



Економіка та інновації

УДК 504:338.4:656.6

DOI <https://doi.org/10.5281/zenodo.16946245>

Економічний аналіз впровадження альтернативних джерел енергії на підприємствах морського транспорту

Ярова Ніна Вікторівна,

кандидат економічних наук, доцент, кафедра економіки і фінансів,
Навчально-науковий інститут морського бізнесу, Одеський національний
морський університет, м. Одеса, Україна,
<https://orcid.org/0000-0002-9703-3305>

Прийнято: 15.08.2025 | Опубліковано: 26.08.2025

***Анотація.** З огляду на зростаючі екологічні виклики та необхідність декарбонізації транспортного сектору, питання впровадження альтернативних джерел енергії в морській галузі набуває особливої актуальності. У статті досліджено економічні аспекти застосування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на підприємствах морського транспорту, зокрема в діяльності портів та судноплавних компаній. Особлива увага приділена аналізу потенціалу сонячної енергетики як одного з найперспективніших напрямів у цьому секторі. Інші форми ВДЕ – вітрова, біоенергія та енергія хвиль – визначено як об'єкт подальших досліджень.*

***Метою статті** є економічне обґрунтування доцільності впровадження альтернативних джерел енергії на підприємствах морського транспорту, визначення потенційних переваг і ризиків такого переходу, а також аналіз*



його впливу на ефективність функціонування галузі в умовах енергетичної трансформації та міжнародних екологічних зобов'язань.

Методи. У дослідженні використано методи порівняльного та структурно-логічного аналізу, оцінки витрат і вигод, елементи системного підходу, а також аналіз міжнародного досвіду та законодавчих підходів до розвитку відновлюваної енергетики.

Результати. Встановлено, що впровадження альтернативної енергетики, зокрема сонячної, сприяє зменшенню експлуатаційних витрат підприємств, підвищенню енергоефективності суден, зниженню енергетичної залежності та скороченню викидів шкідливих речовин. Проаналізовано успішні приклади використання ВДЕ на морських судах (Energy Observer, Auriga Leader), де спостерігається до 40% зменшення витрат пального та зниження викидів CO₂ на 10–25%. Портова інфраструктура (Гамбург, Муга, Лос-Анджелес) демонструє зниження викидів на 20–25% та економію електроенергії до 30% завдяки впровадженню сонячних панелей. Виокремлено бар'єри, що стримують масштабне впровадження ВДЕ в Україні, серед яких: високі капітальні витрати, обмежена державна підтримка та потреба в оновленні нормативно-правової бази.

Висновки. Використання альтернативних джерел енергії, зокрема сонячної, на підприємствах морського транспорту є економічно доцільним та стратегічно виправданим. За умов активної державної політики, міжнародного партнерства та інвестиційної підтримки можливе розширення практик «зеленої» енергетики в українських портах і судноплавстві. Це, у свою чергу, сприятиме модернізації галузі, зниженню впливу на довкілля та реалізації цілей сталого розвитку.

Ключові слова: альтернативна енергетика, сонячна енергія, морський транспорт, портова інфраструктура, енергоефективність, відновлювані джерела енергії, сталий розвиток.



Economic Analysis of the Implementation of Alternative Energy Sources in Maritime Transport Enterprises

Nina Yarova,

PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department
«Economics and Finance», Educational and Scientific Institute of Marine
Business, Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-9703-3305>

Abstract. *Given the growing environmental challenges and the urgent need for decarbonization in the transport sector, the implementation of alternative energy sources in the maritime industry is becoming increasingly relevant. This article explores the economic aspects of using renewable energy sources (RES) in maritime transport enterprises, particularly in the operations of ports and shipping companies. Special attention is paid to the analysis of solar energy as one of the most promising directions for the industry. Other types of RES, such as wind, bioenergy, and wave energy, are outlined as subjects for future research.*

The article aims to provide an economic justification for the feasibility of implementing alternative energy sources in maritime transport enterprises, identify potential benefits and risks of this transition, and analyze its impact on operational efficiency under conditions of energy transformation and international environmental commitments.

Methods. *The research employs comparative and structural-logical analysis, cost-benefit assessment, elements of a systems approach, as well as the analysis of international experience and legislative frameworks related to renewable energy development.*

Results. *The findings show that the implementation of alternative energy solutions – particularly solar energy – helps reduce operational costs, increase*



vessel energy efficiency, lower energy dependence, and cut emissions of harmful substances. Case studies of renewable energy use on vessels (such as Energy Observer and Auriga Leader) demonstrate up to 40% reduction in fuel consumption and 10–25% decrease in CO₂ emissions. Port infrastructure (examples include Hamburg, Muga, and Los Angeles) shows a reduction in greenhouse gas emissions by 20–25% and up to 30% savings on electricity costs due to the use of solar power. Key barriers to broader adoption in Ukraine include high upfront investment costs, limited state support, and an underdeveloped regulatory environment.

Conclusions. *The use of alternative energy sources – especially solar energy—in maritime transport enterprises is economically viable and strategically justified. With proper government policy, international cooperation, and investment support, the expansion of green energy practices in Ukrainian ports and shipping can contribute to sector modernization, reduced environmental impact, and achievement of sustainable development goals.*

Keywords: *alternative energy, solar energy, maritime transport, port infrastructure, energy efficiency, renewable energy sources, sustainable development.*

Постановка проблеми. Морський транспорт протягом багатьох років залишався одним із найбільш енергоємних видів транспорту, що традиційно працює на викопному паливі. Таке паливне забезпечення забезпечувало стабільність функціонування галузі, але водночас призводило до значних негативних екологічних наслідків. Сьогодні, коли світова спільнота дедалі активніше реагує на зміну клімату, а питання декарбонізації стало пріоритетним на міжнародному рівні, потреба у переході до чистіших джерел енергії торкнулася і морського сектору. Варто зазначити, що, за результатами наукового дослідження, проведеного на основі даних автоматичної ідентифікаційної системи судноплавства, у період 2021–2024 рр. викиди



діоксиду вуглецю у виключній морській економічній зоні України зменшилися в середньому на 17,88 % щороку. Водночас офіційні статистичні збірники, наприклад «Довкілля України», не виділяють морський транспорт як окрему категорію, що ускладнює точну оцінку його реального впливу. Для прикладу, у 2020 р. внутрішній водний транспорт становив лише 0,25 % від загальних викидів діоксиду вуглецю у транспортному секторі (31,81 млн т у перерахунку на діоксид вуглецю), однак цей показник не включає міжнародні судноплавні перевезення. У той час як багато країн ЄС вже активно модернізують свої порти, впроваджуючи сонячну, вітрову та біоенергетику, в Україні цей процес лише розпочинається та супроводжується низкою труднощів – від високої вартості проєктів до недостатньої адаптованості нормативно-правової бази. Усе це підсилює потребу у глибшому аналізі економічної доцільності застосування альтернативної енергії саме у морському транспорті, з урахуванням українських реалій та можливості отримати як короткострокові, так і довгострокові переваги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальність впровадження альтернативних джерел енергії, зокрема сонячної, у сфері транспорту дедалі більше визнається науковою спільнотою в контексті глобальної декарбонізації та енергетичної трансформації. За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергії (IRENA, 2021), у 2020 році встановлена потужність сонячної енергетики перевищила 700 ГВт, а вартість електроенергії з фотоелектричних систем знизилася більш ніж на 80 % за останнє десятиліття.

В українській науковій спільноті тематика альтернативної енергетики в портовій сфері поступово набирає ваги та розвивається. У роботі Ярової Н.В., Воркунової О.В. та Хотєєвої Н.В. [1] підкреслюється економічна доцільність впровадження відновлюваних джерел енергії на портових підприємствах. Питання правового регулювання відновлюваної енергетики розглядається у



дослідженні Григорецької І.І. [2], що аналізує європейські та українські підходи і наголошує на важливості гармонізації законодавства.

У ширшому контексті, вітчизняні дослідники приділяють увагу екологізації морських портів як ключовому фактору сталого розвитку транспортної інфраструктури. Зокрема, Ярова Н.В. [3] зазначає, що застосування екологічних інструментів сприяє не лише зниженню негативного впливу на довкілля, а й підвищенню конкурентоспроможності. Куликов Д.В. [4] досліджує економічну ефективність заходів з екологізації підприємств портової галузі. Практичні аспекти застосування сонячної енергетики у регіональному контексті України розглядаються в роботі Trypolska G., Kubatko O., Prokopenko O. [8].

Серед міжнародних джерел: Agostinelli S. et al. (2022) [9] аналізують інтеграцію відновлюваних джерел енергії в портах Італії; Song D.P. (2024) [10] узагальнює міжнародні практики декарбонізації портів; ІМО (2023) [11] та UNCTAD (2024) [12] представляють глобальні тенденції та нормативні рамки морського транспорту; Hansen K., Kavvada O. (2021) [13] оцінюють фінансові та технічні обмеження впровадження ВДЕ.

Критичний аналіз показує, що більшість досліджень фокусуються на потенційних перевагах ВДЕ, але недостатньо приділяють увагу економічній доцільності, ризикам та національному контексту. Наприклад, Agostinelli et al. [14] та Song [15] не повністю адаптовані до українських умов. Звіти ІМО [16] та UNCTAD [17] демонструють глобальні тенденції, проте практичні моделі для українських портів відсутні.

Дослідження Elkafas, Ahmed & Seddiek, Ibrahim [18] підкреслюють важливість комплексного підходу, який враховує не лише технічні й екологічні аспекти впровадження відновлюваних джерел енергії в портах, а й економічні витрати, ризики реалізації та специфіку національних енергетичних політик,



що потребує додаткового аналізу для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Дослідження Mohamed M. Ibrahim та Abdelghafour Zaabout [19] демонструє потенціал інтеграції біогенних джерел енергії з технологіями уловлювання та зберігання вуглецю для досягнення негативних викидів діоксиду вуглецю у промисловості, що підкреслює необхідність врахування інноваційних технологічних рішень у стратегічному плануванні енергетичної трансформації портових підприємств, що вже поступово починають використовувати в Україні на окремих промислових об'єктах та портах.

Крім того, дослідження Carević, Melita, Duić, Dunja та Turudić, Marko [19] акцентує на значенні енергетичної солідарності та енергетичної безпеки в умовах «зеленої» трансформації та кризового менеджменту ЄС, що важливо враховувати при формуванні національної стратегії інтеграції відновлюваних джерел енергії та підвищення стійкості енергетичної системи України.

Таким чином, наукові дослідження підтверджують необхідність переходу до альтернативної енергетики в морському транспорті, водночас вимагаючи критичного та емпірично обґрунтованого підходу для українських портів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри посилену увагу до переходу на відновлювані джерела енергії, окремі аспекти їхнього впровадження в морському транспорті залишаються недостатньо опрацьованими. Особливо потребує подальшого дослідження економічна ефективність використання сонячної енергетики з урахуванням специфіки функціонування портової інфраструктури, кліматичних особливостей регіонів та експлуатаційних обмежень.

Недостатньо розкритими залишаються також питання фінансової та інвестиційної доцільності реалізації таких проєктів; механізми стимулювання



енергоефективних рішень; потенційні ризики, пов'язані із впровадженням альтернативної енергетики.

Крім того, актуальним залишається аналіз впливу використання альтернативних джерел енергії на загальну операційну стійкість і конкурентоспроможність підприємств морського транспорту в умовах енергетичної трансформації. У зв'язку з цим дане дослідження зосереджене на економічному аналізі впровадження сонячних панелей, геліоустановок та систем зберігання енергії на судах і в портах, що дозволяє оцінити економічну доцільність таких інвестицій, виявити потенційні обмеження та ризики, а також визначити можливості підвищення конкурентної переваги підприємств морського транспорту.

Таким чином, робота спрямована на заповнення прогалин у наукових та практичних даних щодо економічного обґрунтування використання сонячної енергетики у портовій та судновій інфраструктурі України.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Головна мета статті – оцінити економічну доцільність впровадження альтернативних джерел енергії, зокрема сонячної, на підприємствах морського транспорту та визначити їхній потенційний економічний і екологічний ефект.

Для досягнення цієї мети в статті поставлено такі конкретні завдання:

1. Проаналізувати сучасну структуру виробництва електроенергії у світі за джерелами з акцентом на роль відновлюваних технологій.
2. Виявити ключові чинники, що стимулюють морські транспортні компанії до впровадження альтернативної енергетики, зокрема сонячних енергетичних рішень.
3. Розглянути приклади практичного застосування сонячної енергії на судах і в портах та оцінити їхню економічну доцільність.
4. Визначити потенційний економічний і екологічний ефект використання сонячної енергетики в коротко- і довгостроковій перспективі.



У рамках дослідження було використано декілька взаємопов'язаних методів. Зокрема, метод порівняльного аналізу застосовано для узагальнення та зіставлення міжнародного досвіду впровадження сонячної енергетики в морській індустрії (Energy Observer, NYK Line, порти Гамбург, Муга, Лос-Анджелес). Це дало змогу виявити типові підходи і практичні результати, які можуть бути переглянуті з урахуванням умов України. Метод структурно-логічного аналізу використано для послідовного окреслення факторів, що обумовлюють перехід підприємств морського транспорту на альтернативні джерела енергії, а також для систематизації елементів, що формують економічну доцільність цих рішень. Водночас під час розрахунку можливого ефекту застосовано метод оцінки витрат і вигод, що дало змогу кількісно оцінити потенційне зниження споживання палива, обсягів викидів парникових газів та витрат на електроенергію. Така комбінація методів дозволила не лише описати позитивний досвід окремих країн і компаній, а й наблизити його до реального практичного використання у вітчизняному портовому секторі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Енергетика тісно пов'язана з усіма сферами нашого життя – від виробництва до побуту. Вона не лише забезпечує роботу інфраструктури та транспорту, а й виступає основою економічної стабільності. У сучасному світі питання енергетичної безпеки та пошуку стійких рішень у цій сфері стають дедалі актуальнішими, особливо в умовах постійних глобальних викликів.

На сьогоднішній день більша частина споживаної енергії у світі надходить із викопних джерел – вугілля, нафти та природного газу. Ці ресурси формувалися протягом мільйонів років і нині забезпечують близько 90 % глобального енергоспоживання. Проте активне їх використання вже тривалий час викликає занепокоєння через згубний вплив на довкілля [1].

Паралельно з цим зростає і загальне енергетичне навантаження. Одним із ключових чинників є приріст населення. Якщо у 2010 році на планеті



мешкало близько 7 мільярдів осіб, то вже до середини століття, за оцінками ООН, ця цифра може зрости до майже 10 мільярдів. Найбільше зростання очікується в країнах, що розвиваються, що, у свою чергу, створить додатковий тиск на енергетичну систему [7]. Усе це підкреслює важливість пошуку альтернатив, які здатні забезпечити сталість, безпеку та екологічну відповідальність енергетики.

Для забезпечення сталого розвитку і збереження довкілля необхідно активніше впроваджувати альтернативні, екологічно чисті джерела енергії. Хоча запаси викопних ресурсів ще дозволяють забезпечувати потреби кількох поколінь, їх інтенсивне використання вже спричиняє енергетичні та економічні виклики через зростання вартості та негативний вплив на довкілля [4]. Особливо це стосується транспорту, зокрема морського сектору, який споживає значну частку викопного палива і генерує суттєві викиди шкідливих речовин. За оцінками Міжнародної морської організації, морський транспорт відповідає близько 3 % глобальних викидів парникових газів, і без змін ця цифра може зростати.

У зв'язку з цим важливого значення набуває перехід на альтернативні джерела енергії – біопаливо, водень, аміак, електроенергія, а також енергія вітру і сонця. Впровадження таких технологій вимагає не лише технічних інновацій, а й значних інвестицій у модернізацію флоту, розвиток портової інфраструктури та створення нових логістичних схем.

З економічної точки зору впровадження альтернативної енергетики в морському транспорті відкриває широкі можливості для зниження паливних витрат у довгостроковій перспективі, скорочення витрат на утилізацію забруднень та уникнення штрафних санкцій за невідповідність екологічним нормам. Це також підвищує конкурентоспроможність судноплавних компаній на міжнародному ринку та стимулює інновації у суднобудуванні і транспортній логістиці.



Таким чином, перехід на альтернативні джерела енергії є не лише відповіддю на екологічні виклики, а й важливим економічним інструментом, що сприяє сталому розвитку, зниженню енергетичних ризиків і посиленню стратегічної незалежності в умовах глобалізації.

Сучасний світ, орієнтований на технології та інновації, потребує відходу від традиційних вичерпних джерел енергії і пошуку нових, ефективних та екологічно безпечних способів виробництва електроенергії та тепла. Прогнозується, що найближчим часом доведеться суттєво скоротити використання викопного палива і поступово відмовитися навіть від частини атомної енергетики.

З огляду на масштабне споживання ресурсів планети та загрозу майбутньому людству, актуальним стає пошук стійких джерел енергії, які забезпечать добробут наступних поколінь.

У науковій літературі існують різні терміни для позначення джерел чистої енергії – «альтернативні», «поновлювані» та «відновлювані» джерела. Хоча їх часто вживають як синоніми, між ними є певні відмінності. Термін «альтернативна енергетика» охоплює ширший спектр, включаючи не лише відновлювані джерела, а й енергію з газів, що утворюються під час переробки органічних відходів, а також вторинні енергетичні ресурси, такі як доменний і коксівний газ, метан із вугільних родовищ та енергія технологічних процесів [6].

Відновлювана енергетика спеціалізується на використанні природних і постійно відновлюваних потоків енергії – сонячного світла, вітру, гідроенергії, геотермального тепла тощо. Її часто називають «зеленою» енергією, оскільки вона мінімально впливає на довкілля, хоча навіть великі гідроенергетичні об'єкти можуть створювати певні екологічні ризики, які, втім, значно менші порівняно з впливом викопного палива.



Саме тому відновлювана енергетика посідає ключове місце у світових і національних стратегіях сталого розвитку. Вона закріплена в Цілях сталого розвитку ООН до 2030 року, Стратегії сталого розвитку ЄС та державній екологічній політиці України.

Особливо перспективним є впровадження таких джерел у транспортну інфраструктуру, зокрема в морському секторі, де традиційно використовується багато дизельного та мазутного палива. Під впливом посилення міжнародних екологічних вимог (зокрема ІМО щодо зниження викидів SO_x, NO_x і CO₂) зростає інтерес до застосування сонячної, вітрової енергії, водню та біопалива у судноплавстві.

За даними Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA), у 2020 році найбільшу встановлену потужність серед відновлюваних джерел енергії мали гідроенергія, вітер (зокрема прибережний і морський) та сонячна енергія. IRENA, до якої входить 164 країни, серед яких і Україна, є провідною міжурядовою організацією, що сприяє міжнародній співпраці у розвитку чистої енергетики. Агентство підтримує інвестиції, формує політику, впроваджує нові технології та розробляє технічні стандарти як на національному, так і на міжнародному рівні [6].

IRENA щороку публікує детальні аналітичні звіти, що є унікальним джерелом систематизованої інформації про відновлювані джерела енергії. Водночас, відповідно до Закону України «Про альтернативні джерела енергії», під альтернативними джерелами розуміють не лише відновлювані (сонячну, вітрову, геотермальну, гідротермальну, аеротермальну енергію, енергію хвиль, припливів, біомаси та біогазу), а й вторинні енергетичні ресурси – доменний і коксівний газ, метан із дегазації вугільних родовищ та енергію технологічних процесів [6]. Це ширше тлумачення часто ускладнює узгодження міжнародних угод України з ЄС.



ЗДОБУТКИ ЕКОНОМІКИ: ПЕРСПЕКТИВИ ТА ІННОВАЦІЇ

Сучасна тенденція свідчить про зростання кількості країн, що розглядають відновлювані джерела як основне майбутнє для енергозабезпечення: вже 47 країн отримують понад половину електроенергії з ВДЕ.

Цю тенденцію ілюструє рис. 1, де наведено структуру світового виробництва електроенергії за джерелами.

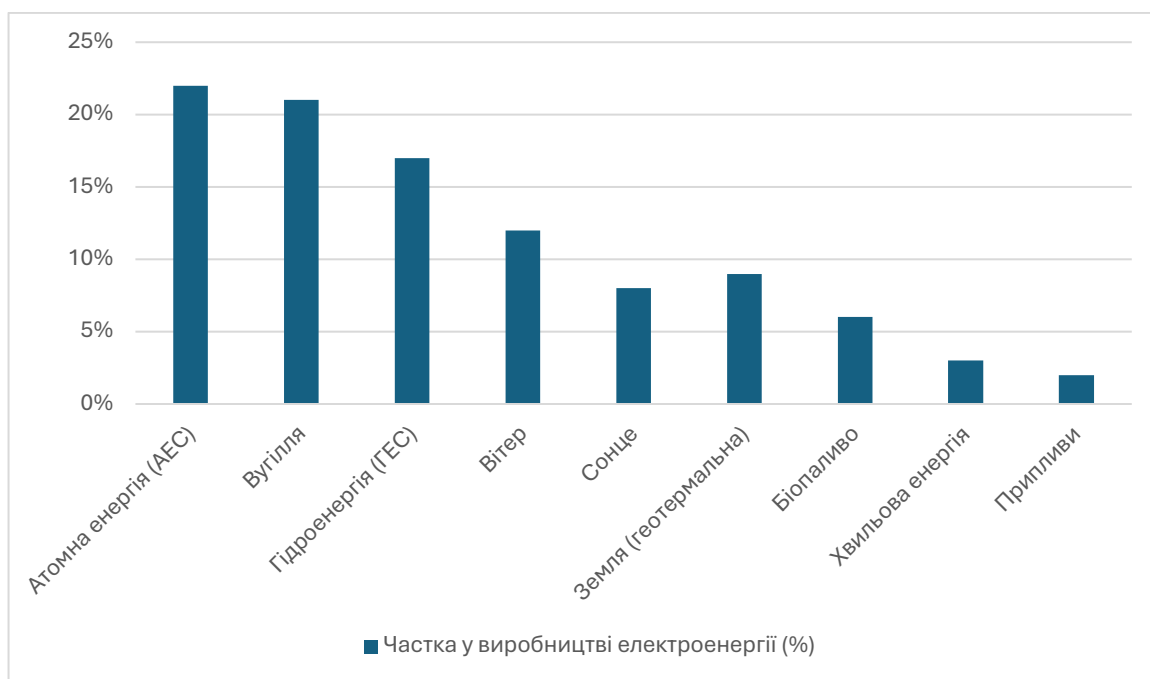


Рисунок 1. Структура виробництва електроенергії у світі за джерелами енергії, %
Джерело: розроблено автором за допомогою [4].

Основні причини, що зумовлюють необхідність переходу на виробництво енергії з відновлювальних джерел, представлено у табл. 1 та на рис. 2.

Для комплексної оцінки ефективності альтернативних джерел енергії у морському транспорті важливо розглядати кожен тип окремо. У цій статті основна увага зосереджена на сонячній енергії як одній із найбільш перспективних галузей. Інші види відновлюваної енергії – вітрова, біоенергія, енергія хвиль – стануть предметом подальших досліджень.



Таблиця 1

Основні причини переходу на ВДЕ на морському транспорті

Причина	Короткий опис	Очікуваний ефект
Екологічна безпека	Захист морського середовища від забруднення, зменшення впливу на екосистеми океанів і узбережжя	Зменшення екологічного навантаження
Енергетична незалежність	Зменшення залежності морських перевезень від традиційних викопних палив, підвищення енергетичної автономії суден та портів	Підвищення стабільності енергопостачання
Економічна ефективність	Зниження операційних витрат судноплавних компаній і портової інфраструктури завдяки використанню ВДЕ	Зниження витрат і підвищення конкурентоспроможності
Скорочення викидів CO ₂	Зменшення викидів парникових газів від суден та портового обладнання для боротьби зі зміною клімату	Покращення екологічного іміджу
Інновації і технології	Стимулювання впровадження новітніх енергоефективних рішень у суднопластві та портовій інфраструктурі	Прискорення модернізації галузі та створення нових робочих місць

Джерело: власна розробка автора



Рисунок 2. Мотиваційні чинники переходу на відновлювальні джерела енергії на морському транспорті

Джерело: власна розробка автора



Сонце має енергетичний потенціал, що у 30 000 разів перевищує потужність усіх механізмів, створених людиною. Частина його випромінювання доходить до поверхні Землі (табл. 2, рис. 3 і 4).

Таблиця 2

Розподіл сонячного випромінювання, що проникає на поверхню Землі

Тип випромінювання	Опис	Частка в загальному потоці	Залежить від	Особливості використання
Пряме випромінювання	Сонячне світло, що досягає поверхні без змін напрямку	50–90% (при ясному небі)	Кут падіння сонця, чистота атмосфери, хмарність	Найефективніше для сонячних концентраторів
Розсіяне випромінювання	Світло, розсіяне в атмосфері і що надходить з усіх напрямків	10–100% (при хмарності)	Хмарність, вміст аерозолів, запиленість повітря	Важливе для сонячних панелей без систем відстеження
Відбите випромінювання	Випромінювання, відбите від земної поверхні та інших об'єктів	5–15%	Тип, колір і структура поверхні (сніг, пісок, вода)	Джерело додаткової енергії в умовах високого альбедо

Джерело: власна розробка автора

Сонячна енергія – це поновлюване джерело з практично необмеженими запасами, яке не створює шкідливих викидів, що робить її важливим ресурсом для сталого розвитку морського транспорту.

Сонячні електростанції є екологічно чистим джерелом енергії, безпечним для довкілля, і можуть забезпечувати теплопостачання як у житловому, так і в комерційному секторах. Вони пропонують економічну вигоду та енергетичну незалежність, що робить їх популярними серед користувачів. Основою сонячної енергетики є сонячні колектори двох типів — плоскі та вакуумні, які нагрівають теплоносії за рахунок сонячного випромінювання. Простіший варіант колектора складається з затемненого металевого листа, зазвичай алюмінієвого, з трубами всередині, де циркулює



рідина для нагріву та подальшого використання. Для виготовлення колекторів площею 1 км² потрібно близько 10 000 тонн алюмінію.

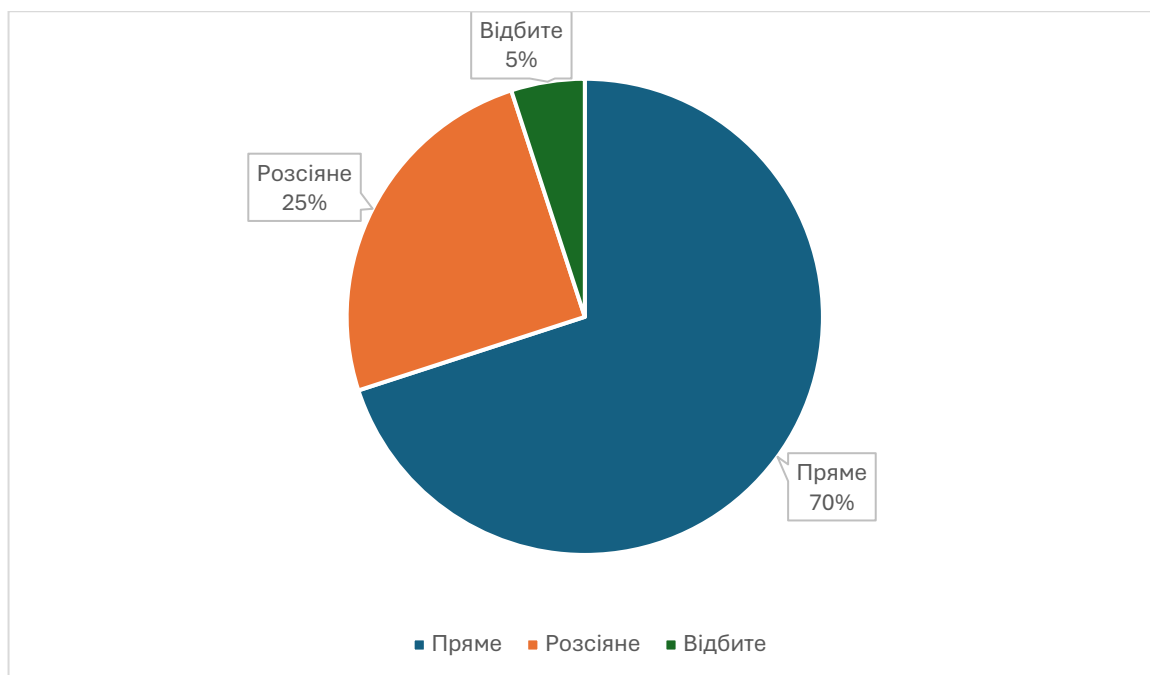


Рисунок 3. Структура сонячного випромінювання у ясну погоду

Джерело: власна розробка автора

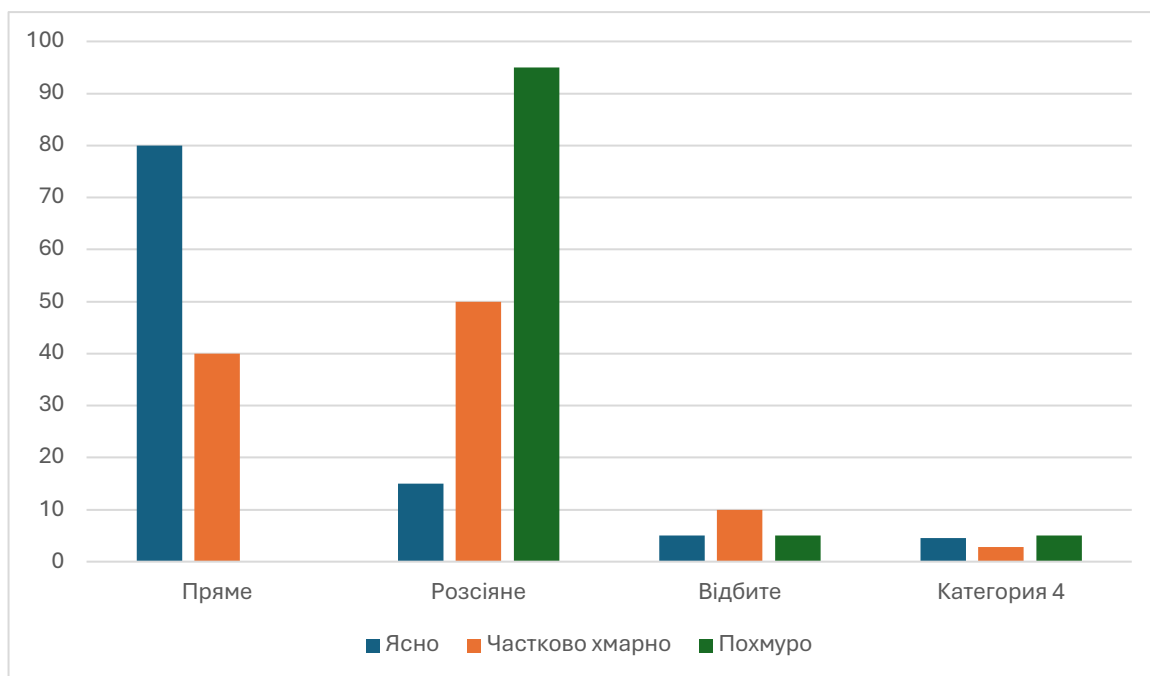


Рисунок 4. Зміна складу сонячного випромінювання залежно від погодних умов

Джерело: власна розробка автора



Сонячні батареї мають низький коефіцієнт корисної дії і досить дорогі у виробництві, але відмовлятися від екологічно чистої та невичерпної сонячної енергії не варто. Ефективність геліоустановок можна підвищити, розміщуючи їх на дахах будинків, що дозволить задовольнити потреби у теплі, гарячій воді та електропостачанні.

За останні роки інтерес до сонячної енергетики стрімко зростає: лише 0,0125% сонячної енергії, що надходить на Землю, достатньо для покриття світових енергетичних потреб, а 0,5% – повністю задовольнити їх у майбутньому [3]. Проте реалізація цього потенціалу обмежена низькою щільністю сонячного випромінювання. З 1 м² поверхні можна отримати близько 160 Вт енергії, тому для генерації 100 000 кВт потрібна площа близько 1,6 км², що робить масштабне застосування складним і поки економічно не вигідним [1].

Щільність сонячного випромінювання варіюється залежно від географічної широти: у високих широтах вона становить 80–130 Вт/м², у помірному кліматі – 130–210 Вт/м², а у тропічних пустелях сягає 210–250 Вт/м². Найсприятливіші умови для сонячної енергетики спостерігаються у теплих регіонах.

Навіть за оптимальних умов для повного задоволення світових енергетичних потреб виключно за рахунок сонячної енергії знадобиться площа близько 130 000 км², що потребує величезних матеріальних ресурсів – приблизно 1,3 млрд тонн алюмінію, що дорівнює світовим запасам цього металу. У разі надлишку виробленої електроенергії виникає потреба у використанні акумуляторів, які суттєво підвищують собівартість кВт·год через високу ціну [2].

Для задоволення енергетичних потреб до 2100 року сонячні колектори доведеться розмістити на площі від 1 до 3 млн км² – це територія, порівнянна з розмірами Франції або Південної Африки. Крім того, виробництво 1 МВт



сонячної енергії потребує 10 000–40 000 людино-годин, що в 50–80 разів більше, ніж у традиційних методах генерації [1].

Ці фактори свідчать про суттєві обмеження потужності сонячної енергетики. Хоча вона є екологічно чистою, масштабне впровадження потребує значних ресурсів: сировини, матеріалів, робочої сили для виготовлення геліостатів, колекторів та їх транспортування [5].

Використання альтернативної енергії у морському транспорті стає дедалі актуальнішим не лише через екологічні переваги, а й завдяки можливості знизити витрати на паливо – одну з основних статей собівартості перевезень. З метою оцінки економічної доцільності практичних кейсів використання сонячної енергії у статті застосовано підхід, який передбачає розрахунок зниження споживання палива, викидів парникових газів, а також витрат на електроенергію.

Зокрема, зниження споживання палива визначалось як частка енергії, виробленої сонячними панелями, у структурі загального енергоспоживання об'єкта, що розраховано за виразом:

$$\text{Зниження палива (\%)} = \frac{E_{\text{панелі}}}{E_{\text{загальне}}} \times 100 \quad (1)$$

Отримане значення використано для подальшого оцінювання зниження викидів парникових газів шляхом його множення на відповідний коефіцієнт викидів:

$$\text{Зниження викидів (\%)} = \text{Зниження палива (\%)} \times CF_{\text{викидів}} \quad (2)$$

Окрім того, економічний ефект було оцінено через співвідношення вартості електроенергії, заміщеної за рахунок сонячної генерації, до загальних витрат на енергозабезпечення, тобто за формулою:



$$\text{Зниження витрат (\%)} = \frac{\text{Сзаміщеної енергії}}{\text{Сзагальні витрати}} \times 100 \quad (3)$$

Застосування вищевказаних розрахункових залежностей дозволило оцінити потенційний економічний та екологічний ефект від впровадження сонячних енергетичних рішень у морській індустрії. У табл. 3 та рис. 5 наведено конкретні приклади реалізації таких ініціатив на окремих судах і в портах, а також отримані (розраховані) показники зниження споживання палива, викидів парникових газів та витрат на електроенергію.

Впровадження сонячних панелей, геліоустановок та систем зберігання енергії на судах і в портах потребує значних інвестицій. Наприклад, деякі сучасні порти вже використовують сонячні електростанції для живлення допоміжних систем, що допомагає знизити споживання традиційних енергоресурсів і зменшити викиди в атмосферу. Також на борту експериментальних суден встановлюють сонячні батареї, які підзаряджають акумулятори для живлення навігаційного обладнання та систем комфорту.



Таблиця 3

Приклади використання сонячної енергії в морській індустрії та їх економічна доцільність (з розрахунками)

Приклад застосування	Локація/ Судно	Опис	Економічний та екологічний ефект	Зниження споживання палива, %	Формула розрахунку	Зниження викидів парникових газів, %	Формула розрахунку	Зниження витрат на електроенергію %	Формула розрахунку
Energy Observer	Судно	Використання сонячних панелей, вітрових турбін та водневих паливних елементів для автономного живлення	Зниження споживання викопного палива, демонстрація потенціалу ВДЕ	38	$(\text{Енергія від панелей} / \text{Загальне споживання енергії судна}) \times 100$	20	$\text{Зниження палива} \times \text{Коефіцієнт викидів}$	28	$\text{Вартість заміщеної електроенергії} / \text{Загальні витрати} \times 100$
Порт Гамбург	Порт	Встановлення сонячних панелей на причалі для живлення швартових пристроїв	Підвищення енергоефективності	0	$(\text{Енергія від панелей} / \text{Загальне споживання енергії порту}) \times 100$	22	$\text{Зниження палива} \times \text{Коефіцієнт викидів}$	27	$\text{Вартість заміщеної електроенергії} / \text{Загальні витрати} \times 100$
Порт Муга, Естонія	Порт	Встановлення сонячної електростанції на складах	Зменшення викидів, зниження витрат	0	$(\text{Енергія від панелей} / \text{Загальне споживання енергії порту}) \times 100$	21	$\text{Зниження палива} \times \text{Коефіцієнт викидів}$	25	$\text{Вартість заміщеної електроенергії} / \text{Загальні витрати} \times 100$



ЗДОБУТКИ ЕКОНОМІКИ: ПЕРСПЕКТИВИ ТА ІННОВАЦІЇ

Приклад застосування	Локація/ Судно	Опис	Економічний та екологічний ефект	Зниження споживання палива, %	Формула розрахунку	Зниження викидів парникових газів, %	Формула розрахунку	Зниження витрат на електроенергію %	Формула розрахунку
NYK Line – судно Auriga Leader	Судно, Японія	Перший у світі судноплавний проєкт із сонячними панелями	Зниження навантаження на двигуни	12	(Енергія від панелей / Загальне споживання енергії судна) × 100	15	Зниження палива × Коефіцієнт викидів	12	Вартість заміщеної електроенергії / Загальні витрати × 100
Порт Лос-Анджелес	Порт, США	Встановлення сонячних батарей для навантажувального обладнання	Зменшення навантаження на мережу	0	(Енергія від панелей / Загальне споживання енергії порту) × 100	18	Зниження палива × Коефіцієнт викидів	22	Вартість заміщеної електроенергії / Загальні витрати × 100

Примітки:

1. Дані обчислені на основі технічних характеристик панелей та енергоспоживання об'єктів.
2. Коефіцієнти викидів використані згідно з міжнародними стандартами.

Джерело: власні розрахунки автора, *Energy Observer*, *NYK Line Sustainability Reports*

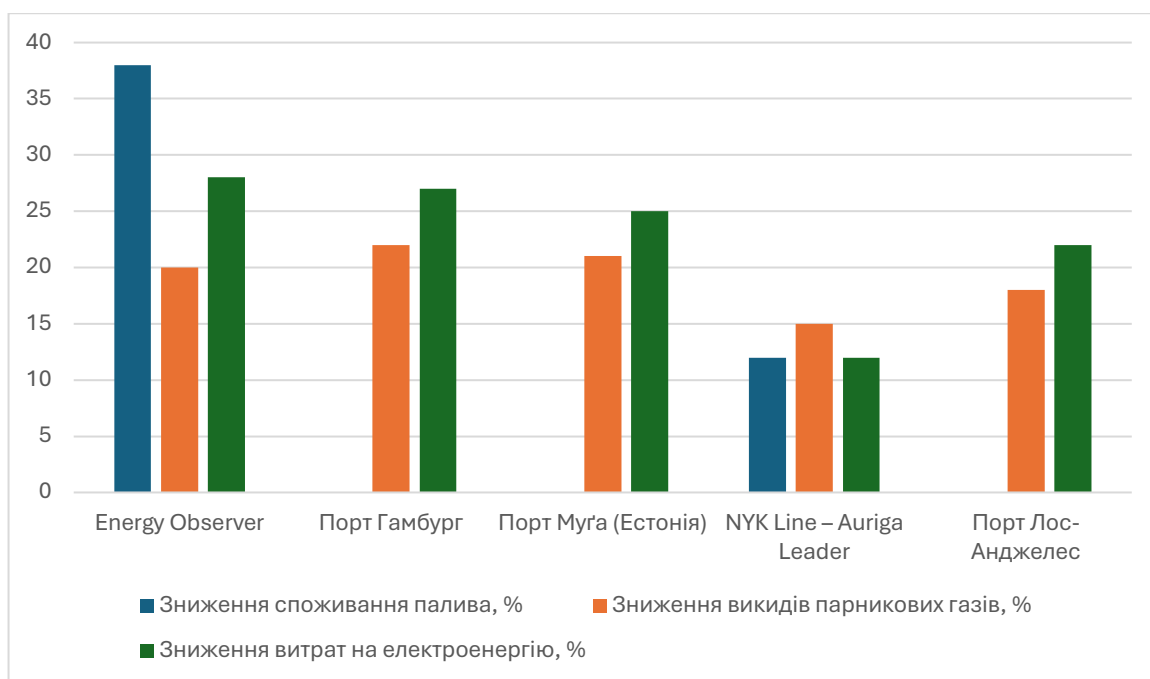


Рисунок 5. Економічний та екологічний ефект використання сонячної енергії у морській індустрії (за прикладами)

Джерело: власна розробка автора

Хоча початкові витрати можуть здаватися високими, з часом ці інвестиції окупаються завдяки економії на пальному та зниженню витрат на обслуговування. Крім того, дедалі більше міжнародних регуляторів вводять жорсткі екологічні норми, тому судновласники, що інвестують у чисті технології, отримують конкурентну перевагу. Проте варто пам'ятати, що використання сонячної енергії на судах обмежене через залежність від погодних умов та площу для встановлення панелей. Втім, у поєднанні з іншими технологіями, наприклад, вітровими турбінами або використанням біопалива, сонячна енергетика стає важливою складовою комплексного підходу до енергозабезпечення.

Висновки. Отже, для морського транспорту застосування альтернативної енергії – це не лише шлях до збереження природи, а й стратегічний крок до економічної стабільності та розвитку.



Проведений аналіз практичних прикладів впровадження альтернативних джерел енергії в галузі морського транспорту дає підстави стверджувати, що такі ініціативи сприяють досягненню як економічного, так і екологічного ефекту. Зокрема, результати впровадження ВДЕ на морських судах (наприклад, Energy Observer, Auriga Leader) свідчать про потенціал зниження споживання палива на рівні до 40% і скорочення викидів CO₂ на 10–25%. Це, своєю чергою, дозволяє зменшити навантаження на двигуни, оптимізувати витрати та покращити енергоефективність суден.

Портова інфраструктура (на прикладі портів Гамбурга, Муга, Лос-Анджелеса) демонструє стабільне зниження викидів парникових газів (у межах 20–25%) та зменшення витрат на електроенергію до 30% завдяки використанню сонячної генерації. При цьому безпосередня економія пального в таких проєктах не фіксується, однак досягається ефект енергетичної незалежності та зменшення навантаження на центральні енергомережі.

Отримані дані підтверджують, що впровадження ВДЕ в морському секторі є доцільним і ефективним як з екологічної, так і з економічної точки зору. Застосування таких рішень дозволяє сформувати передумови для сталого розвитку галузі, підвищення конкурентоспроможності підприємств і поступового досягнення кліматичних цілей, визначених міжнародними та національними стратегічними документами.

Отже, впровадження відновлюваних джерел енергії в морському секторі є не лише екологічно доцільним, а й економічно виправданим кроком, який створює додану вартість та підвищує стійкість підприємств.

В українських умовах практичним першим кроком може бути застосування сонячних панелей на допоміжному обладнанні портів (наприклад, освітлювальних системах, швартових механізмах або адміністративних спорудах). Навіть такі невеликі пілотні проєкти здатні



забезпечити зниження витрат на електроенергію в межах 15–20 %, що особливо актуально в умовах зростання тарифів та дефіциту енергоресурсів.

Для судноплавних компаній доцільно вже сьогодні розглядати комбіновані рішення – встановлення сонячних панелей у поєднанні з системами зберігання енергії. Це дозволить не тільки скорочувати викиди, але й зменшувати навантаження на основні двигуни, продовжуючи їх ресурс та забезпечуючи більш стабільний режим роботи.

Таким чином, отримані результати можуть бути використані як орієнтир для розроблення енергетичних стратегій і проєктів у портово-судноплавному секторі України, а сам перехід на альтернативну енергетику – розглядатися не як короткостроковий тренд, а як елемент довгострокової конкурентної переваги.

Список використаних джерел

1. Yarova N. V., Vorkunova O. V., Khotyeyeva N. V. Economic assessment of the alternative energy sources implementation for port enterprises. *Economic Annals-XXI*, 2017. Vol. 166, № 7–8. P. 46–50. URL: <http://soskin.info/en/ea/2017/166-7-8/Economic-Annals-contents-V166-09> (дата звернення: 11.06.2025).
2. Григорецька І. І. Правове регулювання відновлювальної енергетики : європейський та український підходи. *Морська безпека та оборона*, 2023. № 1. С. 9–15.
3. Ярова Н. В. Екологізація як інструмент забезпечення сталого розвитку морських портів. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*, 2024. № 4(89). С. 7–23. DOI: <https://doi.org/10.31375/2226-1915-2024-4-07-23>
4. Куликов Д. В. Економічна ефективність екологізації діяльності підприємств портової галузі. *Економіка та суспільство*, 2024. № 67. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-67-127>



5. Відновлювані джерела енергії / за заг. ред. С. О. Кудрі. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.
6. Сонячна енергетика : теорія та практика : монографія / Мисак Й. С., Возняк О. Т., Дацько О. С., Шаповал С. П. Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2014. 340 с.
7. Гелетука Г. Г. Аналіз основних положень Енергетичної стратегії України на період до 2030 року. *Промислова теплотехніка*, 2006. № 5. С. 82–92.
8. Trypolska G., Kubatko O., Prokopenko O. Establishing Solar Energy Cooperatives in Ukraine: Regional Considerations and a Practical Guide. *Energies*, 2025. Vol. 18, № 14. Article 3623. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18143623>
9. Lehmann N., Panagakos G., Bruhn Barfod M. Impact assessment of regulations on container shipping decarbonization : An evidence-based case study. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 2025. Vol. 146. Article 104902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104902>
10. Investigation of a port queuing system on CO₂ emissions from container shipping / R. Rhodes et al. // *Marine Pollution Bulletin*, 2025. Vol. 218. Article 118151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118151>
11. The transport sector in the Integrated Database of the European Energy System – Methodological update and potential for transport policy analysis / J. Tattini et al. // *Energy*, 2025. Vol. 318. Article 134400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134400>
12. Garg C. P., Kashav V., Lam J. S. L. Evaluation of value creating factors in green shipping corridors. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 2025. Vol. 145. Article 104790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104790>
13. Hansmeier H., Losacker S., Bersch J., Kroll H. Regional Specializations in Green Incumbents and Green Start-ups in the German Transport Sector. *Growth Change*, 2025. Vol. 56. Article e70025. DOI: <https://doi.org/10.1111/grow.70025>



14. Agostinelli S., Buonomano A., & Cumo F. (2022). *Integrating renewable energy sources in Italian port areas towards renewable energy communities*. *Sustainability*, 14(21), 13720. <https://doi.org/10.3390/su142113720>
15. Song D.P. (2024). *A time-phased roadmap for seaport decarbonisation*. *Liverpool Management Blog*. <https://www.liverpool.ac.uk/management/blog/research/a-time-phased-roadmap-for-seaport-decarbonisation/> (дата звернення: 11.06.2025).
16. IMO (2023). *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*. <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-ghg-emissions-from-ships.aspx> (дата звернення: 11.06.2025).
1. UNCTAD (2024). *Review of Maritime Transport 2024*. <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2024> (дата звернення: 11.06.2025).
17. Elkafas, Ahmed & Seddiek, Ibrahim (2024). Techno-economic and environmental analysis for the application of renewable energy sources in seaports. *Environmental Science and Pollution Research*. 31. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33816-7>
18. Mohamed M. Ibrahim, Abdelghafour Zaabout (2025). Achieving negative CO2 emissions through biogenic-driven energy supply for mineral industry decarbonization integrated with carbon capture and storage (CCS), *Energy Conversion and Management*, Volume 345, 2025, 120345, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120345>.
19. Carević, Melita; Duić, Dunja; Turudić, Marko Energy solidarity and energy security – from green transition to the EU’s crisis management - Croatia Chapter // Energy solidarity and energy security – from green transition to the EU’s crisis management. XXXI FIDE Congress | Katowice 2025 Congress Publications, Vol. 3. Katowice: University of Silesia Press, 2025. str. 171–189.



20. Hochstetler K. The green economy and the Global South. *Regulation and Governance*, 2025. Vol. 19, № 2. P. 515–519.
21. McCabe S. Circularity in Producing a Green Economy. *Examining Net Zero : Creating Solutions for a Greener Society and Sustainable Economic Growth*, 2025. P. 15–24. DOI: <https://doi.org/10.1108/978-1-83608-574-420251002>
22. Gharaibeh M. A., Dalgamoni H. N., Batayneh A. Z. Energy needs in the transport sector of Jordan : statistical analysis and future projections. *International Journal of Energy Sector Management*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJESM-12-2024-0045>