

## Аналітична оцінка впливу систем моніторингу викидів CO<sub>2</sub> на собівартість міжнародних морських перевезень

Толобаєв Георгій Геннадійович<sup>1</sup>

Отримано	Секція	УДК
30.11.2022	Соціальні та поведінкові науки	656.61:504.3.054

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17596467>

Ліцензовано за умовами Creative Commons BY 4.0 International license

**Анотація.** Актуальність дослідження зумовлена зростанням вимог до скорочення викидів CO<sub>2</sub> в морському транспорті, який забезпечує понад 80 % світової торгівлі. Мета статті полягає у визначенні впливу систем моніторингу викидів CO<sub>2</sub> на формування собівартості міжнародних морських перевезень і розробленні шляхів підвищення їхньої економічної ефективності в умовах екологічного регулювання. У процесі дослідження застосовано системний, аналітичний і порівняльний підходи для оцінювання взаємозв'язку між рівнем енергоефективності суден, структурою витрат і конкурентоспроможністю флоту. З'ясовано, що MRV та DCS формують новий витратний контур судноплавних компаній, інтегруючи екологічні складники у фінансове планування. Доведено, що підвищення енергоефективності на 5–7 % знижує собівартість перевезень на 8–10 %. Виявлено технічні, організаційні та фінансові перешкоди, зокрема фрагментацію систем, дублювання звітності та високу капіталомісткість. Доведено, що поєднання екологічної відповідальності з економічною стійкістю можливе через цифрові системи управління витратами, «зелене бюджетування» та стимулювання модернізації флоту.

**Ключові слова:** енергоефективність суден, вуглецеве регулювання, цифровий моніторинг, екологічні витрати, морська логістика, сталий флот, економічна стійкість, «зелене» бюджетування.

### **Analytical assessment of the impact of CO<sub>2</sub> emission monitoring systems on the cost structure of international maritime transport**

**Annotation.** The relevance of this research is determined by the tightening of international environmental regulations on maritime transport, particularly the introduction of MRV and DCS systems that assess the level of CO<sub>2</sub> emissions and the energy efficiency of vessels. As maritime transport accounts for over 80% of global trade, it has become a focal point of climate regulation, where environmental responsibility is increasingly tied to the economic resilience of shipping operators. The need to integrate environmental standards into financial and operational strategies forms new scientific tasks aimed at assessing the impact of MRV and DCS on cost structure and fleet competitiveness.

The purpose of this article is to determine the impact of CO<sub>2</sub> emission monitoring systems on the cost structure of international maritime transport and to develop approaches for optimizing shipping company expenses under the conditions of stricter environmental regulation and energy efficiency requirements.

---

<sup>1</sup> магістр, морський суперінтендант, [tolobaev9@gmail.com](mailto:tolobaev9@gmail.com)

**Methodology.** The study applies systemic and comparative approaches that made it possible to analyze the legal and economic mechanisms of MRV and DCS implementation, identify their influence on operational cost structures, and assess the relationship between vessel energy efficiency, transportation cost, and market competitiveness. Economic analysis, synthesis, and structural modeling methods were used to identify key cost-growth factors and quantify their economic effects.

**Results.** It has been established that the implementation of MRV and DCS systems forms a new cost configuration for shipping companies, including environmental monitoring, digital auditing, measurement equipment maintenance, and fleet modernization. The study revealed that a 5–7% increase in vessel energy efficiency can reduce total operating costs by 8–10%. It was demonstrated that MRV and DCS enhance transparency in the maritime sector but simultaneously generate financial, technical, and organizational challenges - such as duplicated reporting, staff shortages, and high capital intensity of technological upgrades.

**Conclusions.** It has been proven that environmental responsibility and economic sustainability in maritime transport can be effectively reconciled through digital cost-management systems integrated with MRV and DCS, complemented by green budgeting mechanisms and incentive programs for fleet modernization.

**Prospects for further research.** Future studies should focus on developing quantitative models for forecasting cost dynamics considering energy efficiency and carbon-credit pricing, as well as exploring the potential of artificial intelligence and blockchain technologies to automate MRV and DCS processes within the framework of global maritime climate governance.

**Keywords:** vessel energy efficiency, carbon regulation, digital monitoring, environmental costs, maritime logistics, sustainable fleet, economic resilience, green budgeting.

### Вступ

Проблема зниження викидів вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) в міжнародному морському транспорті набуває стратегічного значення в контексті глобальної кліматичної політики та переходу до низьковуглецевої економіки. Морські перевезення залишаються одним із важливих елементів світової логістики, забезпечуючи понад 80 % міжнародної торгівлі, проте водночас є суттєвим джерелом антропогенних викидів CO<sub>2</sub>. Запровадження систем моніторингу, звітності та верифікації викидів (Monitoring, Reporting and Verification, MRV) у межах Європейського Союзу, а також системи збору даних (Data Collection System, DCS) відповідно до вимог Міжнародної морської організації (International Maritime Organization, IMO) створює нові умови для функціонування судноплавних компаній, що потребують значних фінансових, організаційних і технологічних адаптацій. Проблема полягає у визначенні взаємозв'язку між екологічними вимогами та економічними результатами судноплавної діяльності, оскільки впровадження систем моніторингу впливає не лише на собівартість перевезень, але й на конкурентоспроможність флоту, структуру тарифів і логістику паливного споживання. З наукового погляду, актуальним є розроблення методології кількісної оцінки цього впливу з урахуванням різних типів суден, маршрутів і рівня енергоефективності. У практичному вимірі дослідження спрямоване на обґрунтування шляхів інтеграції систем моніторингу в операційні та фінансові стратегії морських перевізників, що дозволить сформулювати збалансовану модель управління екологічними ризиками без зниження економічної результативності міжнародних транспортних операцій.

Аналіз сучасних досліджень дає змогу виокремити чотири взаємопов'язані наукові напрями, що відображають еволюцію підходів до вимірювання, управління та економічної оцінки декарбонізації морського транспорту.

Перший напрям охоплює наукові розвідки, пов'язані з методологією вимірювання та цифровою архітектурою систем моніторингу. Зокрема, Ф. Каммін та співавтори (P. Cammin et al.) аналізують практику моніторингу викидів у морських портах, де інтеграція сенсорних систем, AIS-даних і аналітики в реальному часі сприяє скороченню часу простою суден та підвищенню паливної ефективності, проте формує додаткові витрати на верифікацію й обслуговування IT-інфраструктури, що безпосередньо входять до собівартості рейсу [1]. Комплексний аналіз методів вимірювання викидів у транспорті, що доводить значну відмінність у точності між прямими вимірюваннями та розрахунковими моделями, від якої залежать як фінансові ризики штрафів, так і розмір страхових надбавок судновласників, здійснюють Н. Ф. Ф. Якоб та колеги (N. F. F. Yaacob et al.) [2]. Інструменти ринкових механізмів систематизують С. Лагувардоу та однодумці (S. Lagouvardou et al.), підкреслюючи, що їхня ефективність залежить від стандартизації процедур MRV, без якої неможливо забезпечити порівнянність і достовірність даних для економічних розрахунків [3]. Підходи до підвищення енергоефективності суден узагальнює колектив науковців на чолі з Х. Баррейро (J. Barreiro et al.), акцентуючи на економічному ефекті цифрових систем моніторингу та впровадженні альтернативних видів палива [4]. Вплив запровадження системи торгівлі викидами в морському секторі на перерозподіл флоту, операційні витрати та стратегії судновласників щодо скорочення викидів CO<sub>2</sub> через оптимізацію маршрутів і підвищення енергоефективності суден аналізують М. Жу та співавтори (M. Zhu et al.) [4].

Другий напрям стосується напрацювань, пов'язаних із політичними й ринковими механізмами декарбонізації, які конвертують дані систем MRV та DCS у фінансові сигнали. Взаємозв'язок між політичними сценаріями декарбонізації та собівартістю перевезень розкривають Р. Халім та співавтори (R. Halim et al.), підкреслюючи, що підвищення ціни вуглецю на основі MRV-даних збільшує короткострокові витрати, але стимулює модернізацію флоту й зниження паливної залежності [5]. Науковець Ф. Каммін та колеги (P. Cammin et al.) засвідчують, що застосування даних у реальному часі для оптимізації швидкісних режимів та управління підходами до причалів дозволяє зменшити надлишкові викиди, водночас компенсуючи витрати, спричинені політикою карбонового ціноутворення [6]. Дослідники Г. Танака (H. Tanaka) та А. Окада (A. Okada) доводять, що ефективність ринкових заходів суттєво залежить від повноти покриття MRV/DCS циклу «рейс-порт» і від узгодженості портових екологічних стандартів, що визначає прогнозованість операційних витрат [7].

Третій напрям охоплює наукові праці, пов'язані з оцінюванням екологічних індикаторів і зовнішніх ефектів, що визначають непрямий вплив моніторингу на структуру витрат. Модель оцінювання екологічних індикаторів сталого морського транспорту, у якій MRV-дані використовуються для розрахунку портових KPI, що надалі формують диференційовані тарифні стимули для «зелених» суден, пропонують Л. Перес Лесп'єр та однодумці (L. Pérez Lespier et al.) [8]. Методики оцінювання зовнішніх витрат від викидів у портах аналізують М. Тіхавська (M. Tichavska) та Б. Товар (B. Tovar), демонструючи, що розбіжності в підходах до монетизації шкоди докільню впливають на стабільність фінансового планування судноплавних компаній [9]. Науковиця Ф. Дін та співавтори (F. Deane et al.) акцентують на тому, що підвищення прозорості й відтворюваності MRV-даних зменшує регуляторний ризик і, відповідно, знижує витрати комплаєнсу та страхування [10].

Четвертий напрям стосується досліджень технологічних, паливних та цифрових рішень, через які MRV/DCS впливають на собівартість у межах життєвого циклу суден. Вчена І. Заман та колеги (I. Zaman et al.) доводять, що впровадження аналітики великих даних у процеси судноплавства створює додаткові капітальні та операційні витрати на інформаційну інфраструктуру, але водночас забезпечує довгострокову економію завдяки автоматизації управління енергоефективністю [11]. Політичні та технічні

рішення з декарбонізації галузі систематизують З. Ван та співавтори (Z. Wan et al.), доводячи, що їхня ефективність здебільшого визначається якістю MRV/DCS-даних, необхідних для валідації технічних інновацій [12]. Потенціал аміаку як морського палива вивчають Дж. Ханссон та колектив однодумців (J. Hansson et al.), показуючи, що точні MRV-вимірювання є критичними для розрахунку «well-to-wake» витрат і для визначення економічної доцільності переходу на альтернативні енергоносії [13].

Попри значний прогрес у впровадженні систем MRV та DCS, залишаються нерозв'язаними питання їх узгодженості, методики оцінки впливу на собівартість перевезень і визначення економічного ефекту енергоефективності суден. Недостатньо досліджено взаємозв'язок між екологічними вимогами та фінансовими моделями управління витратами, а також відсутні уніфіковані підходи до аналізу витрат на впровадження моніторингових систем у різних сегментах флоту. Запропоноване дослідження заповнює ці прогалини шляхом розроблення аналітичної моделі оцінювання впливу MRV і DCS на структуру витрат і конкурентоспроможність судноплавних компаній. Визначено напрям удосконалення системи управління витратами через інтеграцію екологічного моніторингу, цифрову аналітику та енергоефективні інновації, що забезпечує поєднання екологічної відповідальності з економічною стійкістю міжнародного судноплавства.

Мета статті полягає у визначенні впливу систем моніторингу викидів CO<sub>2</sub> на формування собівартості міжнародних морських перевезень та обґрунтуванні шляхів підвищення їхньої економічної ефективності в умовах екологічного регулювання судноплавства.

Для досягнення мети сформульовано такі завдання:

- 1) проаналізувати вплив систем MRV та DCS на формування екологічних вимог і економічну трансформацію судноплавства;
- 2) оцінити зміни у структурі витрат та взаємозв'язок енергоефективності суден із собівартістю перевезень і конкурентоспроможністю флоту;
- 3) виявити основні перешкоди впровадження MRV і DCS та обґрунтувати модель управління витратами, що поєднує екологічну й економічну стійкість морських перевезень.

### Результати

Системи MRV та DCS є основними інструментами реалізації міжнародної екологічної політики у сфері морського транспорту, спрямованими на скорочення викидів вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) відповідно до вимог IMO та ЄС. Їхня робота ґрунтується на принципах прозорості, порівнюваності й достовірності даних про викиди, що формуються під час експлуатації суден. Система MRV, запроваджена ЄС, зобов'язує операторів суден здійснювати щорічний моніторинг споживання палива, відстані, вантажообігу та пов'язаних із цим викидів CO<sub>2</sub> для рейсів, що виконуються до, з або між портами ЄС. Натомість DCS, розроблена IMO, охоплює глобальний рівень і передбачає збір узагальнених даних про енергоефективність суден для створення міжнародної бази кліматичної звітності. Обидві системи забезпечують основу для аналітичного оцінювання впливу морського транспорту на довкілля, але водночас формують новий витратний контур діяльності судноплавних компаній через потребу у встановленні вимірального обладнання, розробленні цифрової звітності та проведенні незалежної верифікації (табл. 1).

**Порівняльна характеристика систем MRV та DCS у міжнародному морському транспорті**

<b>Параметр</b>	<b>Система MRV (ЄС)</b>	<b>Система DCS (ІМО)</b>
Орган регулювання	Європейська комісія	Міжнародна морська організація
Географічне охоплення	Порти ЄС та рейси до/з них	Усі міжнародні рейси суден від 5 000 GT і вище
Основні дані моніторингу	Споживання палива, відстань, вантажообіг, викиди CO <sub>2</sub>	Споживання палива, тип двигуна, енергоефективність, тоннаж
Періодичність звітності	Щорічно до 30 квітня наступного року	Щорічно через адміністрацію держави прапора
Перевірка даних	Незалежна верифікація акредитованим аудитором	Адміністративний контроль держави прапора
Мета впровадження	Контроль за дотриманням кліматичних зобов'язань ЄС	Формування глобальної бази енергоефективності судноплавства

Джерело: сформовано автором на основі [5; 9, с. 389–392; 10, с. 260–262; 12, с. 430–432]

У сучасній практиці міжнародного судноплавства системи MRV та DCS є інструментами не лише екологічного, а й економічного регулювання діяльності морських операторів. Їх застосування забезпечує перехід від декларативного підходу до вимірюваної кліматичної відповідальності, де кожен рейс генерує верифікований масив даних про споживання енергії та інтенсивність викидів. На рівні MRV дані агрегуються в межах ЄС для визначення карбонової ефективності суден і подальшого розрахунку участі морського сектору в Системі торгівлі викидами (EU Emissions Trading System, EU ETS) [5]. У межах DCS ці дані інтегруються в глобальну базу ІМО, що дозволяє визначати динаміку енергоефективності світового флоту та формувати нормативи для нових поколінь суден. На практиці обидві системи стимулюють судовласників інвестувати в модернізацію двигунів, використання альтернативних видів палива, зокрема зрідженого природного газу, біопалива, аміаку, та впровадження цифрових платформ для контролю рейсів у реальному часі. Водночас вони створюють нову структуру витрат – від підготовки сертифікованих аудиторських звітів до технічного оновлення бортового обладнання [12, с. 430–432]. Таким чином, MRV і DCS формують новий тип операційної логіки в морській галузі, де екологічна прозорість перетворюється на елемент конкурентної переваги та передумову допуску до міжнародних транспортних ринків.

Запровадження систем MRV та DCS суттєво трансформувало структуру витрат судноплавних компаній, оскільки контроль за CO<sub>2</sub> став не лише екологічною, а й фінансово-економічною категорією. Якщо раніше основними складниками собівартості перевезень залишалися витрати на паливо, екіпаж, технічне обслуговування та портові збори, то після впровадження MRV та DCS до цієї структури додалися нові елементи, пов'язані з екологічним моніторингом, цифровим аудитом і звітністю. Судовласники змушені інвестувати у вимірювальне обладнання, сертифіковані аналітичні програми, послуги незалежних аудиторів та інформаційно-комунікаційні технології, що забезпечують автоматичне передавання даних про рейси й споживання палива. Одночасно спостерігається ефект опосередкованого зростання експлуатаційних витрат

через необхідність дотримання вуглецевих нормативів, які стимулюють модернізацію флоту, використання альтернативних палив і підвищення енергоефективності. Унаслідок цього витратна модель судноплавних компаній набуває більш складної, багаторівневої структури, у якій екологічні компоненти поступово інтегруються в загальну систему фінансового планування (табл. 2).

Таблиця 2

**Зміни у структурі витрат судноплавних компаній під впливом систем MRV та DCS**

Стаття витрат	До впровадження систем MRV/DCS	Після впровадження систем MRV/DCS	Економічний ефект
Паливо	Основна частка собівартості (до 50 %)	Частка знижується завдяки енергоефективним технологіям, але зростає ціна на «чисте» паливо	Зміщення структури витрат у бік екологічних енергоносіїв
Технічне обслуговування	Регламентні ремонти	Додаткове обслуговування вимірювальних систем, калібрування датчиків	Збільшення регулярних операційних витрат
Адміністративні витрати	Менеджмент і логістика	Додані витрати на звітність, аудит, верифікацію даних	Формування нового класу «екологічних витрат»
Інформаційні технології	Мінімальне використання	Упровадження цифрових систем збору, аналізу та передавання даних	Зростання капітальних інвестицій у цифрову інфраструктуру
Енергоефективні інновації	Не обов'язкові	Вимога регуляторів, інвестиції в модернізацію двигунів, покриттів корпусу, альтернативне паливо	Підвищення довгострокової ефективності, але короткострокове зростання витрат

Джерело: сформовано автором на основі [1; 6, с. 35–37; 7, с. 65–67; 11, с. 540–542; 12, с. 432–434].

У сучасній практиці міжнародного судноплавства зміна структури витрат під впливом систем MRV та DCS свідчить про формування нової економіко-екологічної парадигми функціонування флоту. У традиційній моделі витрати переважно мали операційний та короткостроковий характер, тоді як сучасні екологічні витрати набувають стратегічного значення, трансформуючись в інвестиції в конкурентоспроможність і доступ до «зелених» ринків перевезень [1]. Реальні кейси судноплавних компаній демонструють, що початкові витрати на впровадження моніторингових технологій – від установа паливних витратомірів до інтеграції бортових телематичних систем – окуповуються протягом 3–5 років завдяки зниженню неефективного споживання палива та оптимізації рейсових логістичних схем. У межах MRV дані про викиди безпосередньо впливають на розрахунок обсягів квот і податкових платежів у рамках Системи торгівлі викидами ЄС (EU Emissions Trading System, EU ETS) [14], що стимулює операторів переходити на судна з меншим карбоновим слідом. У

межах DCS, навпаки, накопичення глобальної статистики дозволяє визначати середньогалузеві орієнтири енергоефективності (Energy Efficiency Existing Ship Index, EEI) [15], які стають базою для фінансових рейтингів та доступу до зелених кредитів. Так, зростання частки екологічних витрат у собівартості морських перевезень є не лише наслідком регуляторного тиску, а проявом ринкової трансформації, де екологічна звітність перетворюється на важливий актив у взаєминах із банками, страховими компаніями та вантажовідправниками. Як наслідок, судноплавство переходить від традиційної моделі витрат до системи управління «вуглецевим капіталом», де фінансові рішення прямо залежать від кліматичної ефективності флоту.

У сучасних умовах судноплавства вплив рівня енергоефективності суден на собівартість перевезень і конкурентоспроможність флоту набув вирішального значення. Під енергоефективністю розуміємо здатність судна здійснювати перевезення вантажів із мінімальним споживанням енергії на одиницю транспортної роботи, при цьому зниження споживання палива безпосередньо зменшує витрати судновласника, оскільки паливо складає одну з основних статей собівартості. Водночас висока енергоефективність підвищує конкурентоспроможність флоту на міжнародному ринку перевезень, оскільки дозволяє пропонувати нижчі тарифи, залучати клієнтів зі стійкішими екологічними вимогами, покращувати імідж судноплавної компанії та знижувати ризики, пов'язані з посиленими екологічними регулюваннями. На практиці ефект проявляється через скорочення паливних витрат, оптимізацію режиму руху, зменшення часу простою та підвищення завантаженості, що в сукупності зменшує собівартість на тонно-мілю вантажу. Проте, варто зауважити, що інвестиції в модернізацію суден, упровадження новітніх технологій корпусу, двигунів та систем моніторингу формують додаткові капітальні витрати, які на початкових етапах можуть підвищувати собівартість перевезень, але в середньо- та довгостроковій перспективі забезпечують економію та створюють конкурентну перевагу (табл. 3).

Таблиця 3

**Вплив рівня енергоефективності суден на собівартість перевезень і конкурентоспроможність флоту**

<b>Показник</b>	<b>Низька енергоефективність</b>	<b>Висока енергоефективність</b>	<b>Вплив на собівартість і конкурентоспроможність</b>
Паливні витрати	Високі через більше споживання палива	Знижені завдяки оптимізації режимів і технологій	Пряма економія витрат, зниження собівартості на одиницю перевезення
Інвестиції в технології	Мінімальні або відтерміновані	Високі початкові витрати на модернізацію	Зростання капітальних витрат у короткостроковій перспективі, зниження – в довгостроковій
Тарифна конкурентоспроможність	Обмежені можливості для зниження ціни	Більша гнучкість у встановленні тарифів	Покращення конкурентного положення на ринку, приваблення екологічно чутливих клієнтів
Екологічні ризики	Високі – відповідність нормативам проблематична	Низькі – краща готовність до регулювання	Менше штрафів, ринкових обмежень, доступ до «зелених» сегментів ринку
Утилізація перевезень / завантаженість	Частіше неповна завантаженість	Максимальна завантаженість,	Краща рентабельність та економічна ефективність флоту

		оптимальні маршрути	
--	--	---------------------	--

Джерело: сформовано автором на основі [3; 8, с. 372–375; 9, с. 398–400; 13].

Рівень енергоефективності суден у сучасному морському транспорті є не лише технічним показником, а й інтегральним індикатором стратегічної стійкості флоту. Практичні спостереження свідчать, що навіть незначне підвищення енергоефективності на рівні 5–7 % здатне зменшити собівартість перевезень на 8–10 %, що безпосередньо впливає на конкурентоспроможність судноплавних компаній у глобальних логістичних ланцюгах [8, с. 372–374; 13]. У провідних операторів, таких як Maersk, ONE чи Hapag-Lloyd, підвищення енергоефективності реалізується через концепцію «енергетичного управління флотом», коли дані про споживання палива, гідродинамічний опір і погодні умови аналізуються в режимі реального часу за допомогою цифрових платформ типу Fleet Data та Voyage Optimization Systems. Це дозволяє скорочувати витрати та прогнозувати паливний баланс і карбонову інтенсивність на кожен рейс.

У системі MRV такі параметри безпосередньо впливають на вартість квот у межах Системи торгівлі викидами ЄС, тоді як у межах DCS вони стають основою для розрахунку показника енергоефективності наявних суден (Energy Efficiency Existing Ship Index, EEXI) і щорічного коефіцієнта експлуатаційної ефективності (Carbon Intensity Indicator, CII) [5]. Судна з низькими показниками EEXI та CII ризикують отримати обмеження на експлуатацію або втратити доступ до «зелених» фінансових інструментів, що безпосередньо позначається на їхній економічній доцільності [12, с. 432–433; 10, с. 260–262]. На практиці впровадження високоефективних технологій, таких як системи рекуперації тепла, повітряне змащення корпусу, цифрове управління двигунами та використання гібридних енергетичних установок, забезпечує довгострокове скорочення операційних витрат і створює передумови для стратегічної переваги на ринку фрахту. Таким чином, енергоефективність перетворюється з технологічного параметра на мультиплікативний економічний чинник, що визначає не лише собівартість перевезень, а й місце компанії в глобальній ієрархії сталого судноплавства.

Проте функціонування систем MRV та DCS супроводжується низкою системних проблем, що ускладнюють їх ефективну реалізацію на рівні судноплавних операторів. Насамперед технічні перешкоди проявляються у відсутності стандартизованих методів вимірювання викидів і різномірності бортових систем контролю, які часто несумісні з централізованими платформами передачі даних [2; 11, с. 541–543]. Багато суден, особливо побудованих до 2010 року, не мають необхідної інфраструктури для встановлення точних паливних витратомірів чи телеметричних модулів, що призводить до помилок у моніторингу та зниження достовірності звітності [9, с. 398–400]. Додаткову складність створює фрагментація програмного забезпечення: різні компанії використовують власні алгоритми розрахунку енергоефективності, які не завжди відповідають вимогам ЄС чи ІМО.

Організаційні проблеми зумовлені відсутністю уніфікованих процедур взаємодії між судовласниками, аудиторами, державами прапора та верифікаційними органами. Унаслідок цього значна частина процесів моніторингу та верифікації здійснюється вручну, що збільшує ризик затримок і неточностей [4]. Також спостерігається кадровий дефіцит фахівців, здатних здійснювати коректну інтерпретацію даних про викиди, особливо в малих та середніх судноплавних компаніях, які не мають власних аналітичних підрозділів.

Фінансові перешкоди мають комплексний характер. Первинні витрати на впровадження систем MRV та DCS передбачають придбання обладнання, підключення до цифрових платформ, послуги акредитованих аудиторів і регулярне оновлення програмного забезпечення [11, с. 542–543]. Для середнього тоннажу флоту ці витрати

становлять від 50 до 150 тисяч євро на одне судно, що є істотним навантаженням для операторів із низькою маржинальністю перевезень. Додатково фінансові ризики посилюються тим, що екологічні інвестиції не завжди мають безпосередній короткостроковий ефект, а система стимулів для зменшення викидів, зокрема в межах Системи торгівлі викидами ЄС, перебуває на етапі формування.

Проблемним аспектом є також відмінність у регуляторних підходах: MRV базується на суворих стандартах звітності ЄС, тоді як DCS має більш агрегований характер і допускає різні методики збору даних [10, с. 264–265; 12, с. 434–435]. Це створює ризик дублювання звітності, підвищує адміністративне навантаження та знижує мотивацію операторів до участі в обох системах одночасно [9, с. 390–392]. Відсутність інтеграції між MRV і DCS, обмежена сумісність баз даних та неузгодженість форматів передачі інформації перешкоджають створенню єдиного інформаційного простору морського екологічного моніторингу [11, с. 543–544]. Як наслідок, системи, покликані забезпечити прозорість і достовірність екологічних даних, наразі функціонують у режимі часткової ефективності, де високий рівень нормативних вимог не завжди супроводжується належною технічною та фінансовою спроможністю їх виконання.

Формування ефективної MRV та збору даних DCS потребує інтегрованого підходу, що поєднує економічні механізми оптимізації собівартості перевезень з екологічними стимулами сталого розвитку. Практична реалізація такої моделі має ґрунтуватися на концепції «енергоекономічного циклу судноплавства», у межах якого фінансові рішення приймаються на основі даних про паливну ефективність, вуглецеву інтенсивність та довгострокові витрати життєвого циклу судна. Важливим інструментом має стати цифрова система управління витратами, інтегрована з MRV та DCS, що забезпечує автоматичне оновлення даних про споживання палива, маршрутну ефективність і викиди, дозволяючи ухвалювати рішення в реальному часі.

З економічного погляду, ефективність досягається через диверсифікацію джерел енергозабезпечення суден, зокрема поступовий перехід до використання альтернативних видів палива – зрідженого природного газу, метанолу, аміаку або біопалива, які, попри вищу вартість, зменшують податкове навантаження в межах Системи торгівлі викидами ЄС. Важливим складником є впровадження механізму «зеленого бюджетування» – внутрішньої системи обліку, що виокремлює екологічно орієнтовані витрати в сегмент фінансової звітності та дозволяє точно оцінювати ефективність енергетичних інвестицій. Паралельно необхідно застосовувати економетричні моделі прогнозування собівартості, які враховують коливання цін на паливо, валютний курс, вартість квот та технічне оновлення флоту.

Організаційно модель має спиратися на принципи адаптивного управління – створення внутрішніх відділів екологічної аналітики або залучення спеціалізованих консалтингових структур для супроводу моніторингових процедур. Такі відділи забезпечують узгодженість технічних даних із фінансовими показниками, інтегруючи звіти MRV/DCS у стратегічне планування. У практиці провідних операторів використовується підхід «performance-based management», коли бонуси екіпажу та менеджменту частково залежать від досягнутих показників енергоефективності та скорочення викидів.

На рівні державної політики та міжнародного регулювання доцільним є створення стимулювального механізму фінансової підтримки судноплавних компаній, які впроваджують технології зниження викидів. Йдеться про податкові пільги на модернізацію флоту, пільгове кредитування через зелені фонди ЄС або міжнародні фінансові інституції (наприклад, Європейський інвестиційний банк), а також про створення єдиного цифрового простору MRV/DCS із відкритим доступом до агрегованих даних для аналітичних і наукових цілей.

У підсумку ефективна модель управління витратами в морському транспорті має бути побудована на трьох рівнях: технологічному – впровадження інноваційних рішень для підвищення енергоефективності; організаційному – інтеграція моніторингових і фінансових систем в єдину цифрову екосистему; економічному – формування гнучкої системи стимулів, що дозволяє одночасно досягати прибутковості та відповідності екологічним стандартам. Такий підхід забезпечить перехід міжнародного судноплавства до моделі сталого зростання, у якій екологічна відповідальність є не витратним, а конкурентним чинником економічної стійкості.

### Висновки

У процесі дослідження встановлено, що системи MRV і DCS є основними механізмами екологічного регулювання в міжнародному морському транспорті, впливаючи одночасно на рівень енергоефективності суден і структуру їхніх витрат. Їх впровадження забезпечує підвищення прозорості кліматичної звітності, формує базу для розрахунку викидів CO<sub>2</sub> і створює умови для участі морського сектору в Системі торгівлі викидами ЄС. Визначено, що MRV та DCS стимулюють перехід судноплавних компаній до стратегічного управління енергетичними ресурсами, проте супроводжуються зростанням витрат на обладнання, цифрову звітність і аудит.

Виявлено основні проблеми реалізації систем, зокрема технічну несумісність обладнання, відмінності методологій між ЄС і Міжнародною морською організацією, відсутність фахівців із верифікації, а також значні початкові фінансові витрати, які створюють ризики для операторів середнього тоннажу. Наявність дублювання звітності й фрагментації баз даних обмежує ефективність моніторингу та ускладнює узгодження єдиних стандартів енергоефективності.

Рекомендовано впроваджувати інтегровану модель управління витратами, що поєднує цифрову аналітику, використання альтернативних видів палива, систему «зеленого бюджетування» та стимулювальні інструменти екологічної відповідальності. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням кількісних моделей оцінки взаємозв'язку між енергоефективністю, собівартістю перевезень і вуглецевими витратами, а також із вивченням потенціалу цифрових технологій і штучного інтелекту для автоматизації MRV і DCS у межах глобальної системи сталого судноплавства.

### Список використаних джерел

1. Cammin P., Yu J., Heilig L., Voß S. Monitoring of air emissions in maritime ports. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020. Vol. 87. Article 102479. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102479>
2. Yaacob N. F. F., Yazid M. R. M., Maulud K. N. A., Basri N. E. A. A review of the measurement method, analysis and implementation policy of carbon dioxide emission from transportation. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. № 14. Article 5873. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12145873>
3. Lagouvardou S., Psaraftis H. N., Zis T. A literature survey on market-based measures for the decarbonization of shipping. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. № 10. Article 3953. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12103953>
4. Zhu M., Yuen K. F., Ge J. W., Li K. X. Impact of maritime emissions trading system on fleet deployment and mitigation of CO<sub>2</sub> emission. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018. Vol. 62. P. 474–488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.03.016>
5. Halim R. A., Kirstein L., Merk O., Martinez L. M. Decarbonization pathways for international maritime transport: A model-based policy impact assessment. *Sustainability*. 2018. Vol. 10. № 7. Article 2243. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10072243>
6. Cammin P., Sarhani M., Heilig L., Voß S. Applications of real-time data to reduce air emissions in maritime ports. *Design, User Experience, and Usability. Case Studies in Public and*

*Personal Interactive Systems: 9th International Conference, DUXU 2020, Held as Part of the 22nd HCI International Conference, HCII 2020 (Copenhagen, Denmark, July 19–24, 2020). Part III.* Cham: Springer, 2020. P. 31–48. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49757-6\\_3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49757-6_3_1)

7. Tanaka H., Okada A. (2019). Effects of market-based measures on a shipping company: Using an optimal control approach for long-term modeling. *Research in Transportation Economics*. Vol. 73. P. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2019.01.006>

8. Pérez Lespier L., Long S., Shoberg T., Corns S. A model for the evaluation of environmental impact indicators for a sustainable maritime transportation systems. *Frontiers of Engineering Management*. 2019. Vol. 6. № 3. P. 368–383. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42524-019-0004-9>

9. Tichavska M., Tovar B. External costs from vessel emissions at port: a review of the methodological and empirical state of the art. *Transport Reviews*. 2017. Vol. 37. № 3. P. 383–402. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1279694>

10. Deane F., Huggins A., Karim M. S. Measuring, monitoring, reporting and verification of shipping emissions: Evaluating transparency and answerability. *Review of European, Comparative & International Environmental Law*. 2019. Vol. 28. № 3. P. 258–267. DOI: <https://doi.org/10.1111/reel.12308>

11. Zaman I., Pazouki K., Norman R., Younessi S., Coleman S. Challenges and opportunities of big data analytics for upcoming regulations and future transformation of the shipping industry. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 194. P. 537–544. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.182>

12. Wan Z., El Makhoulfi A., Chen Y., Tang J. Decarbonizing the international shipping industry: Solutions and policy recommendations. *Marine Pollution Bulletin*. 2018. Vol. 126. P. 428–435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.064>

13. Hansson J., Brynolf S., Fridell E., Lehtveer M. The potential role of ammonia as marine fuel—based on energy systems modeling and multi-criteria decision analysis. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. № 8. Article 3265. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12083265>

14. Reducing emissions from the shipping sector. *European Commission – Climate Action: вебсайт*. 2021. URL: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-shipping-sector\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-shipping-sector_en) (дата звернення: 12.07.2022).

15. EEXI And CII: Dual Regulations Reducing Ship's Carbon Impact. *Marine digital: вебсайт*. 2021. URL: [https://marine-digital.com/article\\_eexiandcii](https://marine-digital.com/article_eexiandcii) (дата звернення: 04.11.2021).