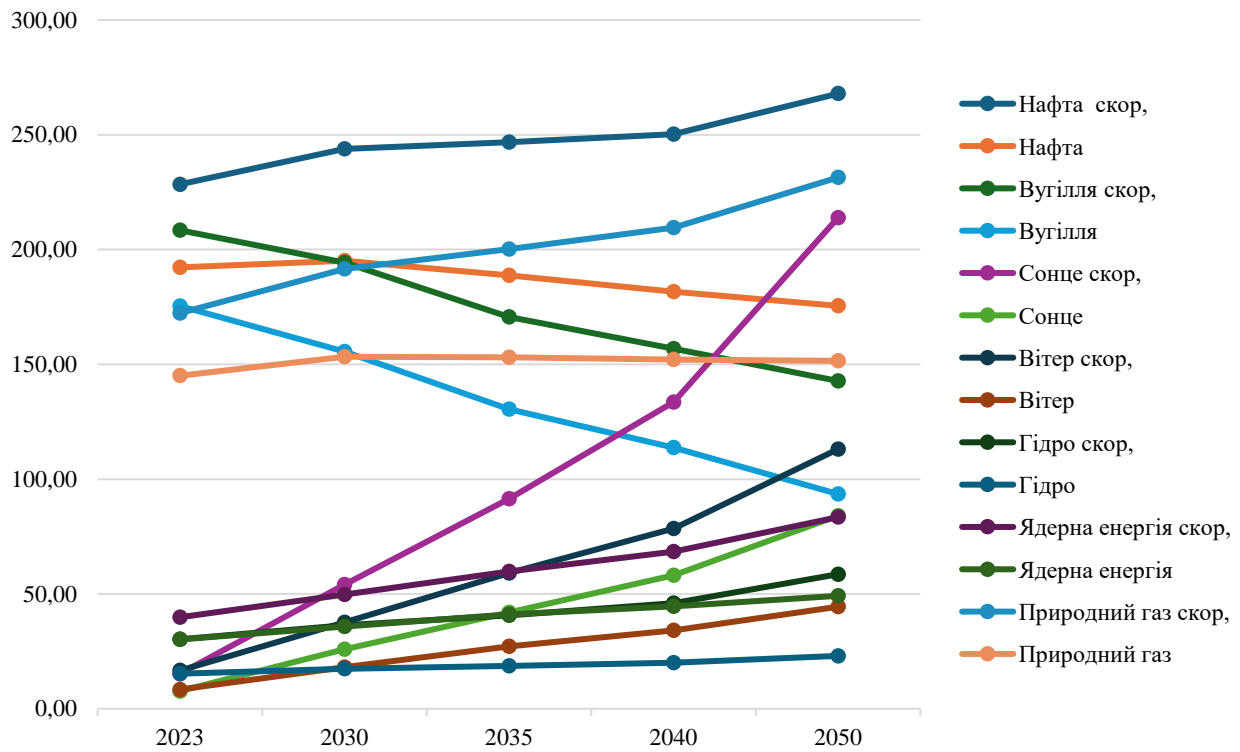


Рис 1. Порівняння базових та скоригованих показників за Сценарієм заявлених політик (оптимістичний варіант), ЕЈ, 2023-2050 рр.  
Джерело: власні розрахунки автора на основі [11]

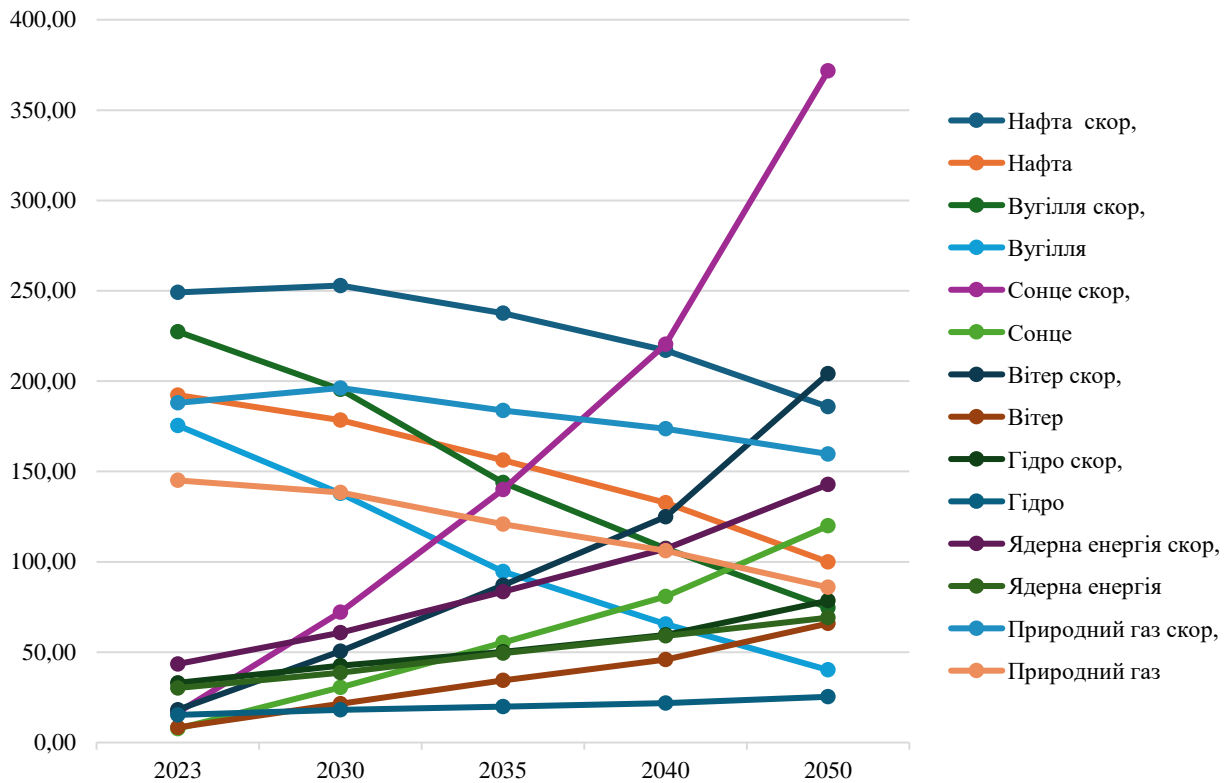


Рис 2. Порівняння базових та скоригованих показників за Сценарієм оголошених зобов'язань (оптимістичний варіант), ЕЈ, 2023-2050 рр.  
Джерело: власні розрахунки автора на основі [11]

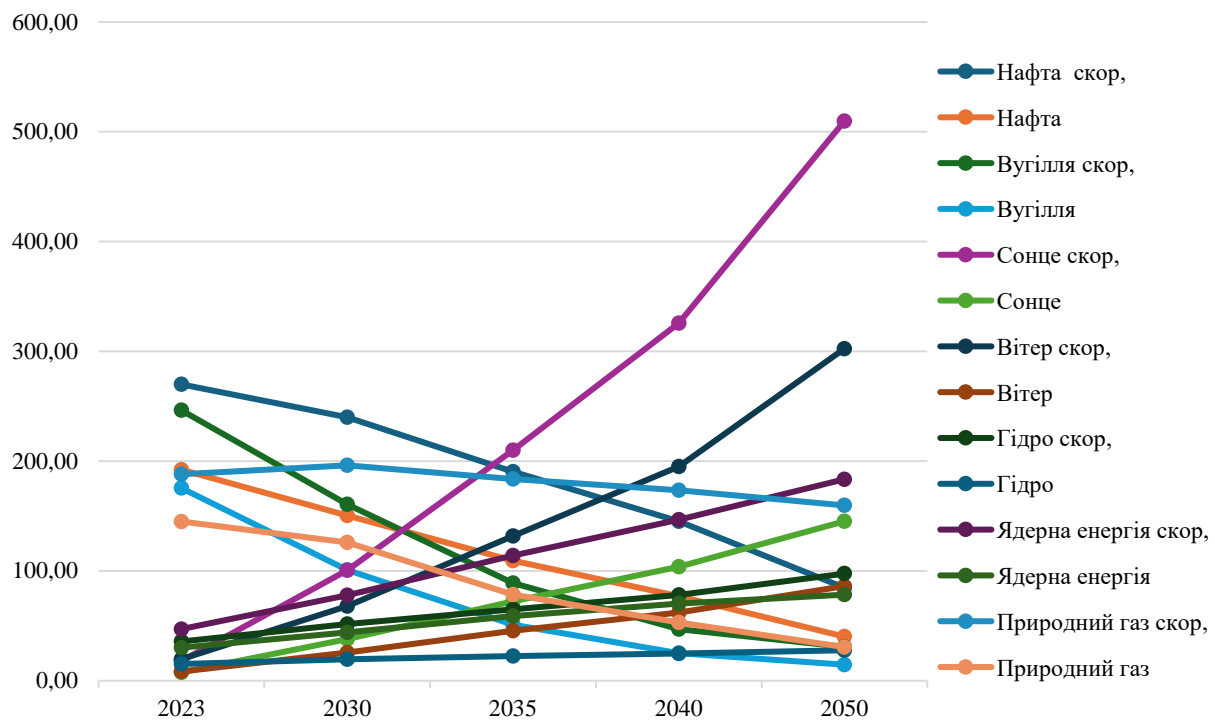


Рис 3. Порівняння базових та скоригованих показників за Сценарієм чистих нульових відходів до 2050 року (оптимістичний варіант), EJ, 2023-2050 рр.  
Джерело: власні розрахунки автора на основі [11]

Загалом ця тенденція закладена в усі оптимістичні сценарії. Найбільш радикальні зміни показує Сценарій чистих нульових відходів до 2050 року, оскільки в його базові показники також закладена максимальна переорієнтація на відновлювані джерела енергії. Характерною особливістю цього сценарію є також зростання частки ядерної енергії. Оптимістичний варіант передбачає настання технологічного прориву, що стимулюватиме перехід на відновлювані джерела енергії. Це може бути поява нових акумуляторів з високою щільністю енергії та тривалим терміном служби або ж успіхи у розробці нових матеріалів для сонячних панелей, що підвищать ефективність перетворення сонячної енергії чи вітрових турбін нового покоління з можливістю роботи при низьких швидкостях ринку.

**Висновки.** Запропонований підхід до моделювання сценаріїв глобальної енергетичної трансформації дозволяє ефективніше враховувати історичне недооцінювання темпів зростання відновлюваної енергетики, ймовірність значних технологічних проривів та динаміку посилення регуляторних

заходів. Включення фактору ймовірності технологічного прориву дозволяє врахувати потенційні інновації, які можуть радикально змінити енергетичний ландшафт. Це особливо важливо для довгострокових прогнозів, де вплив нових технологій може бути найбільш значущим. Індекс жорсткості політики в моделі підкреслює критичну роль регуляторних заходів у формуванні майбутнього енергетичного сектору. Посилення політичної волі до декарбонізації може значно прискорити перехід до чистої енергії. Модель також демонструє, що найбільш значні зміни відбуваються при синергії технологічних інновацій та сприятливої політики.

Скориговані сценарії показують, що за певних умов можливе досягнення більш амбітних цілей щодо декарбонізації, ніж передбачено в базових прогнозах. Це може стати основою для перегляду та посилення національних та міжнародних зобов'язань у сфері енергетики та клімату. Результати дослідження можуть бути використані для подальшого удосконалення моделей прогнозування, а також при розробці та оцінюванні державної енергетичної політики.

#### Список використаних джерел:

1. Fell, H.-J., Breyer, Christian, & Metayer, M., (2015). The Projections for the Future and Quality in the Past of the World Energy Outlook for Solar PV and Other Renewable Energy Technologies. 3220-3246. doi: 10.4229/EUPVSEC20152015-7DV.4.61
2. Roberts D. (2015). The International Energy Agency consistently underestimates wind and solar power. Why?. Vox. URL: <https://www.vox.com/2015/10/12/9510879/iea-underestimate-renewables>.
3. Feng, Y., & Zhao, T. (2022). Exploring the Nonlinear Relationship between Renewable Energy Consumption and Economic Growth in the Context of Global Climate Change. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(23), 15647. <https://doi.org/10.3390/ijerph192315647>.
4. Ben Khaled, M. W., & Ouertani Abaoub, N. (2024). Energy Sector Evolution: Perspectives on Energy Platforms and Energy Transition. Platforms, 2(2), 68-83. <https://doi.org/10.3390/platforms2020005>

5. Freeman, R., Pye, S., (2022). Socio-technical modelling of UK energy transition under three global SSPs, with implications for IAM scenarios. *Environmental Research Letters*, 17, 124022. doi: 10.1088/1748-9326/aca54f
6. Третякова, Л., Побігайло, В., & Усатий, Є. (2024). Зміни в світовій енергетиці спричинені війною росії проти України. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. № 4 (2024): 78. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2024.315592>
7. Orangi, S., Manjong, N.B., Clos, D.P., Usai, L., Burheim, O.S., & Strømman, A.H. (2023). Trajectories for Lithium-Ion Battery Cost Production: Can Metal Prices Hamper the Deployment of Lithium-Ion Batteries? *Batteries & Supercaps*. <https://doi.org/10.1002/batt.202300346>
8. Molenda, J., & Molenda, M. (2018). 30 Composite Cathode Material for Li-Ion Batteries Based on LiFePO 4 System. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/30-Composite-Cathode-Material-for-Li-Ion-Batteries-Molenda-Molenda/a6006e28ed317d04e2245e703a4aee585774283e>.
9. Критська, Т.В., Небеснюк, О.Ю., Ніконова, А.О., & Ніконова, З.А. (2023). Впровадження технології використання некондиційних напівпровідникових структур для виготовлення сонячних елементів. *Scientific Journal "Metallurgy"*. doi: 10.26661/2071-3789-2022-1-09
10. Новицький, С.В., Зур'ян, О.В. (2024). Фотоелектричні перетворювачі. Види, ефективність. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.12>.
11. International Energy Agency (IEA). (2024). *World Energy Outlook 2024*. Paris: IEA. URL: [www.iea.org/weo](http://www.iea.org/weo).

#### References:

1. Fell, H.-J., Breyer, Christian, & Metayer, M., (2015). The Projections for the Future and Quality in the Past of the World Energy Outlook for Solar PV and Other Renewable Energy Technologies. 3220-3246. doi: 10.4229/EUPVSEC20152015-7DV.4.61 [in English].
2. Roberts D. (2015). The International Energy Agency consistently underestimates wind and solar power. Why?. *Vox*. Retrieved from: <https://www.vox.com/2015/10/12/9510879/iea-underestimate-renewables> [in English].
3. Feng, Y., & Zhao, T. (2022). Exploring the Nonlinear Relationship between Renewable Energy Consumption and Economic Growth in the Context of Global Climate Change. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 15647. <https://doi.org/10.3390/ijerph192315647> [in English].
4. Ben Khaled, M. W., & Ouertani Abaoub, N. (2024). Energy Sector Evolution: Perspectives on Energy Platforms and Energy Transition. *Platforms*, 2(2), 68-83. <https://doi.org/10.3390/platforms2020005> [in English].
5. Freeman, R., Pye, S., (2022). Socio-technical modelling of UK energy transition under three global SSPs, with implications for IAM scenarios. *Environmental Research Letters*, 17, 124022. doi: 10.1088/1748-9326/aca54f [in English].
6. Tretiakova, L., Pobigaylo, V., & Usatii, E. (2024). Zminy v svitoviy enerhetytsi sprychyneni viynoy rosii proty Ukrainy. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya* [Changes in the global energy sector caused by russia's war against Ukraine. *Power Engineering: Economics, Technique, Ecology*], 4 (2024): 78. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2024.315592> [in Ukrainian].
7. Orangi, S., Manjong, N.B., Clos, D.P., Usai, L., Burheim, O.S., & Strømman, A.H. (2023). Trajectories for Lithium-Ion Battery Cost Production: Can Metal Prices Hamper the Deployment of Lithium-Ion Batteries? *Batteries & Supercaps*. <https://doi.org/10.1002/batt.202300346> [in English].
8. Molenda, J., & Molenda, M. (2018). 30 Composite Cathode Material for Li-Ion Batteries Based on LiFePO 4 System. Retrieved from: <https://www.semanticscholar.org/paper/30-Composite-Cathode-Material-for-Li-Ion-Batteries-Molenda-Molenda/a6006e28ed317d04e2245e703a4aee585774283e> [in English].
9. Krytska, T.V., Nebesnyuk, O.Y., Nikonova, A.O., & Nikonova, Z.A. (2023). Vprovadzhennya tekhnolohiyi vykorystannya nekondytsiynykh napivprovodnykovykh struktur dlya vyhotovlennya sonyachnykh elementiv [Implementation of the technology of using substandard semiconductor structures for the manufacture of solar cells] *Scientific Journal "Metallurgy"*. doi: 10.26661/2071-3789-2022-1-09 [in Ukrainian].
10. Novytskyi, S.V., Zuryan, O.V. (2024). Fotoelektrychni peretvoryuvachi. Vydy, efektyvnist'. *Visnyk Khersons'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu* [Photoelectric converters. Types, efficiency. Bulletin of the Kherson National Technical University]. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.12>. [in Ukrainian].
11. International Energy Agency. (2024). *World Energy Outlook 2024*. Paris: IEA. Retrieved from: [www.iea.org/weo](http://www.iea.org/weo).