

## МЕТОДИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ЛАНЦЮГІВ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ З АВІАЦІЙНОЮ СКЛАДОВОЮ

**О.Є. Соколова**

к.е.н., доцент, доцент кафедри транспортних технологій і систем,  
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна  
ORCID ID: 0000-0001-6341-0195

### *Анотація*

Довготривала війна в Україні, геополітична нестабільність на Близькому Сході, санкційні транспортні обмеження та заборони стали причинами зміни просторової структури глобальних ланцюгів постачання, збільшення протяжності маршрутів та перевантаження транспортно-логістичної інфраструктури європейських країн. У цих умовах зростає роль мультимодальних ланцюгів доставки вантажів як функціональних підсистем інтегрованих транспортно-логістичних систем (ІТЛС) у межах яких переміщення вантажу від пункту відправлення до пункту призначення здійснюється із залученням декількох видів транспорту, зокрема авіаційного. Саме авіаційний транспорт забезпечує скорочення тривалості перевезення та підвищує гнучкість транспортно-логістичних рішень, що має особливе значення під час доставки гуманітарних, медичних, швидкопсувних вантажів та товарів з коротким життєвим циклом. Встановлено, що наявні наукові підходи зосереджені переважно на окремих аспектах управління ланцюгами постачання, використання авіаційного транспорту у логістичних схемах доставки вантажів, екологічних характеристиках перевезень та імітаційному моделюванні транспортно-логістичних процесів, проте недостатньо висвітлюють питання ефективності мультимодальних рішень з авіаційним сегментом.

У статті розроблено методичні положення оцінювання мультимодальних ланцюгів доставки вантажів з авіаційною складовою на основі їх мережевої структуризації в межах ІТЛС, з урахуванням вартісних, часових та екологічних характеристик транспортно-логістичного циклу. Обґрунтовано, що часові параметри окремих транспортно-логістичних процедур, насамперед в аеропортових вузлах, мають стохастичну природу, тому для визначення ймовірності виконання перевізного процесу в межах заданого інтервалу доцільно застосовувати імітаційне моделювання.

Для апробації запропонованих методичних положень у програмному середовищі AnyLogistix розроблено імітаційну модель ланцюга доставки вантажів між Шанхаєм та Києвом, для якої сформовано альтернативні варіанти перевезення із різним поєднанням видів транспорту на окремих ділянках маршруту. Результати моделювання показали, що залучення авіаційного транспорту суттєво скорочує тривалість доставки, проте супроводжується зростанням витрат та екологічного навантаження, що свідчить про необхідність врахування не лише прямих

транспортних витрат на етапі оцінювання ефективності таких ланцюгів, а й непрямих економічних ефектів, пов'язаних з тривалістю повного транспортно-логістичного циклу, оборотністю ресурсів та часовою чутливістю вантажопотоків. Отримані дані підтвердили можливість використання запропонованого підходу для оцінювання альтернативних схем доставки вантажів, зокрема чутливих до тривалості перевезення, в умовах нестабільного середовища та інфраструктурних обмеженнях. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення концептуальних положень багатокритеріальної оптимізації структури мультимодального ланцюга доставки в ІТЛС із застосуванням структурно-функціонального підходу.

**Ключові слова:** інтегрована транспортно-логістична система, мультимодальний ланцюг доставки вантажів, авіаційний транспорт, мережева структура, вартісні, часові та екологічні показники, імітаційне моделювання, AnyLogistix.

## METHODOLOGICAL FRAMEWORK FOR EVALUATING MULTIMODAL CARGO DELIVERY CHAINS WITH AN AIR TRANSPORT COMPONENT

**O.Ye. Sokolova**

PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Transport Technologies and Systems Department,  
State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0001-6341-0195

### **Summary**

*The prolonged war in Ukraine, geopolitical instability in the Middle East, transport sanctions, and restrictions have caused changes in the spatial structure of global supply chains, increased route lengths, and overloaded the transport and logistics infrastructure of European countries. Under these conditions, the role of multimodal cargo delivery chains as functional subsystems of integrated transport and logistics systems (ITLS) is increasing, within which cargo is transported from the point of origin to the destination using several modes of transport, including air transport. Air transport ensures shorter transit times and enhances the flexibility of transport and logistics decisions, which is particularly important for the delivery of humanitarian, medical, and perishable cargoes, as well as goods with a short life cycle. It has been found that existing scientific approaches are mainly focused on individual aspects of supply chain management, the use of air transport in logistics delivery schemes, the environmental characteristics of transportation, and the simulation modeling of transport and logistics processes, but they do not sufficiently address the efficiency of multimodal solutions with an air segment.*

*The article proposes a methodological framework for evaluating multimodal cargo delivery chains with an air transport component based on their network structuring within integrated transport and logistics systems, with due regard to the cost, time, and environmental characteristics of the transport and logistics cycle. It is shown that the time parameters of individual transport and logistics procedures, especially at airport nodes, are stochastic in nature; therefore, simulation modeling is used to estimate the probability of completing the transportation process within a given time interval.*

*To test the proposed methodological provisions, a simulation model of a cargo delivery chain between Shanghai and Kyiv was developed in the AnyLogistix software environment, for which alternative transportation options with different combinations of transport modes along individual route segments were generated. The simulation results showed that the use of air transport significantly reduces delivery time, but is accompanied by increased costs and environmental burden, which indicates the need to take into account not only direct transport costs when assessing the efficiency of such chains, but also indirect economic effects related to the duration of the full transport and logistics cycle, resource turnover, and the time sensitivity of cargo flows. The experimental findings confirmed the possibility of using the proposed approach to evaluate alternative cargo transportation schemes, particularly those involving time-sensitive cargo, under conditions of operational instability and infrastructure constraints. Further research should be aimed at developing conceptual provisions for multicriteria optimization of the structure of a multimodal delivery chain in ITLS using a structural-functional approach.*

**Key words:** *integrated transport and logistics system, multimodal cargo delivery chain, air transport, network structure, cost, time and environmental indicators, simulation modeling, AnyLogistix.*

**Вступ.** Функціонування інтегрованих транспортно-логістичних систем (ІТЛС) у нестабільному зовнішньому середовищі підвищує роль мультимодальних технологій організації перевезень, що забезпечують узгоджену взаємодію різних видів транспорту, інфраструктурних елементів та технологічних процедур у межах єдиного транспортно-логістичного процесу. При цьому, ефективність ІТЛС визначається не лише техніко-технологічними параметрами окремих її ланок, а й рівнем координації організаційних рішень, синхронізації вантажопотоків та раціональністю розподілу ресурсів. Разом з тим, необхідною передумовою результативної діяльності ІТЛС є дотримання принципів сталого розвитку, що передбачає збалансування економічних, екологічних та соціальних орієнтирів та потребує включення екологічних обмежень безпосередньо до процесів транспортування, перевалки, зберігання, та обробки вантажів.

Практична реалізація наведених вище положень пов'язана з формуванням мультимодальних ланцюгів доставки вантажів як функціональних підсистем ІТЛС, у межах яких забезпечується переміщення вантажу від пункту відправлення до пункту призначення із залученням, як правило, декількох видів транспорту. Вагоме значення у таких ланцюгах має авіаційний транспорт, завдяки якому досягається скорочення тривалості перевізного процесу, підвищується гнучкість транспортно-логістичних рішень, що стає критично важливим, зокрема при обмеженій доступності повітряного простору, для здійснення прямої доставки гуманітарних, медичних, швидкопсувних вантажів, а також товарів з коротким життєвим циклом, що є особливо актуальним сьогодні для України. У цьому випадку аеропортові комплекси виконують функції не тільки інфраструктурних об'єктів, де здійснюється перевалка вантажів, але й стають ключовими вузловими елементами координації та синхронізації транспортних потоків у структурі мультимодальних схем транспортування.

Звідси виходить, що мультимодальний логістичний ланцюг доцільно розглядати як структурно організовану послідовність узгоджених процесів, завдяки

яким відбувається доставка вантажу між заданими пунктами з урахуванням техніко-технологічних, організаційних, ресурсних, а також екологічних обмежень, що визначають параметри взаємодії різних видів транспорту та вузлових системоутворювальних елементів ІТЛС.

Саме тому, представлення мультимодального ланцюга у такому вигляді потребує його структуризації з позицій просторової організації ІТЛС, що передбачає виокремлення його функціональних компонентів та встановлення формалізованих зв'язків між ними.

Концептуальною основою, при цьому, мають стати підходи, що не обмежуються використанням узагальнених інтегральних показників, агрегація яких призводить до втрати інформації, потрібної для проведення багатокритеріального аналізу, а також передбачають деталізовану параметризацію елементів транспортно-логістичного простору, що відображає багатofакторність мультимодальних ланцюгів доставки з авіаційною складовою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблеми організації ланцюгів постачання в умовах зростання невизначеності зовнішнього середовища, цифровізації та ускладнення взаємодії між окремими учасниками транспортно-логістичних процесів належать до важливих напрямів сучасних наукових досліджень. Так, методологічні основи управління ланцюгами постачання як ключової концепції процесів перевезення вантажів детально досліджуються в роботі С. Чопри та П. Майндла [1]. У свою чергу, Р. Меркерт підкреслює зростання значення авіаційного вантажного сегменту при проектуванні логістичних ланцюгів, особливо під впливом пандемічних обмежень, геополітичних викликів, розвитку електронної комерції та глобальних криз [2]. При цьому, К. Вонсовська визначає авіаційний транспорт, як один із основних елементів ланцюга доставки, що здатний забезпечувати його швидкість, гнучкість та адаптивність [3].

З метою оцінювання ефективності ланцюгів, що обслуговуються авіакомпаніями автором наукової праці [4] розроблено методику, що надає можливість враховувати інфраструктурні, операційні, економічні та екологічні чинники, що впливають на розвиток авіаційних вантажних перевезень. Разом з цим, українськими вченими І. Борець, О. Соколовою, О. Соловійовою та І. Висоцькою запропоновано теоретико-практичні положення застосування елементів мережевого планування та критеріїв прийняття рішень для вибору раціональної транспортно-технологічної схеми доставки вантажів за показниками вартості та часу [5].

Також, серед науковців значний інтерес викликають питання, присвячені сталому розвитку ланцюгів постачання із залученням авіаційного транспорту. Зокрема, авторами роботи [6] обґрунтовуються методичні засади проектування сталих ланцюгів та оптимізації взаємодії авіаційного та наземних видів транспорту на базі аеропортових комплексів. У праці [7] вивчається специфіка впливу авіаційних послуг на довкілля та пропонується модель заміни повітряних суден авіакомпанії на більш економічні типи літаків, що сприяє скороченню екологічного навантаження, та є важливим під час оцінювання транспортно-логістичних рішень.

Відзначимо, що у науковій літературі приділяється окрема увага застосуванню імітаційного моделювання для оптимізації та аналізу ланцюгів постачання. Так, С. Кім, Й. Чхой та С. Кім [8], а також Ц. Лю, Р. Ширакаші, Р. Камієбісу, Т. Ніші

та М. Мацуди [9] використовують даний інструмент для оцінювання ефективності альтернативних ланцюгів доставки та прийняття відповідних управлінських рішень. У праці [10] розроблено імітаційну модель, що дозволяє оптимізувати регіональну мережу ланцюгів постачання вантажів через логістичний аеропортовий хаб, зокрема з погляду скорочення витрат, зменшення порожніх пробігів автомобілів та підвищення адаптивності мережі до коливань попиту, але при цьому запропонований методичний апарат обмежується наземним сегментом транспортування та не враховує його інтеграцію з авіаційною складовою в межах єдиного ланцюга.

Отже, наведені наукові праці відображають різні аспекти дослідження ланцюгів постачання та мультимодальних перевезень, на основі яких можна виокремити основні методичні підходи, що застосовуються для оцінювання мультимодальних ланцюгів доставки вантажів. Зокрема, одним із найпоширеніших є вартісно-часовий метод, у межах якого альтернативні транспортно-технологічні схеми порівнюються за витратами перевезення, тривалістю доставки, витратами на перевалку, зберігання та виконання інших логістичних операцій [4,5]. Мережевий підхід передбачає формалізацію транспортно-логістичної системи як сукупності вузлів та зв'язків між ними та вибір оптимального маршруту за одним або декількома критеріями [5,9,10]. Окремі праці присвячені визначенню негативного впливу окремих видів транспорту на довкілля та обґрунтування рішень щодо зменшення екологічного навантаження [6,7]. Також, для дослідження поведінки складних транспортно-логістичних систем та процесів при змінних параметрах попиту, пропускної спроможності, тривалості технологічних процедур та режимів роботи окремих об'єктів інфраструктури активно використовується імітаційне моделювання [8-10].

Таким чином, проведений аналіз останніх досліджень свідчить про наявність значної кількості наукових публікацій в області управління ланцюгами постачання, залучення авіаційного транспорту до логістичних схем доставки вантажів, екологічних аспектів перевезень та застосування імітаційного моделювання транспортно-логістичних процесів. Проте зазначені методичні підходи у більшості робіт переважно розглядаються відокремлено. Так, вартісно-часові методики не завжди охоплюють екологічну складову, а імітаційні моделі здебільшого орієнтовані на окремі ланки логістичного ланцюга або наземний сегмент перевезення. Тому, недостатньо розкритими залишаються питання методичного забезпечення мережевої структуризації мультимодального ланцюга доставки вантажів з авіаційною складовою, комплексного оцінювання його вартісних, часових та екологічних характеристик, а також імітаційної перевірки альтернативних сценаріїв перевезення в умовах обмеженої доступності авіатранспортної інфраструктури. Саме це і обумовлює актуальність поставленої у даній роботі наукової проблеми та створює основу для її детального вивчення.

**Формулювання мети дослідження.** Метою статті є розроблення методичних положень щодо оцінювання мультимодальних ланцюгів доставки вантажів з авіаційною складовою на основі їх мережевої структуризації в межах ІТЛС, комплексного врахування вартісних, часових та екологічних характеристик транспортно-логістичного циклу, а також імітаційного моделювання альтернативних варіантів перевезення.

Для досягнення поставленої мети у цьому дослідженні поставлено та вирішуються такі завдання:

1) формалізувати структуру мультимодального ланцюга доставки вантажів з авіаційною складовою в межах ІТЛС із використанням мережевого підходу та визначити систему вартісних, часових та екологічних показників його оцінювання;

2) розробити імітаційну модель альтернативних варіантів перевезення вантажів з урахуванням стохастичної природи часових параметрів окремих транспортно-логістичних процедур;

3) провести порівняльний сценарний аналіз альтернативних схем доставки вантажів за вартісними, часовими та екологічними критеріями.

**Виклад основного матеріалу.** Просторову структуру ІТЛС доцільно формалізувати за допомогою мережевого підходу, що дозволяє відтворювати взаємозв'язки між інфраструктурними складовими системи та альтернативними варіантами перевезення вантажопотоків у вигляді орієнтованого графа [6]:

$$g = (N, A), \quad (1)$$

де множина вершин  $N$  відповідає вузловим елементам системи, до складу яких належать логістичні центри, транспортні термінали та аеропортові комплекси, тоді як множина дуг  $A$  відображає можливі маршрути переміщення вантажів між ними із використанням різних видів транспорту (рис. 1). Кожна дуга графа  $g = (N, A)$  задається впорядкованою парою індексів  $(i, j)$ , при  $i, j \in \{1, \dots, N\}$ , що відповідають вузлам  $n_i$  та  $n_j$ , а умова  $(i, j) \in A$  означає наявність транспортного зв'язку між ними.

Сукупність дуг відображає можливі варіанти переміщення вантажів між ланками ланцюга доставки із залученням одного або декількох видів транспорту та утворює множину альтернативних схем організації мультимодальних перевезень.

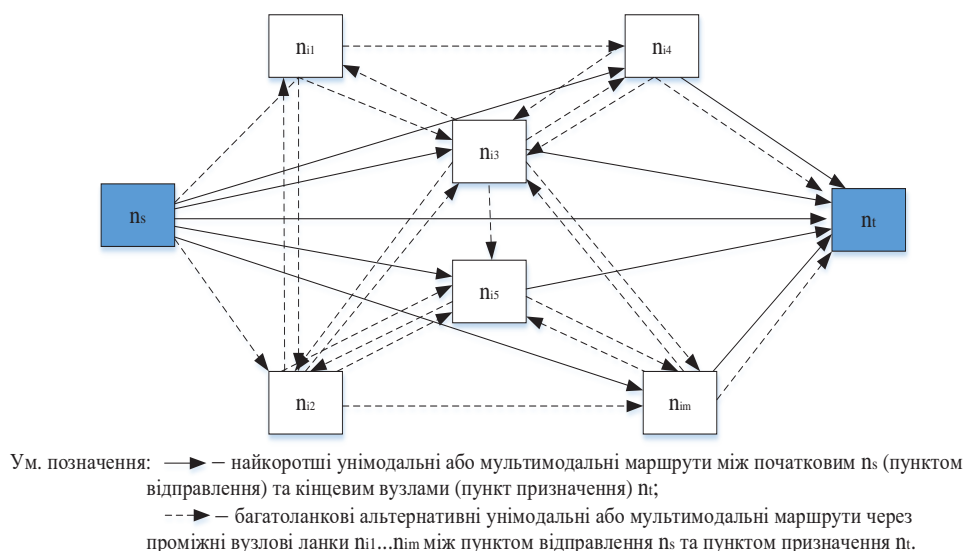


Рис. 1. Мережева структура ІТЛС (розроблено автором)

У контексті поставленої задачі мультимодальний ланцюг доставки вантажів (МЛДВ) може бути представлений у вигляді упорядкованої послідовності вузлів:

$$L = (n_s, n_{i_1}, n_{i_2}, \dots, n_{i_m}, \dots, n_t), \quad (2)$$

де  $n_s$  – початковий вузол (пункт відправлення) МЛДВ;  $n_t$  – кінцевий вузол (пункт призначення) МЛДВ;  $n_{i_1}, n_{i_2}, \dots, n_{i_m}$  – проміжні вузли (транзитні пункти) МЛДВ. Множина дуг, що входить до структури ланцюга, позначається як  $A(L) \subseteq A$ , а множина внутрішніх вузлів –  $N^{\text{вн}}(L)$ .

Для кожного альтернативного варіанта МЛДВ  $L$  вартісні, часові та екологічні показники визначаються шляхом агрегування параметрів дуг та вузлів:

$$\kappa(L) = \sum_{(i,j) \in A(L)} \kappa_{ij} + \sum_{i \in N^{\text{вн}}(L)} \kappa_i \quad (3)$$

$$\tau(L) = \sum_{(i,j) \in A(L)} \tau_{ij} + \sum_{i \in N^{\text{вн}}(L)} \tau_i \quad (4)$$

$$\varepsilon(L) = \sum_{(i,j) \in A(L)} \varepsilon_{ij} + \sum_{i \in N^{\text{вн}}(L)} \varepsilon_i \quad (5)$$

де  $\kappa_{ij}, \tau_{ij}, \varepsilon_{ij}$  – вартісні, часові та екологічні характеристики транспортно-логістичних операцій на дузі  $(i, j)$ ;  $\kappa_i, \tau_i, \varepsilon_i$  – вартісні, часові та екологічні характеристики  $i$ -го вузла, пов'язані з виконанням процесів обробки, зберігання, експедиційного та додаткового логістичного обслуговуванням.

Вартісні показники мультимодального ланцюга, як правило, мають детермінований характер та визначаються в залежності від встановлених тарифів на транспортні й логістичні послуги, та витрат на термінальну обробку вантажів у вузлових елементах ІТЛС, зокрема в аеропортових комплексах. Екологічні показники відображають рівень негативного впливу на довкілля, що виникає як у процесі переміщення вантажів, так і під час їх обробки та зберігання у транспортних вузлах.

Іншу природу мають часові параметри, значення яких формуються під впливом великої кількості чинників, серед яких нестабільність попиту на транспортно-логістичне обслуговування, нерівномірність надходження вантажопотоків, завантаженість інфраструктурних об'єктів, технологічні особливості обробки вантажів у вузлових елементах, а також зовнішніх умов функціонування ІТЛС. З урахуванням цього, тривалість окремих транспортних та вузлових операцій доцільно розглядати в якості випадкових величин, оскільки на практиці дуже часто відсутній достатній обсяг статистичних даних, необхідних для обґрунтованого вибору закону розподілу та оцінювання його параметрів. Тому, часові характеристики окремих ланок мультимодального ланцюга можуть бути задані мінімальним  $t_{\text{мін}}$ , максимальним  $t_{\text{макс}}$  та найбільш ймовірним  $t_{\text{наймов}}$  значеннями, що дозволяє врахувати їх варіативність та створює основу для подальшого моделювання відповідних процесів.

Параметризація випадкової тривалості транспортно-логістичного циклу здійснюється за допомогою бета-розподілу, область визначення якого є обмеженою. Звідси виходить, що кожен мультимодальний ланцюг доставки вантажів (МЛДВ) може бути описаний вектором параметрів:

$$Z(L) = (\kappa(L), \tau(L), \varepsilon(L)), \quad (6)$$

компоненти якого відповідають вартісному, часовому та екологічному критеріям та створюють підґрунтя для подальшого проведення багатокритеріального аналізу.

При цьому, оцінку ефективності  $\nu$ -го варіанту мультимодального ланцюга доставки пропонується виконувати за допомогою інтегральної цільової функції, яка спрямована на мінімізацію його вартісних, часових та екологічних характеристик:

$$F^{\nu} = \omega_{\kappa} \kappa_{\text{норм}}^{\nu} + \omega_{\Delta} \tau_{\text{норм}}^{\nu} + \omega_{\mu} \varepsilon_{\text{норм}}^{\nu} \rightarrow \min, \quad (7)$$

де  $\omega_{\kappa}$ ,  $\omega_{\Delta}$ ,  $\omega_{\mu}$  – вагові коефіцієнти, що відображають пріоритетність вартісного, часового та екологічного критеріїв (визначаються експертним шляхом відповідно до обраного сценарію управління ланцюгом доставки).

Відзначимо, що на етапі прийняття рішення можуть виникати суперечності між встановленими вимогами та управлінськими пріоритетами щодо ефективності певного ланцюга доставки, тому доцільним є застосування сценарного підходу, що дозволяє дослідити вплив різних стратегічних напрямків управління на результати оптимізації.

У даній роботі вибір оптимальної структури ланцюга доставки вантажів пропонується здійснювати за трьома сценаріями (С1-С3): мінімізація загальних витрат на доставку вантажів «від дверей до дверей» (С1); скорочення загальної тривалості транспортно-логістичного циклу (С2); мінімізація екологічного впливу ланцюга доставки вантажів на довкілля (С3).

Специфіка мультимодальних ланцюгів доставки в ІТЛС полягає в тому, що їх вартісні, часові та екологічні показники визначаються не лише параметрами транспортних зв'язків, а й умовами функціонування вузлових елементів системи.

Для аеропортових комплексів як ключових вузлових елементів мультимодальних ланцюгів доставки вантажів властива підвищена мінливість часових параметрів технологічних процесів, що пов'язано з нерівномірністю надходження вантажопотоків, обмеженістю пропускної спроможності інфраструктури та її здатністю забезпечувати інтеграцію різних видів транспорту, а також необхідності виконання широкого спектру транспортно-логістичних процедур з перевалки, обробки, зберігання, консолідації, координації та синхронізації вантажопотоків. Крім того, часові характеристики аеропортових вузлів залежать від наявності слотів на обслуговування повітряних суден, доступності рівня завантаженості перонних засобів механізації, що використовуються під час виконання навантажувально-розвантажувальних робіт та ін.

Сукупність зазначених чинників може спричиняти технологічні затримки стохастичної природи, що негативно впливає не лише на часові, вартісні показники, а й на екологічні наслідки роботи аеропортових комплексів, мультимодальних ланцюгів доставки та ІТЛС в цілому.

За такої невизначеності дослідження параметрів роботи системи потребує застосування імітаційного моделювання, яке надає можливість формувати вибірку варіантів випадкової величини та визначати ймовірність виконання перевізного процесу в межах заданого інтервалу. Завдяки цьому ключові критерії результативності мультимодальних ланцюгів доставки з авіаційною складовою оцінюються не тільки за середніми значеннями, а й з урахуванням мінливості показників

та рівня їх надійності, що має ключове значення для забезпечення ефективної діяльності ІТЛС.

З метою апробації запропонованих методичних положень розроблено імітаційну модель мультимодального ланцюга доставки вантажів між Шанхаєм (Китай) та Києвом (Україна) із використанням програмного середовища AnyLogistix. Вибір такого маршруту обумовлений необхідністю пошуку альтернативних схем доставки вантажів за обмеженої доступності авіаційної інфраструктури на українській та російській територіях, що пов'язано із закриттям авіаційного простору в Україні для цивільної авіації через активні воєнні дії. При таких умовах використання аеропортів України для приймання комерційних вантажних рейсів є неможливим, однак доставка вантажів автомобільним транспортом через сухопутні прикордонні переходи з країнами ЄС залишається доступною. У зв'язку з цим, на етапі проектування логістичного ланцюга передбачено транспортування вантажів від транзитних європейських аеропортів до Києва наземними видами транспорту.

Враховуючи цільову спрямованість дослідження на формування ланцюгів доставки з авіаційною складовою для вантажів, чутливих до тривалості перевезення, зокрема гуманітарних, медичних, швидкопсувних вантажів і товарів із коротким життєвим циклом, морський транспорт не включено до альтернативних схем доставки. Для таких вантажопотоків морський сегмент, попри потенційно нижчу вартість, істотно збільшує тривалість транспортно-логістичного циклу, що має критичне значення. Разом із тим, запропонована методика може бути розширена шляхом введення до мережевої структури ІТЛС морських маршрутів в якості додаткових дуг графу, а морських портів як вузлових елементів системи.

Під час формування вихідних даних для імітаційного моделювання враховано відкриту інформацію глобальних логістичних операторів DHL Global Forwarding, Kuehne+Nagel та DSV щодо організації міжнародних мультимодальних перевезень із залученням авіаційного транспорту та принципів формування індивідуальних тарифних пропозицій [11-13]. При цьому, вартісні показники не є фактичним комерційним тарифом окремого провайдера, оскільки вони залежать від маршруту, виду вантажу, обсягу партії, паливних надбавок, умов договору та поточної ринкової кон'юнктури. Тому, їх значення приймаються як усереднені розрахункові ставки, визначені за результатами аналізу публічно доступних матеріалів зазначених компаній та використані для порівняльного оцінювання різних транспортних сценаріїв за єдиною розрахунковою базою. Екологічна складова імітаційної моделі сформована на основі методичного підходу EcoTransIT World до розрахунку викидів у вантажних транспортних ланцюгах [14] та відповідно до логіки визначення CO<sup>2</sup> у програмному середовищі AnyLogistix, де викиди задаються для транспортних зв'язків та процесів обробки вантажів [15, 16].

У межах обчислювального експерименту сформовано альтернативні варіанти перевезення, що відрізняються різним комбінуванням видів транспорту на окремих ділянках маршруту (табл. 1).

Для забезпечення коректності порівняння альтернативних варіантів перевезення експериментальні розрахунки виконуються для консолідованої партії вантажу вагою 20 т, яка розглядається як єдиний вантажний потік у межах логістичного ланцюга «від дверей до дверей».

Таблиця 1

**Альтернативні варіанти доставки вантажів між Шанхаєм та Києвом**

| Варіант доставки<br>(комбінації видів транспорту) $S_{L1-L11}$ |  | Маршрут перевезення<br>«від дверей до дверей», $L$  |
|--|--|---|
| $S_{L1}$   | Унімодальний: автомобільний  | Шанхай – Алмати – Франкфурт-на-Майні – Краків – Київ (авто)   |
| $S_{L2}$   | Унімодальний: залізничний  | Шанхай – Алмати – Франкфурт-на-Майні – Краків – Київ (залізниця)  |
| $S_{L3}$   | Мультимодальний:<br>залізничний + автомобільний                                | Шанхай – Алмати (залізниця) – Франкфурт-на-Майні – Краків (залізниця), Краків – Київ (авто)                                 |
| $S_{L4}$   | Мультимодальний:<br>автомобільний + авіаційний+<br>залізничний + автомобільний | Шанхай – Алмати (авто), Алмати – Франкфурт-на-Майні (авіа), Франкфурт-на-Майні – Краків (залізниця), Краків – Київ (авто)   |
| $S_{L5}$   | Мультимодальний:<br>авіаційний+ залізничний +<br>автомобільний                 | Шанхай – Франкфурт-на-Майні (авіа), Франкфурт-на-Майні – Краків (залізниця), Краків – Київ (авто)                           |
| $S_{L6}$   | Мультимодальний:<br>авіаційний+ залізничний +<br>автомобільний                 | Шанхай – Франкфурт-на-Майні (авіа), Франкфурт-на-Майні – Краків (залізниця), Краків – Київ (авто)                           |
| $S_{L7}$   | Мультимодальний:<br>авіаційний+ залізничний +<br>автомобільний                 | Шанхай – Стамбул (авіа), Стамбул – Франкфурт-на-Майні (авіа), Франкфурт-на-Майні – Краків (залізниця), Краків – Київ (авто) |
| $S_{L8}$   | Мультимодальний:<br>авіаційний+ залізничний                                    | Шанхай – Стамбул (авіа), Стамбул – Варшава (авіа), Варшава – Київ (залізниця)   |
| $S_{L9}$   | Мультимодальний:<br>авіаційний+ автомобільний                                  | Шанхай – Стамбул (авіа), Стамбул – Варшава (авіа), Варшава – Київ (авто)  |
| $S_{L10}$  | Мультимодальний:<br>авіаційний+ автомобільний                                  | Шанхай – Варшава (авіа), Варшава – Київ (авто)  |
| $S_{L11}$  | Мультимодальний:<br>авіаційний+ залізничний                                    | Шанхай – Варшава (авіа), Варшава – Київ (залізничний)   |

Запропонована імітаційна модель не передбачає проведення деталізації за конкретними типами транспортних засобів, а враховує усереднені питомі параметри транспортно-логістичного процесу доставки вантажу, що відображають вартість, тривалість та екологічні наслідки роботи відповідного виду транспорту. Приклад реалізації імітаційної моделі маршрутної мережі доставки вантажів між Шанхаєм (Китай) та Києвом (Україна) через авіаційні хаби ЄС (Франкфурт-на-Майні, Варшава) у програмному середовищі AnyLogistix наведено на рис. 2.

Числові результати імітаційного моделювання, отримані в програмному середовищі AnyLogistix зібрані у табл. 2.

Аналіз результатів моделювання свідчить, що параметри ланцюгів доставки вантажів між Шанхаєм (Китай) та Києвом (Україна) суттєво залежать від структури маршруту та способу поєднання наземних та авіаційного видів транспорту. Розрахунки показали, що мультимодальні рішення із залученням авіаційного транспорту за схемою  $S_{L4}$  дозволяють зменшити загальну тривалість доставки до 9,6 діб, а за варіантом  $S_{L10}$  до 3,15 діб, що у 4-5,5 разів швидше порівняно з наземними варіантами перевезення. Проте, альтернативи з авіаційною складовою  $S_{L4} - S_{L11}$  супроводжуються суттєвим зростанням загальних витрат та обсягів викидів  $CO_2$ .

На наступному етапі дослідження виконується обчислення інтегрального критерію ефективності альтернативних варіантів ланцюгів доставки вантажів (формула 7) та проводиться його сценарний аналіз.

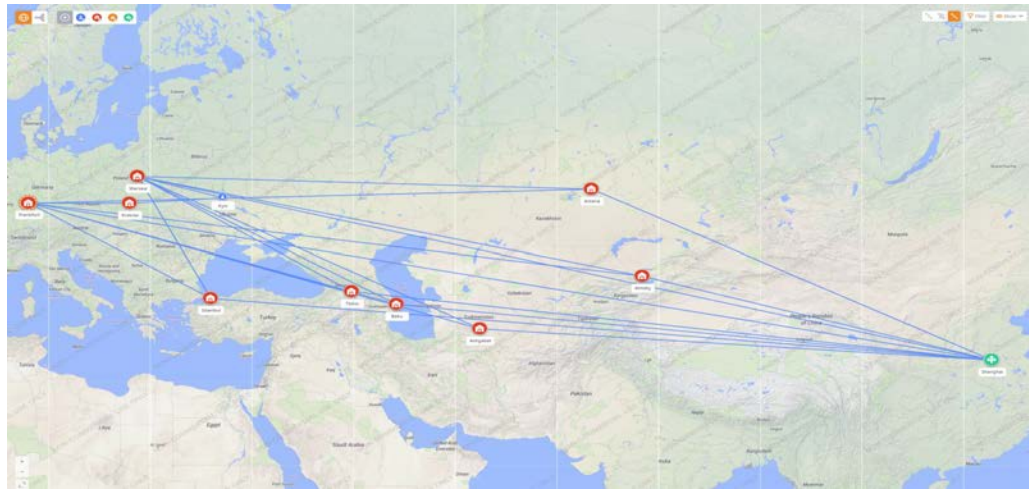


Рис. 2. Маршрутна мережа доставки вантажів між Шанхаєм (Китай) та Києвом (Україна) через авіаційні хаби ЄС (побудовано автором у програмному середовищі AnyLogistix)

Таблиця 2  
Порівняльна оцінка параметрів ланцюгів доставки вантажів між Шанхаєм та Києвом за альтернативними сценаріями

| Маршрут   | Загальний час, діб $\tau_{ij}$ | Загальні витрати, євро $\kappa_{ij}$ | Загальний обсяг викидів $\text{CO}_2$ , кг $\varepsilon_{ij}$ |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------------|---|
| $S_{L1}$  | 12,46                          | 64920                                | 31 152  |
| $S_{L2}$  | 17,98                          | 41556                                | 7 788   |
| $S_{L3}$  | 13,79                          | 52820                                | 9 390   |
| $S_{L4}$  | 9,6                            | 203353                               | 89 483  |
| $S_{L5}$  | 6,96                           | 292508                               | 127 506   |
| $S_{L6}$  | 5,5                            | 249955                               | 108 863   |
| $S_{L7}$  | 6,6                            | 278272                               | 121 272   |
| $S_{L8}$  | 5,14                           | 259724                               | 113 119   |
| $S_{L9}$  | 4,35                           | 261117                               | 114 512   |
| $S_{L10}$ | 3,15                           | 222845                               | 97 751  |
| $S_{L11}$ | 4,14                           | 221452                               | 96356   |

Для апробації запропонованих методичних положень за сценаріями С1-С3 приймаються відповідні вектори пріоритетів:  $\omega^{\square 1} = (0,68; 0,22; 0,10)$ ;  $\omega^{\square 2} = (0,22; 0,68; 0,10)$ ;  $\omega^{\square 3} = (0,10; 0,22; 0,68)$ .

Результати сценарної оцінки критеріїв інтегральної ефективності альтернативних ланцюгів доставки вантажів наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Сценарна оцінка параметрів ланцюгів доставки вантажів між Шанхаєм та Києвом за альтернативними ланцюгами доставки

| Альтернативний маршрут | Нормалізовані значення складових інтегральної ефективності ланцюга доставки |                                    |  | Інтегральна ефективність ланцюга доставки $F^v$ |              |              |
|------------------------|---|------------------------------------|--|---|--------------|--------------|
|                        | Загальні витрати, $\kappa_{норм}^{v,t}$                                     | Загальний час, $\tau_{норм}^{v,t}$ | Загальний обсяг викидів CO <sub>2</sub> , $\varepsilon_{норм}^{v,t}$ | $F_{C1}^v$                                      | $F_{C2}^v$   | $F_{C3}^v$   |
| $S_{L1}$               | 0,222   | 0,693                              | 0,244  | 0,328   | 0,545        | 0,341        |
| $S_{L2}$               | 0,142   | 1                                  | 0,061  | 0,323   | 0,717        | 0,276        |
| $S_{L3}$               | 0,181   | 0,767                              | 0,074  | <b>0,299</b>                                    | 0,569        | <b>0,237</b> |
| $S_{L4}$               | 0,695   | 0,534                              | 0,702  | 0,66  | 0,586        | 0,664        |
| $S_{L5}$               | 1   | 0,387                              | 1  | 0,865   | 0,583        | 0,865        |
| $S_{L6}$               | 0,855   | 0,306                              | 0,854  | 0,734   | 0,481        | 0,733        |
| $S_{L7}$               | 0,951   | 0,367                              | 0,951  | 0,823   | 0,554        | 0,823        |
| $S_{L8}$               | 0,888   | 0,286                              | 0,887  | 0,755   | 0,479        | 0,755        |
| $S_{L9}$               | 0,893   | 0,242                              | 0,898  | 0,75  | 0,451        | 0,753        |
| $S_{L10}$              | 0,762   | 0,175                              | 0,767  | 0,633   | <b>0,363</b> | 0,636        |
| $S_{L11}$              | 0,757   | 0,23                               | 0,756  | 0,641   | 0,399        | 0,64         |

Дані табл. 3 свідчать, що при реалізації сценаріїв мінімізації загальних витрат на доставку вантажів «від дверей до дверей» (C1) та мінімізації екологічного впливу ланцюга доставки вантажів на довкілля (C3) оптимальним варіантом переміщення вантажу з Китаю до України вважається мультимодальний маршрут  $S_{L3}$  ( $F_{C1}^v = 0,299; F_{C3}^v = 0,237$ ), що передбачає інтеграцію залізничного та автомобільного видів транспорту на ділянці між Краковом та Києвом. Найменше значення критерію інтегральної ефективності в межах сценарію скорочення загальної тривалості транспортно-логістичного циклу доставки вантажів «від дверей до дверей» (C2) зафіксовано за альтернативним мультимодальним авіаційно-автомобільним маршрутом  $S_{L10}$  ( $F_{C2}^v = 0,363$ ), що підтверджує доцільність залучення авіаційного транспорту до змішаних схем транспортування, коли загальний час доставки має пріоритетне значення.

Отже, на основі результатів імітаційного моделювання визначено, що включення авіаційного транспорту до структури мультимодального ланцюга доставки істотно змінює співвідношення між його економічними, часовими та екологічними показниками. Зокрема, скорочення тривалості перевезення призводить до зростання витрат та екологічного навантаження, що обумовлює необхідність врахування не лише прямих витрат на переміщення вантажів, а й непрямих економічних ефектів, пов'язаних із тривалістю повного транспортно-логістичного циклу, оборотністю ресурсів та часовою чутливістю вантажопотоків. Особливого значення це набуває під час перевезення гуманітарних вантажів, медичних препаратів, швидкопсувної продукції та інших товарів із коротким життєвим циклом, для яких дотримання мінімальних термінів доставки являється визначальною умовою збереження їх властивостей та функціонального призначення.

Крім того, при недоступності елементів української авіатранспортної інфраструктури для виконання прямих авіаційних перевезень і, відповідно, відсутності можливості термінової доставки вантажів, використання транзитних авіаційних вузлів сприяє підвищенню гнучкості та стійкості ІТЛС, частково компенсує інфраструктурні обмеження та сприяє безперервності транспортних процесів. Саме це підтверджує доцільність дослідження альтернативних мультимодальних схем з авіаційною складовою як ефективного інструменту підтримання стабільних зв'язків між глобальними та регіональними транспортно-логістичними мережами.

**Висновки.** Запропоновані у статті методичні положення дозволяють формалізувати мультимодальні ланцюги доставки вантажів з авіаційною складовою в межах ІТЛС на основі мережевого підходу із врахуванням вартісних, часових та екологічних характеристик транспортно-логістичного циклу. Для апробації наведених положень у програмному середовищі AnyLogistix розроблено імітаційну мережеву модель мультимодального ланцюга доставки вантажів між Шанхаєм та Києвом через європейські авіаційні хаби Франкфурт-на-Майні (Німеччина) та Варшава (Польща), а також побудовано та проаналізовано альтернативні варіанти перевезення з урахуванням проміжних аеропортових вузлів Стамбул (Туреччина) та Алмати (Республіка Казахстан). За результатами моделювання встановлено, що залучення авіаційного транспорту забезпечує суттєве скорочення тривалості доставки, проте супроводжується суттєвим зростанням витрат та екологічного навантаження, що підтверджує необхідність врахування не лише прямих транспортних витрат на етапі оцінювання ефективності таких ланцюгів, а й непрямих економічних ефектів, пов'язаних з тривалістю повного транспортно-логістичного циклу, оборотністю ресурсів та часовою чутливістю вантажопотоків. Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості його використання для оцінювання альтернативних схем доставки вантажів, зокрема чутливих до тривалості перевезення, в умовах нестабільності середовища та наявності інфраструктурних обмежень. Наступним етапом дослідження має стати розроблення концептуальних положень багатокритеріальної оптимізації структури мультимодального ланцюга доставки в ІТЛС на основі структурно-функціонального підходу.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Chopra S., Meindl P. Supply Chain Management. Strategy, Planning & Operation. In: Boersch C., Elschen R. (eds). *Das Summa Summarum des Management*. Wiesbaden: Gabler, 2007. P. 265–275. doi: 10.1007/978-3-8349-9320-5\_22.
2. Merkert R. Air Cargo and Supply Chain Management. *The Palgrave Handbook of Supply Chain Management*. Cham: Springer, 2023. P. 1–18. doi: 10.1007/978-3-030-89822-9\_90-1.
3. Wąsowska K. Air transport in the supply chain. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*. 2018. No. 128. P. 409–420. doi: 10.29119/1641-3466.2018.128.31.
4. Janić M. Analyzing and Modeling Performances of Supply Chains Served by Air Cargo Carrier Networks. *Advances in Airline Economics*. 2022. P. 35–82. doi: 10.1108/S2212-160920220000009003.
5. Борець І.В., Соколова О.Є., Соловійова О.О., Висоцька І.І. Організація мультимодальних перевезень вантажів за участю авіаційного транспорту. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2020. № 1(46). С. 35–44. doi: 10.33744/2308-6645-2020-1-46-035-044.

6. Sokolova O., Ivannikova V., Cherednichenko K. Fundamentals of a Sustainable Supply Chain Designing with the Involvement of Air Transport. In: *2024 IEEE 7th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)*, Kyiv, Ukraine, 22–24 October 2024. 2024. P. 140–145. doi: 10.1109/APUAVD64488.2024.10765912.
7. Ivannikova V., Boldyrieva M., Konovalyuk V. Modern Ecological Approach to Air Transportation Management. In: Prentkovskis O., Yatskiv (Jackiva) I., Skačkauskas P., Junevičius R., Maruschak P. (eds). *TRANSBALTICA XII: Transportation Science and Technology*. Cham: Springer, 2022. P. 658–670. doi: 10.1007/978-3-030-94774-3\_64.
8. Kim S., Choi Y., Kim S. Simulation modeling in supply chain management research of ethanol: A review. *Energies*. 2023. Vol. 16(21). Art. 7429. doi: 10.3390/en16217429.
9. Liu Z., Shirakashi R., Kamiebisu R., Nishi T., Matsuda M. Simulation-based optimization using virtual supply chain structured by the configuration platform. *IFAC-PapersOnLine*. 2023. Vol. 56(2). P. 7840–7845. doi: 10.1016/j.ifacol.2023.10.1145.
10. Cherednichenko K., Ivannikova V., Sokolova O. Simulation Modelling for Supply Chain Optimization with a Logistics Hub Based at an Airport Complex. In: *Advances in Civil Aviation Systems Development*. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 1418. Cham: Springer, 2025. P. 33–44. doi: 10.1007/978-3-031-91992-3\_3.
11. DHL Global Forwarding. Monthly Tariff Guide – DHL. URL: [https://mydhl.express.dhl/content/dam/downloads/bg/en/rate-guide/dhl\\_express\\_monthly\\_tariff\\_guide\\_bg\\_en.pdf](https://mydhl.express.dhl/content/dam/downloads/bg/en/rate-guide/dhl_express_monthly_tariff_guide_bg_en.pdf). (дата звернення: 20.04.2026).
12. Kuehne+Nagel. Quote all modes. URL: <https://mykn.kuehne-nagel.com/oq/site/quote-request> (дата звернення: 20.04.2026).
13. DSV. *Tariff Documents: 101\_DSV Rules Tariff DSV Air & Sea\_03-17-2026*. URL: <https://www.dsv.com/en-us/our-solutions/modes-of-transport/sea-freight/tariffs> (дата звернення: 20.04.2026).
14. EcoTransIT World. Methodology. URL: <https://www.ecotransit.org/en/methodology/> (дата звернення: 20.04.2026).
15. AnyLogistix Help. CO2 Emissions. URL: <https://anylogistix.help/statistics/co2-emissions.html> (дата звернення: 20.04.2026).
16. AnyLogistix Help. CO2 from Processing. URL: (дата звернення: 09.05.2026).

## REFERENCES

1. Chopra, S., & Meindl, P. (2007). Supply Chain Management. Strategy, Planning & Operation. In C. Boersch & R. Elschen (Eds.), *Das Summa Summarum des Management* (pp. 265–275). Gabler. [https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9320-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9320-5_22)
2. Merkert, R. (2023). Air cargo and supply chain management. In *The Palgrave Handbook of Supply Chain Management* (pp. 1–18). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-89822-9\\_90-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89822-9_90-1)
3. Waşowska, K. (2018). Air transport in the supply chain. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*, (128), 409–420. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2018.128.31>

4. Janić, M. (2022). Analyzing and modeling performances of supply chains served by air cargo carrier networks. *Advances in Airline Economics*, 35–82. <https://doi.org/10.1108/S2212-160920220000009003>.
5. Borets, I.V., Sokolova, O.Ye., Soloviova, O.O., & Vysotska, I.I. (2020). Organization of multimodal cargo transportation with participation of air transport [Orhanizatsiia multymodalnykh perevezen vantazhiv za uchastiu aviatsiinoho transportu]. *Bulletin of the National Transport University. Series "Technical Sciences"*, 1(46), 35–44. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2020-1-46-035-044> [in Ukrainian].
6. Sokolova, O., Ivannikova, V., & Cherednichenko, K. (2024). Fundamentals of a sustainable supply chain designing with the involvement of air transport. In *2024 IEEE 7th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)* (pp. 140–145). <https://doi.org/10.1109/APUAVD64488.2024.10765912>
7. Ivannikova, V., Boldyrieva, M., & Konovalyuk, V. (2022). Modern ecological approach to air transportation management. In O. Prentkovskis, I. Yatskiv (Jackiva), P. Skačkauskas, R. Junevičius, & P. Maruschak (Eds.), *TRANSBALTICA XII: Transportation Science and Technology* (pp. 658–670). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-94774-3\\_64](https://doi.org/10.1007/978-3-030-94774-3_64)
8. Kim, S., Choi, Y., & Kim, S. (2023). Simulation modeling in supply chain management research of ethanol: A review. *Energies*, 16(21), 7429. <https://doi.org/10.3390/en16217429>
9. Liu, Z., Shirakashi, R., Kamiebisu, R., Nishi, T., & Matsuda, M. (2023). Simulation-based optimization using virtual supply chain structured by the configuration platform. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 7840–7845. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1145>.
10. Cherednichenko, K., Ivannikova, V., & Sokolova, O. (2025). Simulation modelling for supply chain optimization with a logistics hub based at an airport complex. In *Advances in Civil Aviation Systems Development (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1418, pp. 33–44)*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-91992-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-91992-3_3)
11. DHL Global Forwarding. Monthly Tariff Guide – DHL. URL: [https://mydhl.express.dhl/content/dam/downloads/bg/en/rate-guide/dhl\\_express\\_monthly\\_tariff\\_guide\\_bg\\_en.pdf](https://mydhl.express.dhl/content/dam/downloads/bg/en/rate-guide/dhl_express_monthly_tariff_guide_bg_en.pdf). (date of access: 20.04.2026).
12. Kuehne+Nagel. Quote all modes. URL: <https://mykn.kuehne-nagel.com/oq/site/quote-request> (date of access: 20.04.2026).
13. DSV. *Tariff Documents: 101\_DSV Rules Tariff DSV Air & Sea\_03-17-2026*. URL: <https://www.dsv.com/en-us/our-solutions/modes-of-transport/sea-freight/tariffs> (date of access: 20.04.2026).
14. EcoTransIT World. Methodology. URL: <https://www.ecotransit.org/en/methodology/> (date of access: 20.04.2026).
15. AnyLogistix Help. CO2 Emissions. URL: <https://anylogistix.help/statistics/co2-emissions.html> (date of access: 20.04.2026).
16. AnyLogistix Help. CO2 from Processing. URL: (date of access: 09.05.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 22.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026