

SYSTEMATIZATION AND MODERNIZATION OF MATHEMATICAL METHODS FOR EVALUATING THE EFFICIENCY OF ECONOMIC SYSTEMS.

Abstract: *The article provides a comprehensive analysis and systematization of mathematical methods used to evaluate the efficiency indicators of economic systems under modern economic conditions. The feasibility of applying economic and mathematical modeling as a tool for formalizing complex economic processes and supporting managerial decision-making is substantiated. The possibilities of applying methods of mathematical statistics, econometrics, mathematical programming, game theory, queuing theory, and operations research in the context of enterprise performance analysis are considered. A generalized formulation of the problem of efficiency evaluation using an objective function and a system of constraints is proposed. An example of a multifactor regression model is presented, allowing the assessment of the influence of key economic indicators on an integrated efficiency index. The results of the study can be used to improve the validity of management decisions and to forecast the development of economic systems.*

Keywords: *efficiency indicators, economic and mathematical modeling, mathematical programming, econometric methods, operations research..*

Problem Statement. Under modern conditions, the functioning of enterprises in any sector is characterized by a high level of complexity, dynamism, and uncertainty of the external environment. This determines the need to apply scientifically grounded approaches to performance evaluation that are based on the use of advanced mathematical tools and formalized models [2, p. 23].

The application of mathematical methods in the assessment of economic processes contributes to solving a specific range of practical tasks, including:

- structuring economic information systems and establishing requirements for their standardization and adjustment in order to address a set of problems related to efficient optimization of planning and management;
- providing tools for intensifying and increasing the accuracy of economic calculations, which enables multifactor substantiation of economic processes;
- conducting in-depth quantitative analysis of the assessment of sequential changes in the development of economic entities;
- solving fundamentally new economic problems that cannot be addressed by other means [4, p. 48].

Analysis of Recent Research and Publications. Theoretical and practical issues related to the modeling of economic processes and the economic efficiency of enterprises have been addressed in the works of A. V. Kozachenko, V. F. Haponenko [9], Yu. H. Lysenko, F. I. Yevdokimov, S. M. Shkarlet, V. M. Porokhnia, N. O. Podluzhna, M. V. Kurkin, and others.

A significant contribution to the development of modern mathematical frameworks and various areas of operations research has been made by R. Ackoff [3], R. Bellman, G. Dantzig, H. Kuhn, J. von Neumann, T. Saaty [8], R. Churchman, A. Kaufmann, L. V. Kantorovich, N. P. Buslenko, E. S. Venttsel, N. N. Vorobyov, N. N. Moiseev, D. B. Yudin, and other scholars.

Despite the substantial scientific value of these contributions, a number of important issues related to the application of mathematical methods in the study of efficiency indicators remain insufficiently developed. At present, certain contradictions persist in the construction of economic and mathematical models for analyzing economic processes. As a result, the problem of effectively implementing mathematical tools to substantiate efficiency assessment from the standpoint of economic and mathematical modeling remains unresolved, particularly with regard to the selection of dominant indicators. The insufficient level of research on the quantitative evaluation and analysis of efficiency indicators hinders the timely prevention of crisis phenomena within enterprises and reduces the overall effectiveness of their functioning [5, p. 15].

The purpose of the study is to systematize and substantiate the application of mathematical methods for evaluating the efficiency indicators of economic systems and for constructing adequate economic and mathematical models.

Presentation of the main material. In economic and mathematical modeling, one of the most challenging tasks is to identify the mathematical essence of an economic problem. This requires an understanding of the specific features of the economic process as well as proficiency in appropriate mathematical tools.

The solution of economic analysis problems by means of mathematical methods is possible only when such problems are formulated in mathematical terms, that is, when real economic relationships and dependencies are expressed using the apparatus of mathematical analysis. This necessitates the development of mathematical models.

In practice, a wide range of mathematical methods is applied to solve economic problems. Methods of elementary mathematics are used in traditional economic calculations, particularly when substantiating resource requirements and developing plans and projects. Classical methods of mathematical analysis are applied both independently (differentiation and integration) and as components of other methods, such as mathematical statistics and mathematical programming.

Statistical methods constitute the primary means of studying mass recurrent phenomena. They are applied to analyze changes in efficiency indicators treated as stochastic processes. When the relationships between the analyzed characteristics are not deterministic but stochastic in nature, statistical and probabilistic methods become virtually the only effective research tools. In economic analysis, the most widely used methods include simple and multiple correlation analysis [6].

When studying simultaneous statistical populations, distribution laws, variation series, and sampling methods are employed. For multidimensional statistical populations, correlation and regression analysis, as well as variance, covariance, spectral, component, and factor analyses, are applied.

Econometric methods are based on the synthesis of three fields of knowledge: economics, mathematics, and statistics. The foundation of econometrics is the economic model, which represents a schematic description of an economic phenomenon or process, reflecting its essential characteristics through scientific abstraction.

One of the most widely used methods of economic analysis is the input–output method. This approach is based on matrix (balance) models constructed in a tabular form and clearly illustrates the interrelationships between production costs and output results.

Methods of mathematical programming serve as the main tools for solving optimization problems related to production and economic activity. Essentially, these methods are used for planning calculations and make it possible to assess the intensity of planned targets, the scarcity of results, and to determine limiting types of raw materials and groups of equipment [10].

Operations research is understood as the development of methods for purposeful actions (operations), the quantitative evaluation of decisions, and the selection of the optimal alternative. The objective of operations research is to integrate structurally interconnected elements of a system in a way that most effectively supports the analysis of efficiency indicators.

Game theory, as a branch of operations research, represents a theory of mathematical models for making optimal decisions under conditions of uncertainty or conflict among multiple parties with differing interests [11].

Queueing theory, based on probability theory, examines mathematical methods for the quantitative evaluation of mass service processes. A distinctive feature of all problems related to queueing systems is the random nature of the phenomena under study. The number of service requests and the time intervals between their arrivals are random; however, taken together, they follow statistical regularities, the quantitative study of which constitutes the subject of queueing theory.

This theory makes it possible to study systems designed to service a mass flow of randomly occurring requests. Both the moments of request arrivals and the service times may be random. The objective of queueing theory methods is to identify a rational organization of service that ensures a specified quality

level and to determine optimal service standards (according to an adopted criterion) for servicing demands that arise unexpectedly and irregularly [4, p. 67].

Economic cybernetics analyzes economic phenomena and processes as complex systems from the perspective of the laws of control and information flows within them. Methods of modeling and systems analysis are most highly developed precisely within this field.

General formulation of the problem of studying efficiency indicators.

All factors that influence the process of analyzing economic efficiency indicators can be divided into two groups:

- constant factors (conditions under which the operation is carried out), the influence on which is impossible. These factors are denoted by $\alpha_1, \alpha_2, \dots$;

- dependent factors (decision variables) x_1, x_2, \dots

The efficiency criterion is expressed by an objective function that depends on factors from both groups. Therefore, the objective function can be represented in the following form:

$$Z = f(x_1, x_2, \dots, \alpha_1, \alpha_2, \dots) \quad (1)$$

All operations research models can be classified according to the nature and characteristics of the operation, the type of problems being addressed, and the specifics of the mathematical methods applied.

It is important to first highlight the large class of optimization models. Such problems arise when attempting to optimize the efficiency of planning and management in complex systems, primarily economic systems. The efficiency optimization problem can be formulated in a general form as follows:

Find variables x_1, x_2, \dots, x_n , that satisfies a system of inequalities (or equations)

$$\phi_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_i, i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

and the transformation of the maximization (or minimization) of the objective function

$$Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \max(\min) \quad (3)$$

In cases where the functions f and ϕ_i in problems (2) – (3), are at least twice differentiable, classical optimization methods can be applied. However, the application of these methods in operations research for efficiency indicators is rather limited, as determining the conditional extremum of a function of n variables is technically very challenging: the method allows identification of a local extremum, but due to the multidimensional nature of the function, finding its maximum (or minimum) value (global extremum) can be quite labor-intensive—especially since this extremum may occur at the boundary of the solution domain. Classical methods fail entirely if the set of admissible argument values is discrete or if the function Z is given in tabular form. In such cases, mathematical programming methods are employed to solve problems (2) – (3).

Mathematical programming is a branch of mathematics that develops the theory and numerical methods for solving multidimensional extremal problems with constraints, i.e., problems of finding the extremum of a function of many variables subject to restrictions on the domain of those variables. The function whose extremal value needs to be determined under economic constraints is called the objective function, performance indicator, or optimality criterion. Economic constraints are formalized as systems of restrictions. Together, these elements constitute a mathematical model.

If the efficiency criterion $Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ is a linear function, and the function $\phi_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ appears in the system of constraints (1), such a problem is solved using linear programming methods.

If, based on practical considerations, the solution is required to be integer-valued, the problem becomes one of integer linear programming. If the efficiency criterion and/or the system of constraints are defined by nonlinear functions, the problem becomes one of nonlinear programming. In particular, if the specified functions exhibit convexity, the resulting problem is classified as a convex programming problem.

If a mathematical programming problem involves a time variable and the efficiency criterion (2) is expressed not explicitly as a function of variables but implicitly—through equations describing the progression of operations over time—the problem is considered a dynamic programming problem.[12]

The advantage of the model we propose is that the performance indicator Y is measured using the methodology developed and described in previous sections, which allows a unified approach to evaluating all indicators and their interrelationships, obtaining results measured on a consistent scale, and enabling the prediction of its real value.

Consider an example of a multifactor regression model describing the relationship between the integral adaptability coefficient and the constituent indicators of a company's operational efficiency: the performance indicator is measured using the methodology developed and described in previous sections, allowing a unified approach to evaluating all indicators and their interrelationships, obtaining results on a single scale, and predicting its real value.

The task is to study and determine the form of the relationship (construct a multifactor regression model) between the integral efficiency coefficient and a set of economic indicators influencing the company's operational performance:

- x_1 – рентабельність загальної основної діяльності;
- x_2 – рентабельність основних засобів;
- x_3 – коефіцієнт фондоддачі;
- x_4 – коефіцієнт оборотності;
- x_5 – коефіцієнт придатності основних засобів;
- x_6 – продуктивність праці.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 + e \quad (4)$$

where e – is the random error vector;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$,— are unknown parameters in the multifactor regression model, which are estimated using the least squares method to minimize the error vector.

The impact of each performance indicator of the enterprise on the adaptability coefficient is characterized by the partial regression coefficients. A partial regression coefficient indicates the amount by which the value of the corresponding indicator changes in response to a one-unit change, assuming that all other indicators remain constant.

Without loss of generality, it can be assumed that the expected value of the random error vector is zero and that its variance is finite. In this case, the integral adaptability indicator y is a function of the constituent factors of the enterprise's operational performance.

The proposed model can be expressed in matrix form as $Y=XB$, where

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} \quad \text{- is the column vector of values of the dependent variable } Y, \text{ which in our case represents is equal to } Y=XB$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & x_{31} & x_{41} & x_{51} & x_{61} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & x_{32} & x_{42} & x_{52} & x_{62} \\ 1 & x_{13} & x_{23} & x_{33} & x_{43} & x_{53} & x_{63} \end{pmatrix} \quad \text{the matrix of values of the enterprise's performance indicators.}$$

$$X^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} \\ x_{51} & x_{52} & x_{53} \\ x_{61} & x_{62} & x_{63} \end{pmatrix} \quad \text{the matrix transposed relative to the matrix } X$$

$$B = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{pmatrix} \quad \text{the column vector of unknown regression coefficients}$$

To estimate the unknown parameters, the least squares method is applied, yielding:

$$B = (X^T X)^{-1} \cdot (X^T Y) \tag{5}$$

Using the data from the enterprise's performance reports, we obtain: [1]:

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 0,03 & 0,01 & 0,95 & 1,41 & 0,15 & 64,73 \\ 1 & -0,34 & -0,21 & 0,04 & 0,67 & 0,14 & 33,81 \\ 1 & -0,42 & -0,27 & 0,35 & 0,95 & 0,14 & 42,89 \end{pmatrix} \quad X^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0,03 & -0,34 & -0,42 \\ 0,01 & -0,21 & -0,27 \\ 0,95 & 0,04 & 0,35 \\ 1,41 & 0,67 & 0,95 \\ 0,15 & 0,14 & 0,14 \\ 64,73 & 33,81 & 42,89 \end{pmatrix}$$

We find the product of the formed matrices :

$$X^T X = \begin{pmatrix} 3 & -0,73 & -0,47 & 1,34 & 3,03 & 0,43 & 141,43 \\ -0,73 & 0,2929 & 0,1851 & -0,1321 & -0,5845 & -0,1019 & -27,5673 \\ -0,47 & 0,1851 & 0,1171 & -0,0934 & -0,3831 & -0,0657 & -18,0331 \\ 1,34 & -0,1321 & -0,0934 & 1,0266 & 1,6988 & 0,1971 & 77,8574 \\ 3,03 & -0,5845 & -0,3831 & 1,6988 & 3,3395 & 0,4383 & 154,6675 \\ 0,43 & -0,1019 & -0,0657 & 0,1971 & 0,4383 & 0,0617 & 20,4475 \\ 141,43 & -27,5673 & -18,0331 & 77,8574 & 154,6675 & 20,4475 & 7172,641 \end{pmatrix}$$

Calculating the inverse matrix $(X^T X)^{-1}$ gives the result:

$$(X^T X)^{-1} = \begin{pmatrix} 1,12298 & 3,28752 & 6,25696 & 5,77799 & 9,15529 & 5,70015 & 7,26747 \\ 5,1972 & 2,52072 & 3,86912 & 1,0637 & 1,18037 & 1,07355 & 2,93181 \\ 8,36456 & 3,98187 & 6,1276 & 1,76117 & 1,73504 & 1,77457 & 4,93695 \\ 3,05274 & 6,93536 & 1,05038 & 7,08345 & 1,494 & 7,11159 & 1,874614 \\ 1,64924 & 5,47264 & 8,66007 & 5,88493 & 7,31875 & 5,41965 & 1,6934 \\ 3,02946 & 5,43821 & 8,25349 & 4,14773 & 3,92521 & 5,11808 & 1,22879 \\ 6,28479 & 1,09049 & 1,55576 & 8,30205 & 2,95029 & 9,834714 & 1,85737 \end{pmatrix}$$

Find the product $X^T Y$:

$$X^T \cdot Y = \begin{pmatrix} 0,408017 \\ -0,08891 \\ -0,05744 \\ 0,194913 \\ 0,421689 \\ 0,058708 \\ 19,7025 \end{pmatrix}$$

Therefore, the column vector of unknown regression coefficients B is equal to:

$$B = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,1483154 \\ 0,06020629 \\ 0,1011563 \\ 0,03993138 \\ 0,03760462 \\ 0,02725289 \\ 0,04241248 \end{pmatrix}$$

This is how the regression model is set aside:

$$K_{\text{ef}} = 0,1483154 + 0,06020629x_1 + 0,1011563x_2 + 0,03993138x_3 + 0,03760462x_4 + 0,02725289x_5 + 0,04241248x_6$$

Conclusion. Systematization and modernization of mathematical methods for evaluating efficiency contribute to the improvement of economic analysis quality and the soundness of managerial decisions. Further research should be directed toward the development of econometric models that take into account industry-specific features and the dynamics of economic processes.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Беник Н. Г. Організаційно-економічний механізм адаптації суднобудівельно-судноремонтних підприємств водного транспорту : автореф. дис. канд. екон. наук : 08.00.04. - Київ, 2015. - 20 с.
2. Акофф Р. Л. Планування майбутнього корпорації / пер. з англ. - Київ : Основи, - 2018. - 352 с.
3. Беллман Р. Динамічне програмування. - Київ : Мир, 2017. - 400 с.
4. Данциг Г. Б. Лінійне програмування і розширення. - Київ : Вища школа, 2019. - 512 с.
5. Канторович Л. В. Економічний розрахунок і ефективність. - Харків : Фактор, 2020. - 288 с.
6. Сааті Т. Л. Прийняття рішень. Метод аналізу ієрархій. - Київ : Видавничий дім «КМ Академія», 2021. - 360 с.
7. Лисенко Ю. Г., Порохня В. М. Економіко-математичні методи і моделі управління підприємством. - Київ : Центр навчальної літератури, 2018. - 336 с.
8. Гапоненко В. Ф., Шкарлет С. М. Управління ефективністю підприємства. - Київ : КНЕУ, 2019. - 280 с.
9. Мамаєва З. М. Вступ до економіко-математичного моделювання. - Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. - 240 с.
10. Черчмен С., Акофф Р., Арноф Л. Вступ до дослідження операцій. - Київ : Мир, 2020. - 480 с.
11. Вентцель Е. С. Дослідження операцій : задачі, принципи, методологія. - Київ : Либідь, 2019. - 416 с.
12. Юдін Д. Б., Горяшко А. П. Лінійне та нелінійне програмування. - Київ : Наукова думка, 2021. - 392 с.

REFERENCES

1. Benyk, N. H. (2015). *Organizational and economic mechanism of adaptation of shipbuilding and ship-repair enterprises of water transport* (Extended abstract of PhD dissertation). Kyiv, Ukraine.
2. Ackoff, R. L. (2018). *Creating the Corporate Future*. Kyiv: Osnovy.

3. Bellman, R. (2017). *Dynamic Programming*. Kyiv: Myr.
4. Dantzig, G. B. (2019). *Linear Programming and Extensions*. Kyiv: Vyshcha Shkola.
5. Kantorovich, L. V. (2020). *Economic Calculation and Efficiency*. Kharkiv: Faktor.
6. Saaty, T. L. (2021). *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process*. Kyiv: KM Academia Publishing.
7. Lysenko, Yu. H., & Porokhnia, V. M. (2018). *Economic and Mathematical Methods and Models of Enterprise Management*. Kyiv: Center for Educational Literature.
8. Haponenko, V. F., & Shkarlet, S. M. (2019). *Enterprise Performance Management*. Kyiv: KNEU.
9. Mamaieva, Z. M. (2016). *Introduction to Economic and Mathematical Modeling*. Kharkiv: Simon Kuznets KhNEU.
10. Churchman, C. W., Ackoff, R. L., & Arnoff, E. L. (2020). *Introduction to Operations Research*. Kyiv: Myr.
11. Venttsel, E. S. (2019). *Operations Research: Problems, Principles, Methodology*. Kyiv: Lybid.
12. Yudin, D. B., & Horiashko, A. P. (2021). *Linear and Nonlinear Programming*. Kyiv: Naukova Dumka.

А.Гейлик, Ю.Вяла

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМ

У статті здійснено комплексний аналіз та систематизацію математичних методів, що застосовуються для оцінювання показників ефективності економічних систем у сучасних умовах розвитку економіки. Обґрунтовано доцільність використання економіко-математичного моделювання як інструменту формалізації складних економічних процесів та прийняття управлінських рішень. Розглянуто можливості застосування методів математичної статистики, економетрики, математичного програмування, теорії ігор, теорії масового обслуговування та дослідження операцій у контексті аналізу ефективності діяльності підприємств. Запропоновано узагальнену постановку задачі дослідження показників ефективності з використанням цільової функції та системи обмежень. Наведено приклад багатofакторної регресійної моделі, що дозволяє оцінити вплив ключових економічних показників на інтегральний показник ефективності. Результати дослідження можуть бути використані для підвищення обґрунтованості управлінських рішень і прогнозування розвитку економічних систем.

Ключові слова: показники ефективності, економіко-математичне моделювання, математичне програмування, економетричні методи, дослідження операцій.

Стаття прийнята 12.09.2025

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 656.02:004.738.5:355.02

doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.44.28

© Кучерук Г.Ю., Войченко Т.О., Сіващенко Т.В.

РОЛЬ ЦИФРОВІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНОЇ ЛОГІСТИКИ В КОНТЕКСТІ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

У статті розглянуто актуальність цифровізації транспортної логістики мультимодальних перевезень в умовах воєнного стану. Проаналізовано вплив воєнних дій на логістичні ланцюги, визначено ключові напрями цифрової трансформації, що дозволяють підвищити гнучкість, безпеку та ефективність логістичних операцій на мультимодальних перевезеннях. Показано значення цифрових технологій для забезпечення сталого функціонування транспортної системи, обміну даними та управління ризиками в кризових умовах.

Ключові слова: цифровізація, мультимодальні перевезення, транспортна логістика, війна, управління ризиками, логістичні ланцюги, IT-рішення.

Постановка проблеми. Воєнний стан, введений в Україні у зв'язку з повномасштабною агресією, суттєво вплинув на всі сфери економіки, особливо на логістику мультимодальних перевезень. Порушення транспортних маршрутів, ризики для персоналу, нестача пального та знищення інфраструктури — всі ці фактори вимагають нових підходів до організації логістичних процесів. Одним з ключових інструментів адаптації є цифровізація, яка дозволяє гнучко реагувати на зміни, забезпечувати координацію та швидкий обмін інформацією.

Останні роки характеризуються зростанням наукового інтересу до цифровізації логістичних процесів, особливо у контексті кризових ситуацій, таких як пандемія COVID-19, а з 2022 року — повномасштабна війна в Україні. Вітчизняні та зарубіжні дослідники активно досліджують трансформацію логістики під впливом цифрових технологій.

Зокрема, у праці авторів [1] розглядаються основні виклики, що постають перед логістичною системою України під час воєнного стану, і підкреслюється роль цифрових інструментів у забезпеченні стійкості логістичних ланцюгів. Топалов Р. [2] аналізує вплив цифрової трансформації на ефективність перевезень, в якій основну роль відіграють штучний інтелект, автоматизація та цифрова комунікація. Також **Європейські звіти та публікації OECD, WEF (World Economic Forum)** висвітлюють успішні кейси цифровізації в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема в країнах ЄС, де активно використовуються платформи управління ризиками, цифрове моделювання маршрутів і системи supply chain visibility.

Проте, незважаючи на значну увагу до теми, у вітчизняній науці все ще недостатньо ґрунтовних емпіричних досліджень, які б охоплювали реальні кейси впровадження цифрових технологій у логістиці під час бойових дій, ефективність конкретних цифрових рішень в умовах деструкції інфраструктури та інформаційної нестабільності та оцінку цифрової зрілості логістичних підприємств України в кризових умовах відсутні. Також залишається недостатньо вивченим питання **кібербезпеки в цифровій логістиці**, особливо на фоні гібридних загроз, що включають кібератаки на логістичну інфраструктуру, державні реєстри, цифрові платформи тощо.

Таким чином, хоча наукова база з проблем цифровізації логістики активно формується, значна частина прикладних аспектів залишається відкритою. Це створює потребу у міждисциплінарних

дослідженнях, що поєднуюватимуть транспортну логістику, інформаційні технології, військову економіку та безпекові науки.

Виклад основного матеріалу. Воєнний стан, запроваджений в Україні через широкомасштабну агресію, суттєво змінив функціонування мультимодальних логістичних систем. Порушення транспортних маршрутів, руйнування інфраструктури, нестача пального, загроза безпеці персоналу, зростання ризиків та витрат на перевезення — усе це вимагає нових підходів до організації логістики. В умовах такої нестабільності саме цифровізація транспортної логістики виступає ефективним засобом адаптації до сучасних викликів, дозволяючи забезпечити гнучкість, стійкість та безперебійність логістичних операцій.

Цифрові технології відіграють ключову роль у відновленні та стабілізації логістичних процесів на транспорті. Завдяки впровадженню IT-рішень забезпечується моніторинг руху вантажів у режимі реального часу за допомогою GPS-систем, швидкий обмін інформацією між усіма учасниками ланцюгів постачання через електронні платформи, а також аналітична обробка даних для прогнозування ризиків та оптимізації рішень. У кризових умовах цифрові інструменти дозволяють скоротити час на ухвалення рішень, ефективно планувати маршрути, уникати небезпечних ділянок і забезпечувати безперервне постачання критично важливих вантажів, зокрема гуманітарної допомоги, ліків, пального.

Цифрові інструменти транспортної логістики мультимодальних перевезень наведені у табл. 1. Вони дозволяють значно скоротити час на ухвалення рішень, оперативно реагувати на зміну умов (наприклад, обстріли, блокування доріг, зміни в роботі пунктів пропуску), уникати небезпечних ділянок, і, як наслідок, забезпечувати безперервність постачання критично важливих вантажів. Це стосується насамперед гуманітарної допомоги, медикаментів, продовольства, пального, які мають надходити вчасно до зон, що перебувають у надзвичайному або бойовому стані.

Таблиця 1 - Цифрові інструменти логістики мультимодальних перевезень

Цифровий інструмент	Призначення	Приклади
GPS-трекінг та супутниковий моніторинг	Відстеження руху вантажів у реальному часі, корекція маршрутів	Google Maps API, Here Tracking
TMS (Transportation Management Systems)	Оптимізація маршрутів і графіків перевезень	SAP Transportation Management, Oracle TMS
WMS (Warehouse Management Systems)	Автоматизація складських процесів, облік запасів	Manhattan WMS, Infor WMS
Хмарні сервіси та електронні платформи	Миттєвий обмін інформацією між учасниками логістичного ланцюга	Prozorro.Продажі, Microsoft Azure, Amazon Web Services
Big Data та аналітика	Прогнозування ризиків, виявлення вузьких місць	Tableau, Power BI, Hadoop
AI та машинне навчання	Формування оптимальних сценаріїв дій на основі прогнозів	IBM Watson, Google AI, TensorFlow
Мобільні додатки для логістів і водіїв	Оперативне інформування про ситуацію на маршрутах	Trans.eu, Project44, логістичні мобільні додатки
Електронний документообіг (eTTN, eCMR)	Скорочення часу на оформлення документів, прозорість операцій	e-TTN в Україні, eCMR у ЄС
Дрони та IoT-пристрої	Моніторинг інфраструктури, доставка критичних вантажів	DJI дрони, IoT-сенсори для вантажів і транспорту

Впровадження сучасних IT-рішень дозволяє здійснювати моніторинг руху вантажів у режимі реального часу з використанням GPS-трекінгу, що забезпечує прозорість логістичних операцій та контроль за дотриманням маршрутів.

Електронні платформи та хмарні сервіси забезпечують миттєвий обмін інформацією між усіма учасниками логістичного ланцюга — від постачальників і перевізників до митних та прикордонних служб. Це скорочує час реагування, зменшує ризик помилок, а також сприяє інтеграції приватних та державних структур у єдиний цифровий простір управління логістикою.

Важливим компонентом є аналітична обробка великих обсягів даних (Big Data), яка дає змогу оперативно виявляти затримки, прогнозувати вузькі місця в системі перевезень, а також приймати оптимальні управлінські рішення щодо планування маршрутів, перерозподілу ресурсів або зміни напрямків доставки. У кризових умовах — особливо при зруйнованій інфраструктурі або нестабільній ситуації на місцевості — такі рішення є критично важливими.

Цифрові інструменти дозволяють значно скоротити час на ухвалення рішень, оперативно реагувати на зміну умов (наприклад, обстріли, блокування доріг, зміни в роботі пунктів пропуску), уникати небезпечних ділянок, і, як наслідок, забезпечувати безперервність постачання критично важливих вантажів. Це стосується насамперед гуманітарної допомоги, медикаментів, продовольства, пального, які мають надходити вчасно до зон, що перебувають у надзвичайному або бойовому стані.

Крім того, цифровізація сприяє покращенню взаємодії між цивільними та військовими структурами, зменшенню навантаження на документообіг завдяки електронним накладним (eTTN), оптимізації витрат та формуванню довгострокових стратегій розвитку логістичної інфраструктури навіть в умовах невизначеності.

Цифровізація логістики в умовах війни чинить багатовимірний вплив на людський фактор, змінюючи як характер трудової діяльності, так і вимоги до персоналу. Насамперед цифрові інструменти зменшують фізичне та інформаційне навантаження на працівників, автоматизуючи рутинні операції — заповнення документів, відстеження вантажів, облік запасів. Це сприяє зниженню втоми, мінімізації помилок та зростанню точності дій, що особливо важливо в умовах нестабільності та стресу. Одночасно цифровізація підвищує відповідальність персоналу, оскільки дії фіксуються в системах у реальному часі, що вимагає вищого рівня самоконтролю, цифрових компетентностей та постійного оновлення знань. IT-рішення також істотно знижують ризики, пов'язані з людським фактором, оскільки завдяки аналітичній обробці даних управлінські рішення приймаються на основі точних розрахунків і прогнозів, а не лише інтуїції або досвіду.

Однак поряд із позитивними ефектами зростає й вразливість: за статистикою CERT-UA, переважна більшість успішних кібератак пов'язані з людською необережністю — відкриттям фішингових листів, використанням ненадійних паролів чи нехтуванням процедурами кібербезпеки. Це висуває нові вимоги до навчання персоналу правилам цифрової гігієни та безпечної поведінки в інформаційному середовищі. Водночас цифрова трансформація може викликати психоемоційне перенавантаження, особливо в умовах воєнного стану, коли працівники змушені швидко адаптуватися до нових інструментів у ситуації обмеженого ресурсу, тривожності та нестабільності. Впровадження цифрових рішень без належної підготовки або підтримки може викликати опір, зниження мотивації чи навіть професійне вигорання. Отже, цифровізація не лише трансформує логістичні процеси, а й суттєво змінює роль людини в системі управління перевезеннями. Вона потребує стратегічного управління людським фактором: інвестицій у навчання, адаптацію, психологічну підтримку та побудову культури безпеки й відкритості до змін.

Практичними прикладами цифровізації транспортної логістики в умовах війни є використання інтегрованих державних систем, таких як «Шлях» створена Міністерством інфраструктури України у співпраці з Службою безпеки України та Державною прикордонною службою [3]. Вона дозволяє **отримувати електронні дозволи на виїзд водіїв-чоловіків за межі країни**, що значно скорочує час і бюрократичні процедури, забезпечуючи прозорість і контроль для видачі дозволів на перевезення, цифрові карти з оновлюваною інформацією про стан доріг та зони ризику, платформи

Prozorro. Продажі для логістики гуманітарної допомоги, а також впровадження дронів для доставки вантажів або моніторингу ситуації на маршрутах. Крім того, використання автоматизованих складських систем (WMS), електронного документообігу, систем управління транспортом (TMS) значно зменшує вплив людського фактора, підвищує точність і прозорість логістичних процесів.

Водночас цифровізація в умовах війни має й певні ризики. Зокрема, зростає залежність логістичних компаній від стабільної IT-інфраструктури та інтернет-зв'язку, підвищується небезпека кібератак і витоку конфіденційної інформації. Також частина персоналу може не мати достатньої підготовки для ефективного використання цифрових інструментів, що потребує додаткових навчальних програм.

Особливу увагу в умовах воєнного стану заслуговує проблема **кібербезпеки цифрових транспортних логістичних систем**. З впровадженням цифрових інструментів — від систем управління перевезеннями (TMS), електронного документообігу, хмарних платформ до автоматизованих систем складування (WMS) — транспортна логістика стає все більш залежною від IT-інфраструктури та стабільного захищеного інтернет-з'єднання. Це відкриває нові вектори для кібератак, які можуть бути спрямовані не лише на бізнес-процеси, а й на **критично важливу інфраструктуру країни**.

У сучасних умовах транспортна логістика — це не лише транспортування вантажів, а й обробка великих обсягів даних про маршрути, постачання, склади, гуманітарну допомогу, які можуть становити цінну або вразливу інформацію для противника. **Хакерські атаки на логістичні системи можуть призводити до блокування постачань, саботажу транспорту, витоку інформації про переміщення військових або критичних ресурсів**.

На думку експертів з кібербезпеки (зокрема, згідно з аналітикою CERT-UA та звітами компаній Cisco, Kaspersky та IBM Security), з 2022 року в Україні фіксується зростання цілеспрямованих кібератак саме на логістичні компанії, державні транспортні платформи та цифрові інструменти управління перевезеннями [4, 5]. Особливо вразливими вважаються:

- **Хмарні сервіси без багатофакторної автентифікації;**
- **Системи зберігання резервних копій без шифрування;**
- **API-з'єднання з державними платформами** (які можуть бути джерелом як витоку даних, так і інструментом зараження);
- **Низький рівень цифрової грамотності персоналу**, який створює загрозу фішингу або несанкціонованого доступу.

Наукові дослідження авторів [6, 7] підкреслюють, що одним із головних бар'єрів впровадження цифрової логістики є не технічна, а **організаційно-безпекова підготовленість компаній** до цифрової трансформації. Часто не існує внутрішніх політик інформаційної безпеки, не проводять регулярного навчання персоналу з протидії кібератакам та не здійснюють тестування на проникнення в свої системи.

Таким чином, **кібербезпека є не лише технічним, а й стратегічним компонентом цифрової транспортної логістики**. Її ігнорування може звести нанівець переваги цифровізації, поставити під загрозу життя людей і ефективність військово-гуманітарної логістики. Незважаючи на визнання проблеми у фаховій літературі, **практичних досліджень з вітчизняного досвіду протидії кібератакам у логістиці в період активних бойових дій майже немає**. Це становить важливу перспективу для подальших міждисциплінарних досліджень на стику транспортної логістики, кібербезпеки та воєнної економіки.

Попри ризики, цифрова трансформація транспортної логістики залишається необхідною умовою для її функціонування в умовах війни та перспективного розвитку в повоєнний період. Після завершення бойових дій саме цифрова логістика стане основою для побудови ефективних, інтегрованих у європейський простір транспортно-логістичних систем України. Очікується розширення державних і приватних цифрових платформ, масштабна підготовка логістичних кадрів,

підвищення рівня автоматизації, а також активна інтеграція з міжнародними логістичними сервісами.

Таким чином, цифровізація транспортної логістики в умовах воєнного стану є не лише відповіддю на загрози, а й важливим кроком до модернізації галузі та зміцнення економічної безпеки України.

Висновки. Цифровізація є ключовим фактором стійкості та адаптивності логістики в мультимодальних перевезеннях умовах воєнного стану. Вона дозволяє зменшити ризики, зберегти ефективність і забезпечити гнучке управління ланцюгами постачання навіть у критичних умовах. Успішна цифровізація транспортної логістики потребує комплексного підходу: розвитку технологій, модернізації інфраструктури, захисту інформаційних систем і — що не менш важливо — системної роботи з людським капіталом. Саме синергія технологічних рішень та підготовленого персоналу дозволяє забезпечити ефективну логістику навіть в умовах гібридних загроз та обмежених ресурсів. Важливо, щоб цифрова трансформація транспортної логістики продовжувалась і в післявоєнний час як складова відновлення економіки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Целлер, В., Крамський, С. (2024). Інфраструктурна підтримка інновацій в сфері транспортної логістики в умовах турбулентності під час війни. *Економіка та суспільство*, (67). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-67-142>
2. Топалов, Р. (2024). Цифрова трансформація логістичних систем: сутнісна характеристика та особливості. *Економіка та суспільство*, (70). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-70-58>
3. Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України. Нова онлайн-послуга для міжнародних перевізників спрощує перетин кордону // Сайт Державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури України. – 14.09.2023. – Режим доступу: <https://restoration.gov.ua/press/news/57092.html> (дата звернення: 02.07.2025).
4. CERT-UA. *War in Ukraine: Pulse of Cyber Defense*. – 2023. – Режим доступу: <https://nsarchive.gwu.edu/media/30055/ocr> (дата звернення: 02.07.2025).
5. AP News. *Russian hackers target Western firms shipping aid to Ukraine, US intelligence says*. – 29.05.2025. – Режим доступу: <https://apnews.com/article/6308ca3e11c8299470df573e4f422878> (дата звернення: 02.07.2025).
6. Венгерська, Н., Сулейманова А. (2024). Кібербезпека України в контексті міжнародної співпраці з великою британією та глобалізаційних викликів. *Фінансові стратегії інноваційного розвитку економіки*, (4 (60)), 81-85. <https://doi.org/10.26661/2414-0287-2023-4-60-14economyandsociety.i>
7. Черниш Ю., Мальцева І. та ін. (2023). Підходи до захисту інформації в організаціях під час надзвичайного (воєнного) стану // *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. Т4 (20), с 93-99. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.20>

Стаття прийнята 10.09.2025

В.О. Овчарук, І.В. Ющук

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА МОРСЬКИХ МАРШРУТАХ НА ОСНОВІ МЕРЕЖЕВОЇ ТРАНСПОРТНОЇ ЗАДАЧІ

У статті представлено підхід до математичного моделювання та оптимізації контейнерних перевезень у морських транспортних мережах із урахуванням динаміки графіків руху суден. Запропонована методика ґрунтується на застосуванні мережеских транспортних моделей, які відображають структуру взаємодії портів, складів та транспортних вузлів у вигляді орієнтованого графа. Вузли мережі відповідають подіям або станам системи (прибуття суден, наявність контейнерів, можливість зберігання чи переміщення), а дуги характеризують можливі напрямки контейнерних потоків із заданими параметрами вартості та пропускної спроможності. Розроблена математична модель враховує черговість заходів суден у порти та дозволяє формалізувати операції перевезення та зберігання контейнерів між заходами. Для розв'язання задачі оптимізації використано комбінацію методів лінійного програмування, алгоритмів оптимального потоку в мережах та методу потенціалів. Таке поєднання забезпечує швидке отримання наближених до оптимальних рішень навіть у задачах великої розмірності.

Практична реалізація математичної моделі здійснена за допомогою програмних засобів, що забезпечило інтеграцію математичних алгоритмів із сучасними інформаційними системами управління транспортом. Результати моделювання, проведеного на даних, наближених до реальних умов міжнародних морських ліній, показали зниження сукупних витрат на транспортування та зберігання контейнерів на 12–18%, зменшення порожніх пробігів і покращення балансу між використанням власних та орендованих контейнерів. Отримані результати підтверджують, що запропонований підхід є ефективним інструментом для планування та оперативного управління контейнерними перевезеннями і може бути адаптований до інших видів транспорту з багаторівневою структурою мережі.

Ключові слова: мережева транспортна задача, оптимізація, метод потенціалів, оптимізація логістики, контейнерні перевезення, морські транспортні мережі.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток світової транспортно-логістичної системи супроводжується постійним зростанням обсягів вантажоперевезень. Таке зростання зумовлює необхідність удосконалення методів управління транспортними процесами. Контейнерні перевезення забезпечують високу ефективність логістичних операцій, гнучкість у формуванні транспортних ланцюгів та скорочення витрат часу на перевалку вантажів. Водночас підвищення конкуренції на ринку транспортних послуг та жорсткі терміни доставки обумовлюють потребу у впровадженні інноваційних підходів до планування та управління рухом контейнерного парку.

Традиційні методи організації перевезень з великою кількістю пунктів обробки вантажів, багатоваріантністю маршрутів та значними коливаннями попиту стають недостатньо ефективними. Проблема ускладнюється необхідністю оптимально розподіляти ресурси у реальному часі, врахувати обмеження потужності, використовувати власні та орендовані контейнери.

Одним із шляхів вирішення цих завдань є застосування математичних моделей транспортного типу. Мережеві транспортні моделі дозволяють комплексно описати рух вантажопотоків, врахувати специфічні обмеження та критерії оптимізації. Використання економіко-математичних методів у поєднанні з сучасними інформаційними технологіями відкриває можливості для оперативного прийняття рішень, підвищення точності планування та ефективності управління контейнерними перевезеннями на морському транспорті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мережеві транспортні задачі вже майже півстоліття посідають центральне місце у сфері математичного моделювання процесів перевезень і розподілу ресурсів. Їх активне дослідження відбувається у теоретичному напрямі розвитку методів операційного аналізу і в прикладному аспекті вирішення практичних завдань планування транспортних потоків [1]. Висока зацікавленість науковців у проблематиці мережевих транспортних задач пояснюється їх універсальністю та значущістю для економіки. Адже транспортні задачі відображають ключові закономірності функціонування логістичних систем, забезпечують основу для раціонального використання матеріальних, фінансових і часових ресурсів та сприяють підвищенню ефективності виробничо-господарської діяльності [2].

У роботі [3] розглянуто моделі оптимального потоку в мережах та їхнє застосування у транспортній логістиці. Автори детально описують алгоритми для знаходження оптимальних маршрутів з урахуванням пропускної спроможності, вартості перевезення та часових обмежень. Значна увага приділена особливостям реалізації цих алгоритмів у програмних середовищах та можливостям використання у комплексних логістичних системах.

Дослідження [4] присвячене розробці та застосуванню математичного апарату для оптимізації роботи транспортних систем. У роботі наведено приклади використання лінійного програмування для розподілу вантажопотоків, визначення оптимальних маршрутів та завантажень. Детально розглянуті задачі великої розмірності, де необхідна ефективна декомпозиція задачі та використання спеціалізованих алгоритмів. Поєднання математичних методів із сучасними інформаційними технологіями створює умови для побудови гнучких, масштабованих систем управління транспортом.

У роботі [5] проаналізовано методи планування роботи рухомого складу з урахуванням технічного стану транспортних засобів, їх завантаженості та режимів експлуатації. Автори підкреслюють важливість синхронізації транспортних процесів і використання адаптивних планів перевезень. Також враховується динаміка попиту та зміну дорожніх умов. Запропоновані підходи базуються на інтеграції планових та диспетчерських рішень. Такий підхід дозволяє зменшити простой, підвищити коефіцієнт використання пробігу та знизити експлуатаційні витрати.

Використання сучасних інструментів програмування дозволяє застосовувати практичні підходи до реалізації алгоритмів транспортних задач [6]. Дослідники використовують метод потенціалів та проводять аналіз результатів на прикладах реальних задач. Використання Python дозволяє створювати інтерактивні моделі, легко інтегровані з базами даних та аналітичними панелями. Такий підхід є результативним для оперативного планування.

Для розробки автоматизації процесу планування пропонуються концепції та інструменти для моніторингу перевезень [7]. Зроблено акцент на інтеграції баз даних, геоінформаційних систем та математичних моделей для формування оптимальних планів доставки [8]. Автори пропонують створення модульних систем, які можуть адаптуватися до змін умов роботи транспортних підприємств. Також може використовуватись сценарний аналіз для вибору найкращої стратегії в умовах невизначеності [9].

Постановка завдання. Метою статті є розробка та обґрунтування ефективної математичної моделі управління контейнерними перевезеннями. Така економіко-математична модель базується на принципах мережевих транспортних задач і враховує специфіку функціонування транспортно-логістичних систем у реальному часі.

Запропонований підхід передбачає створення формалізованого опису процесів переміщення контейнерного парку з урахуванням обмежень на потужності перевезень, терміни виконання замовлень, доступність контейнерів у різних пунктах обробки вантажів та вартості транспортних, орендних і вантажно-розвантажувальних операцій.

Інтеграція математичної моделі з інформаційними системами управління та використання алгоритмів підтримки прийняття рішень дають можливість автоматично збирати дані про рух транспорту, обробляти їх та своєчасно коригувати планові показники. Для реалізації транспортної задачі застосовуються методи, що базуються на лінійному програмуванні та алгоритмах оптимального потоку в мережах.

У математичній моделі розглядалось розв'язання задачі на транспортній мережі, що досить часто зустрічається на практиці [10], а конкретно мережеву транспортну задачу.

Викладення основного матеріалу. Побудова єдиної сітьової моделі для оптимізації контейнерних перевезень передбачає врахування графіка або черговості прибуття кожного судна-контейнеровоза до кожного порту заданої лінії. Черговість заходів суден у порти визначається для конкретної транспортної мережі і для заданого періоду планування.

Для прикладу розглянемо ситуацію, коли у перший порт лінії першим заходить друге судно при своїй першій зупинці, другим — третє судно, також на першій зупинці, і третім — перше судно при першій зупинці. У другий порт першим заходить третє судно (перша зупинка), другим — друге судно (друга зупинка), третім — перше судно (друга зупинка). У третій порт першим прибуває третє судно (третя зупинка), за ним — друге судно (третя зупинка), тоді як перше судно в цей порт не заходить. Задача може бути представлена у вигляді схеми, де кожна комірка містить номер судна та номер його зупинки у відповідному порту (рис. 1).

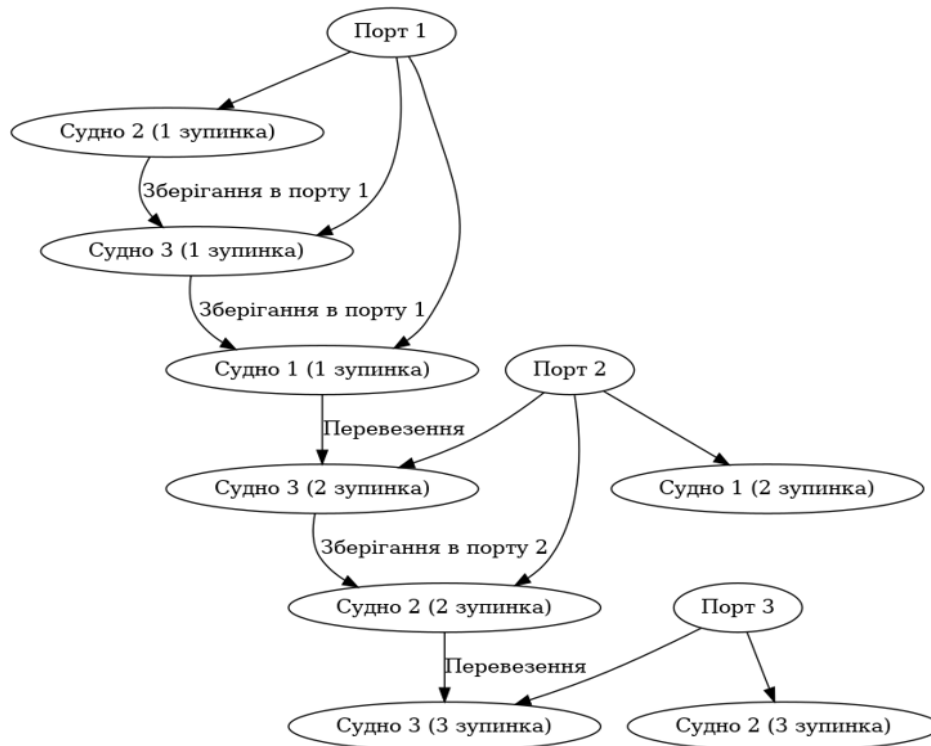


Рисунок . 1 – Схема руху суден

Джерело: розроблено авторами

На основі такої схеми виконується нумерація вершин моделі та формується транспортна мережа. Кожна вершина відповідає певному стану або події — прибуттю судна, наявності контейнерів у порту, можливості їхнього переміщення або зберігання. Це дає змогу однозначно ідентифікувати елементи мережі та забезпечує коректне формування математичної моделі.

Наприклад, коли друге судно прибуває до першого порту, існує кілька варіантів задоволення потреб у порожніх контейнерах до прибуття наступного судна. По-перше, можна залишити частину контейнерів у порту. У термінах потокової моделі така дія відповідає додаванню дуги між вершинами, яка відображає можливість збереження контейнерів у часі з певною вартістю (витратами на зберігання між заходами двох конкретних суден). По-друге, у порту можуть залишатися контейнери, що вже є на момент прибуття судна, включаючи орендовані. Це також моделюється додаванням відповідних дуг між джерелами потоку з урахуванням вартості зберігання між заходами.

Аналогічний підхід застосовується для всіх портів і суден відповідно до їхнього графіка. Формування таких дуг у моделі дозволяє врахувати як прямі перевезення контейнерів між портами, так і зберігання ресурсів у межах порту між заходами суден. У результаті формується повна сітьова

структура, в якій кожна дуга характеризується пропускною спроможністю та вартістю, а кожна вершина — функціональною роллю в транспортному процесі.

У побудованій моделі для зручності всі вершини мережі було пронумеровано від 1 до 39. Припустимо, що друге судно здійснює захід у перший порт. У такій ситуації виникає декілька можливих способів забезпечення потреб у порожніх контейнерах до моменту прибуття наступного судна.

Перший варіант полягає у залишенні частини контейнерів, що доставляються судном, безпосередньо в порту. У термінах мережевих потоків це відповідає можливості перенесення потоку з вершини-стоку 4 до вершини-стоку 8 з метою покриття наявного попиту. Відповідно, між зазначеними вершинами вводиться дуга (4;8), по якій переміщується кожна одиниця потоку з вартістю, еквівалентною витратам на зберігання одного контейнера в порту 1 у період між заходами контейнеровозів 2 та 3.

Другий варіант передбачає збереження в порту контейнерів, що перебували там до моменту прибуття судна, а також контейнерів, залучених шляхом оренди. Це відображається у мережі введенням дуги (25;29), яка поєднає вершину-джерело 25 з вершиною-джерелом 29, та дуги (34;38), що з'єднає вершини 34 і 38. Переміщення потоку по цих дугах моделює витрати, пов'язані із зберіганням контейнерів у порту 1 в інтервалі між заходами суден 2 і 3.

Аналогічні структурні зв'язки представлені на рисунку 2. Зокрема, вершини 1 і 8 з'єднано дугою (8;1), вершини 29 і 22 — дугою (29;22), а вершини 38 і 31 — дугою (38;31). Крім того, вершини 7 і 5 поєднані дугою (7;5), вершини 26 і 23 — дугою (26;23), вершини 35 і 32 — дугою (35;32). Вершини 9 і 6 з'єднано дугою (9;6), тоді як вершини 30 і 27 та вершини 39 і 36 — відповідно дугами (30;27) і (39;36). Усі ці дуги відображають можливості перерозподілу потоків контейнерів у межах мережевої моделі та інтерпретуються як витрати на зберігання і переміщення у порту.

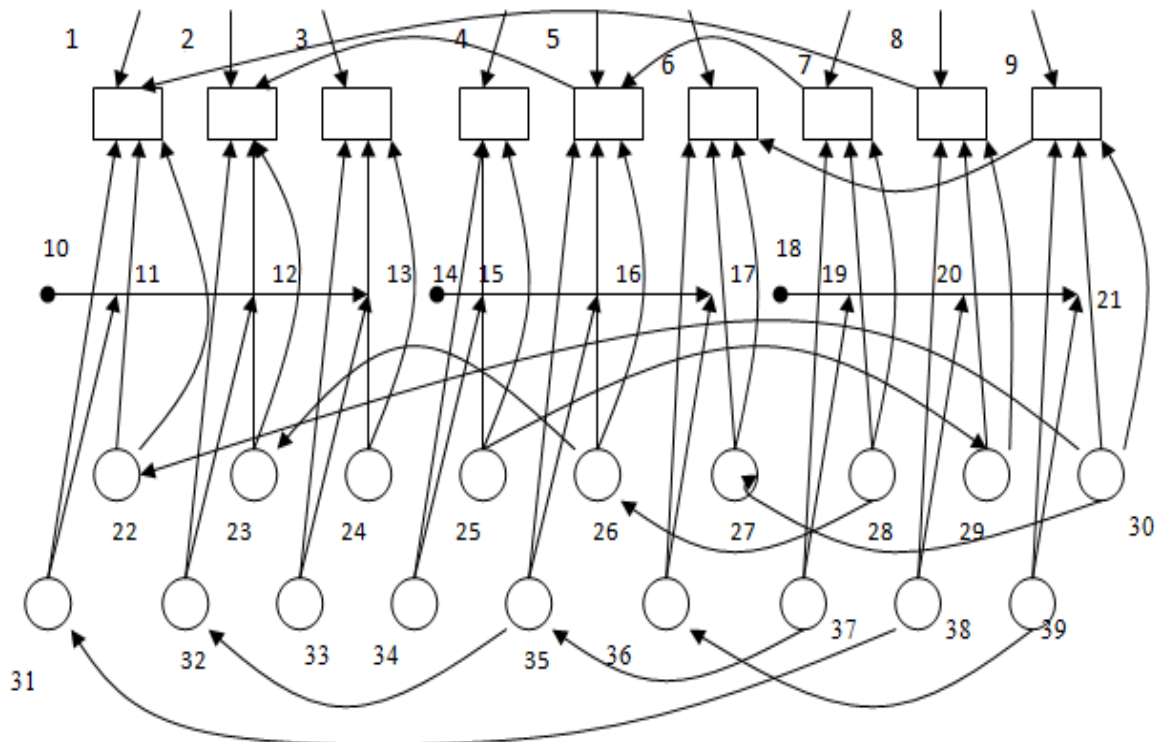


Рисунок 2 – Мережа для типової ситуації на міжнародній морській лінії

Джерело: розроблено авторами

Запропоновані правила побудови мережі є формалізованими та можуть бути алгоритмізовані для автоматичної реалізації у програмному середовищі. Це дозволяє швидко будувати моделі для різних варіантів графіків руху та швидко оновлювати їх при зміні умов експлуатації.

Використання алгоритмів оптимального потоку та методу потенціалів дозволяє вирішувати задачі великої розмірності. В таких задачах враховується обмеження реального середовища. Це можуть бути ситуації з пропускною спроможністю портів, обмеженим парком контейнерів, часовими вікнами заходів суден. При цьому час розв'язання задачі суттєво скорочується порівняно з класичними методами лінійного програмування.

Практична перевірка моделі на даних, наближених до реальних умов міжнародних морських ліній, показала, що оптимізація дозволяє зменшити сумарні витрати на перевезення та зберігання контейнерів у середньому на 12–18 % залежно від конфігурації транспортної мережі. Також вдалося знизити кількість порожніх пробігів і покращити баланс між використанням власних та орендованих контейнерів.

Таблиця 1. Результати моделювання оптимізації контейнерних перевезень

Показник	До оптимізації (%)	Після оптимізації (%)
Витрати на транспортування та зберігання	100	85
Кількість порожніх пробігів	100	82
Ефективність використання власних контейнерів	100	112
Частка орендованих контейнерів	100	88
Час розрахунків моделі	100	55

Джерело: розроблено авторами

Інтеграція математичної моделі з інструментами Python (бібліотеки оптимізації PuLP, NetworkX, SciPy) дає змогу створити гнучке обчислювальне середовище для сценарного аналізу. Це дозволило тестувати різні стратегії реагування на непередбачувані ситуації, наприклад, зміни у розкладі суден або тимчасову недоступність окремих портів.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило, що застосування мережевих транспортних моделей для оптимізації контейнерних перевезень на морських лініях є ефективним інструментом підвищення економічної та операційної результативності транспортних систем. Запропонована методика побудови моделі з урахуванням черговості заходів суден у порти та можливостей зберігання контейнерів дозволяє формалізувати складні логістичні процеси у вигляді орієнтованої мережі, придатної для автоматизованого опрацювання.

Використання алгоритмів оптимального потоку, методу потенціалів, евристичних процедур для задач великої розмірності забезпечує швидке отримання оптимальних або наближених до оптимальних рішень у режимі, наближеному до реального часу. Поєднання математичного моделювання з інструментами програмної реалізації та інтеграція з інформаційними системами управління транспортом підвищують гнучкість і масштабованість розробленої методики.

Отримані результати свідчать про зменшення сукупних витрат на транспортування та зберігання контейнерів, скорочення порожніх пробігів і підвищення ефективності використання контейнерного парку. Можливість сценарного аналізу дає змогу транспортним операторам адаптувати плани до змін попиту, графіків руху та позаштатних ситуацій.

Розроблений підхід може бути успішно впроваджений у практику управління контейнерними перевезеннями не тільки на морських лініях, а і на інших видах транспорту, де актуальною є задача оптимального розподілу вантажопотоків у складних багаторівневих мережах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Іваницька О.В., Рощина Н.В., Сербул Р.С. Транспортна задача лінійного програмування. *Агросвіт*. 2015. Вип. 14. С. 35–40.
2. Bielli M., Bielli A., Rossi R. Trends in models and algorithms for fleet management. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 2011. Vol. 20. P. 4–18. DOI: [10.1016/j.sbspro.2011.08.004](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.004)
3. Прокудін Г.С. та ін. Розв'язання мережевих транспортних задач у середовищі Excel. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. Т. 31. Вип. 5. С. 214–219. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.5/35>.
4. Кавун Г.М. Економіко-математичні моделі для розрахунку оптимального планування вантажоперевезень в аграрних підприємствах. *Таврійський науковий вісник. Серія: Економіка*. 2021. Вип. 10. С. 38–44. URL: <https://doi.org/10.32851/2708-0366/2021.10.5>.
5. Кузькін, О.Ф., Муковська Д.Я., Райда І.М., Веремеєнко Л.А. Оптимізація оперативного управління використання парку автомобільних транспортних засобів промислового підприємства. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. Вип. 1(88). С. 63–71. URL: <http://dx.doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.8>.
6. Тарас Кобильник, Оксана Сікора, Тетяна Вдовичин. Методичні аспекти розв'язування транспортної задачі з мовою python. *Молодь і ринок*. 2024. № 13. С. 72–77. URL: <https://doi.org/10.24919/2308-4634.2024.320565>.
7. Pinto R., Lagorio A., Golini R. Urban Freight Fleet Composition Problem. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51(11). P. 582–587. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.305>
8. Lemme, R.F.F., Arruda, E.F., Bahiense, L. Optimization model to assess electric vehicles as an alternative for fleet composition in station-based car sharing systems. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2019. Vol. 67, p. 173–196. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.004>
9. Development of Vehicle Speed Forecasting Method for Intelligent Highway Transport System / G. Prokudin et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. №. 4/3 (100). P. 6–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174255
10. O. Prokudin. Application of Information Technologies for the Optimization of Itinerary when Delivering Cargo by Automobile Transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. №. 2/3 (92). P. 51–59. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.128907

REFERENCES

1. Ivanytska, O. V., Roshchyna, N. V., & Serbul, R. S. (2015). Transportation problem of linear programming. *Agrosvit*, (14), 35–40 [in Ukrainian].
2. Bielli, M., Bielli, A., & Rossi, R. (2011). Trends in models and algorithms for fleet management. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 4–18. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.002>
3. Prokudin, H. S., et al. (2020). Solving network transportation problems in the Excel environment. *Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 31(5), 214–219 40 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.5/35>
4. Kavun, H. M. (2021). Economic and mathematical models for calculating optimal freight transport planning in agricultural enterprises. *Tavriya Scientific Bulletin. Series: Economics*, (10), 38–44 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32851/2708-0366/2021.10.5>
5. Kuzkin, O. F., Mukovska, D. Ya., Rayda, I. M., & Veremeyenko, L. A. (2024). Optimization of operational management of the use of industrial enterprise vehicle fleets. *Bulletin of Kherson National Technical University*, 1(88), 63–71 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.8>

6. Kobylnyk, T., Sikora, O., & Vdovychyn, T. (2024). Methodical aspects of solving the transportation problem using Python language. *Youth and the Market*, (13), 72–77 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.24919/2308-4634.2024.320565>
7. Pinto, R., Lagorio, A., & Golini, R. (2018). Urban freight fleet composition problem. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 582–587. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.305>
8. Lemme, R. F. F., Arruda, E. F., & Bahiense, L. (2019). Optimization model to assess electric vehicles as an alternative for fleet composition in station-based car sharing systems. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, 173–196. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.004>
9. Prokudin, G., et al. (2019). Development of vehicle speed forecasting method for intelligent highway transport system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/3(100), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174255>
10. Prokudin, O., et al. (2018). Application of information technologies for the optimization of itinerary when delivering cargo by automobile transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/3(92), 51–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.128907>

Volodymyr Ovcharuk, Inna Yushchuk

COMPUTER MODELLING AND OPTIMISATION OF CONTAINER TRANSPORT ON SEA ROUTES BASED ON A NETWORK TRANSPORT PROBLEM

The purpose of this article is to develop and improve the methodology of mathematical modeling and optimization of container transportation in maritime transport networks, taking into account the dynamics of vessel schedules and the specifics of port operations. The research is aimed at creating a universal methodology that ensures higher efficiency of logistics flow management, reduction of operating costs, and better utilization of the container fleet. Particular attention is paid to developing models that consider the sequence of vessel arrivals at ports, the possibility of storing containers between arrivals, and the balance between owned and leased containers, which plays a key role in the functioning of modern transport and logistics systems.

The study reviews contemporary approaches to transportation optimization and identifies unresolved issues, particularly the insufficient integration of dynamic factors into network transport models. A mathematical model is proposed in the form of a directed graph, where nodes represent ports, storage facilities, and vessels, while arcs describe the possible routes of container flows with associated costs and time constraints. The solution approach combines methods of linear and integer programming, optimal flow algorithms, and the potentials method. The practical implementation was carried out in Python using the PuLP and NetworkX libraries, which enabled the automated construction of the network and scenario-based analysis under different operating conditions of maritime container transportation. Computational experiments demonstrated that the proposed approach reduces total transportation and storage costs by 12–18%, decreases empty runs by 15–20%, improves the efficiency of using owned containers by 10–15%, reduces the share of leased containers by 10–15%, and shortens computation time by 40–50% compared to traditional planning methods.

The obtained results confirm the feasibility of applying the developed methodology in maritime container transport management systems. The model is characterized by its universality and adaptability to dynamic changes in vessel schedules, making it suitable for practical implementation by logistics companies and transport operators. The proposed approach ensures improved economic efficiency of transport systems, better use of port infrastructure, and supports the development of integrated transport and logistics networks. Future research directions include extending the model to multimodal transportation and incorporating risk and uncertainty factors into decision-making processes.

Keywords: optimization, network transport model, transportation problem, potentials method, logistics, container transportation, maritime transport networks

Стаття прийнята 04.09.2025

© Шарко О.В., Дорошенко А.С.

THE IMPACT OF ENVIRONMENTAL FLUCTUATIONS ON THE PERFORMANCE OF INTERNATIONAL MARITIME TRANSPORTATION

This article presents an analytical review of the current state of global maritime fleet development and the impact of environmental fluctuations on the efficiency and effectiveness of international maritime transport. The research objective is to develop information and analytical tools to support maritime transport logistics processes in the face of unpredictable environmental changes, which is essential for improving the efficiency of international maritime transport management. The article notes the dominance of vessels of various functional purposes in maritime trade. China's dominance is supported by the bulk carrier and container ship sector, Japan by refrigerated vessels and liquefied petroleum gas vessels, the United States by cruise ships, and Singapore by vessels transporting liquefied natural gas and supporting offshore fields. The article determines that, against the backdrop of growing international transport, disruptions and interruptions associated with geopolitical conflicts and climate risks are observed. A substantive interpretation of the impact of geopolitical conflicts on the efficiency of maritime transport is offered. An analysis of the components of the influence of the external environment on the efficiency of transport is provided. The paper outlines the key trends in the modern development of maritime freight transportation in the context of dynamic environmental changes, including a 2% growth in global seaborne trade with significant cost fluctuations, regional transport disruptions, and rising consumer prices caused by rising freight rates. Recommendations and prospects for the development of maritime transportation in an uncertain environment are offered, including the use of modern low-carbon fuel technologies, coordinated route planning, and the development of new logistics solutions.

Keywords: transportation, international sea routes, analysis, status, external environment, obstacles, classification, trends, recommendations

Statement of the problem.

The relevance of this work relates to maritime logistics management processes under conditions of uncertain external disturbances on the operation of shipping facilities. Complex, constantly changing maritime shipping conditions negatively impact their implementation. When preparing shipping plans, it is necessary to consider, in addition to possible navigational and climatic conditions for their duration, intensity, and timing, equipment performance characteristics (fuel consumption, transit speed, main engine loads, etc.), as well as economic factors related to overall shipping costs associated with deviations from planned international routes, additional fuel consumption, and personnel salaries. Planning in advance for possible changes in maritime shipping conditions is virtually impossible, requiring management decisions to be made under conditions of uncertain environmental influences.

An analysis of recent research and publications on this issue shows that the necessary information on the impact of environmental fluctuations on maritime transport is reflected in estimates contained in statistical compendiums [1, 2]. However, a detailed analysis of the causes of environmental influence on the efficiency of international maritime transport is not provided. Uncertainty in management is associated with insufficient information on the conditions of specific situations during transport transitions, as well as a low degree of predictability and foresight of these conditions. Uncertainty is associated with risk in maritime transport management [3, 4].

In [5], it is noted that logistics in ports and maritime supply chains has reached such a level of complexity that decision-making under uncertainty requires the use of analytical methods in the form of decision support systems for various operational tasks. The problems and trends of the maritime shipping industry are specified. The rapidly changing external environment forces adaptation to external disturbances and the selection of

appropriate management tools. In [6], the characteristics and patterns of functioning of maritime shipping companies are examined in the context of permanent changes in the economic situation with the expansion of regulatory influences from international maritime organizations. In [7], factors hindering the systemic development and realization of the potential of multimodal transportation from the perspective of logistics and transportation are identified. A single-criteria approach to optimal planning of maritime transportation cannot currently be considered satisfactory, as there is no universal indicator that can be applied as a single criterion of optimality.

Maritime traffic management based on the exchange of digital information and optimization of the maritime transportation chain is considered in [8]. Factors for effective resource management include improved situational awareness on the bridge, timely arrival at port, and shorter routes.

The maritime transport and logistics sector requires intensive data exchange for effective management and decision-making. The integration of Internet of Things (IoT) technologies in the maritime industry [9] includes vessel tracking, emissions monitoring, and cargo delivery security. IoT solutions, adapted to the current needs of the maritime transport sector, are aimed at intelligentizing maritime services. [10] identifies key research challenges and trends in testing external induced loads, humidity, and transparency of bulk cargo during maritime transportation.

An analysis of information on maritime transport management tools under uncertainty allowed us to identify key processes in modern maritime transport information support and determine their focus on improving transport efficiency.

An unresolved aspect of the overall problem of managing the development of international maritime transport includes an assessment of the current state and the degree of influence of the external environment on process efficiency.

The aim of this work is to study the impact of environmental fluctuations on the performance and efficiency of international maritime transport and trends in these changes. To achieve this, the following tasks must be completed:

- compilation of an information and analytical database on global maritime transport;
- determining the volume of international maritime transport and its development trends;
- identifying the factors hindering the development of international maritime transport;
- specifying geopolitical conflicts and climate risks;
- drawing conclusions and recommendations.

Contribution to the main material of the investigation.

The global merchant fleet plays a key role in the global economy, transporting goods over long intercontinental distances. Countries with developed maritime fleets can export their goods and import necessary resources. Maritime transport accounts for up to 80% of all global shipping. In 2025, the global order book amounted to 5,404 vessels with a total deadweight of 346 million tonnes, a 15% increase over 2023 figures [2]. The development of the global maritime fleet is characterized by an increase in orders for vessels with increased transport volumes.

Today, the main categories of vessels—bulk carriers, tankers, container ships, and gas carriers—account for more than 90% of the total maritime fleet by tonnage. China has the largest fleet by number of vessels. China's dominance is supported by the development of the bulk carrier and container ship sectors, valued at US\$68.4 billion. Japan is the leader in the liquefied petroleum gas and refrigerated cargo segment, with a vessel value of \$49.9 billion. Greece has the largest tanker fleet, exerting strategic influence on global shipping lanes and enabling it to capitalize on geopolitical shifts. The United States continues to dominate the cruise sector, valued at \$58.6 billion. Singapore serves the petroleum gas and offshore support market, with a fleet valued at \$107.2 billion. Singapore's strategic location and developed port infrastructure have made it a maritime hub.

The sharp rise in ship prices is due to disruptions to maritime transport in the Red Sea, as ships divert their routes around the Cape of Good Hope to avoid military action. In December 2023, the political situation in the Middle East escalated, leading to attacks on cargo vessels transiting the Bab el-Mandeb Strait, which connects the Red Sea and the Gulf of Aden. Shippers are forced to seek alternative routes.

The dynamics of international maritime transport per ton of cargo, with a shift toward longer routes, is presented in Figure 1 [2].

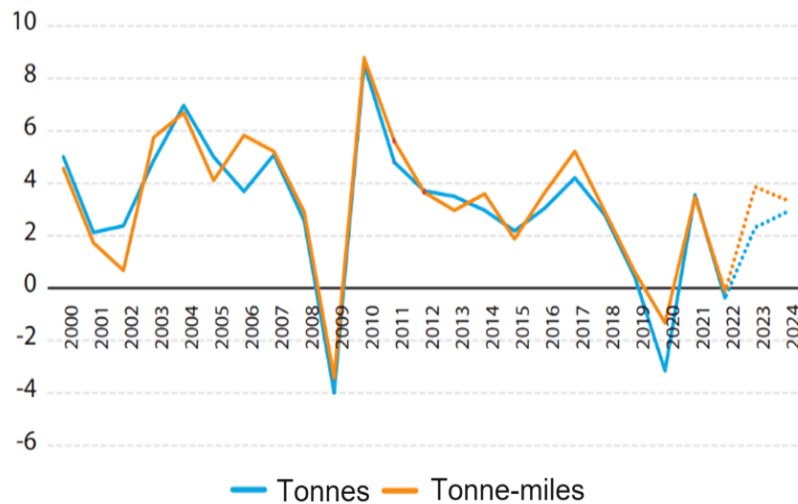


Fig. 1 – International Sea Transport Dynamics

Bypassing the African continent around the Cape of Good Hope adds 14-15 days to the Red Sea voyage on the China-Europe route. Bypassing Africa increases the distance and time of crossings, which in turn increases demand for vessels by 3% and container ships by 12% [1]. The increased route lengths have led to an increase in the number of port calls. This has complicated the maritime operational environment and exacerbated environmental problems associated with additional carbon dioxide emissions caused by increased fuel consumption and faster vessel speeds. The challenging operational environment for maritime transport, driven by geopolitical conflicts and climate risks, is hampering the stability of maritime trade. The increased route lengths have led to congestion, particularly in Asia, which accounts for 60% of global container trade. By mid-2024, vessel transit through the Suez Canal had declined: throughput through the Gulf of Aden had fallen by 76%, while transit through the Cape of Good Hope had increased by 85%. Lengthening the routes had led to increased costs for fuel, wages, and insurance, and had caused an increase in atmospheric emissions. Rising trade costs and shipping tariffs had led to an increase in global consumer prices. Simulation calculations show a 0.9% increase in consumer prices. This will have the greatest negative impact on the development of small island developing states, as these countries depend on maritime transport, particularly on the import and export of food products. Due to global changes and disruptions in strategically important shipping lanes, real GDP is projected to decline by 0.06%, and in these countries, the decline may be nearly halved, as meteorological factors such as air temperature, wind speed, direction, and precipitation intensity are the determining factors.

According to the UN Conference on Trade and Development, they will grow by 0.6% in 2025 due to rising shipping costs. The dynamics and trends in maritime trade demonstrate the continued focus on international maritime transport.

The concept of risk is associated with an assessment of the probability of occurrence of events, while the concept of uncertainty does not have such an assessment of probability. There are differences in the cause-and-effect relationships of both concepts. Uncertainty is generated by incomplete information, the randomness of the manifestation of external unstable connections, the result of the intersection of independent processes and events. Risk is directly related to decision-making. The concept of uncertainty is ambiguous, while risk has a quantitative dimension. In this case, risks should first be identified, and then a number of precautionary measures should be taken to reduce or eliminate them.

The war in Ukraine and restrictions on shipping in the Black Sea forced Egypt to purchase grain from Brazil. In September 2023, Turkey implemented additional technical safety protocols, which resulted in delays in adapting to the new regulations.

Climate change is among the factors that determine the impact of external conditions on the functioning of the international maritime shipping sector. Storms, hurricanes, fog, and ice are the causes of disruptions to shipping schedules due to low water levels in the Panama Canal, and sometimes even transport accidents due to tsunamis in countries such as Japan and South Korea.

There is no universally accepted definition of geopolitical conflicts due to the diversity of political, economic, and international legal aspects. The semantic content of the term geopolitical conflict is understood as a manifestation of interstate contradictions at a stage of significant escalation.

In their most obvious interpretation, geopolitical conflicts result from the interaction of parties to pursue their interests, using all available means within the relevant international relations. They exhibit characteristics of perceived necessity, increasing tension, and pressure without the use of external force. Based on these definitions, a general description and specific use of geopolitical conflict in maritime transport is presented in Table 1.

Table 1 Geopolitical conflicts in maritime transport

General features and characteristics	Features of manifestation in maritime transport
Rising tensions	Manifestation of interstate contradictions
Pressure without resorting to military action	Protective measures
Changing the rules of conduct for interacting parties	Timely response to changes in transportation conditions
Interstate discrepancy and inconsistency	Agreements and protocols
Fulfilling one's own interests at the expense of other countries	Adequacy of responses
Pirate attacks	Changing routes and transition plans

Geopolitical conflict in maritime transport exacerbates the destructive effects of international relations. The causes of conflict include:

- competition between states;
- conflicting national interests;
- territorial claims.

A diagram of the environmental impact on maritime transport performance, compiled based on the information presented, is presented in Figures 2 and 3.

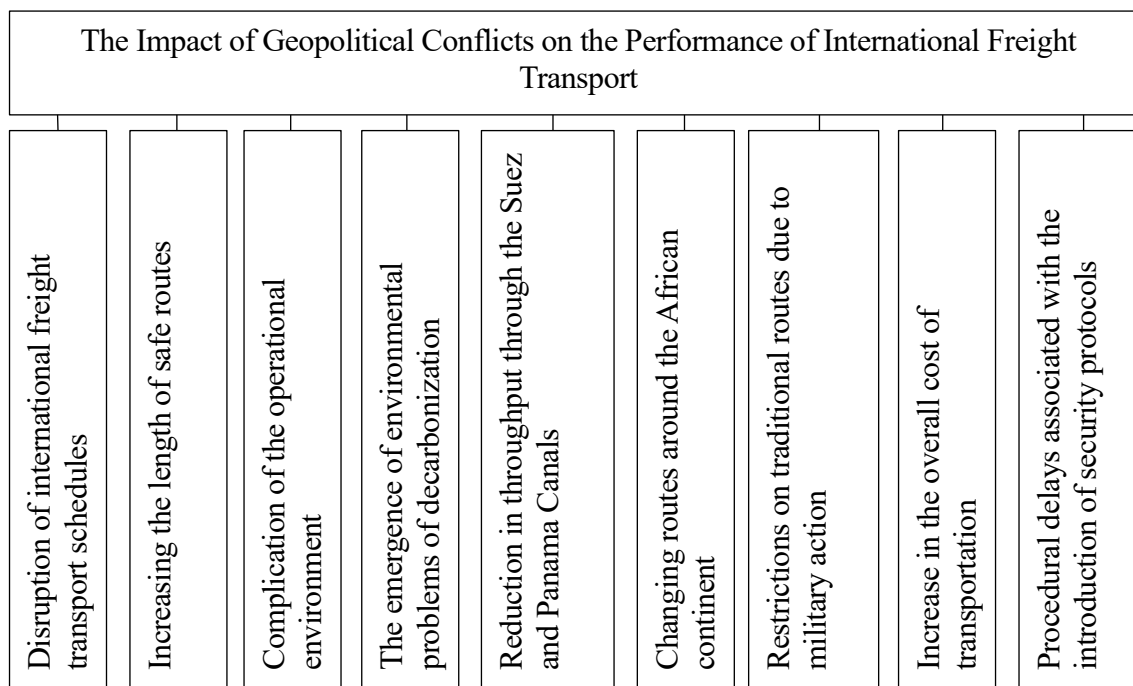


Fig. 2 – The impact of geopolitical conflicts on the performance of international freight transport

Global climate change is associated with long-term weather fluctuations caused by both natural conditions of increased solar activity, melting glaciers, shallowing of riverbeds and water areas, and anthropogenic human

activity associated with deforestation, drainage of wetlands, and an increase in the greenhouse effect from the combustion of fuel in international maritime transport. The consequences of this are global changes in sea level, extreme changes in weather conditions, hurricanes, tornadoes, and tsunamis. Climate change has led to an imbalance in natural systems: melting glaciers, rising sea levels, changing precipitation patterns, and an increase in the frequency of extreme events. Recommendations from analysts at the UN Conference on Trade and Development [2] propose joint action, because climate change affects every country, as a link is observed between climate change and the occurrence of natural disasters. It is noted that with rising sea levels, low-lying areas of the United States, Great Britain, Italy, Germany, and Denmark will be flooded. Urgent and ambitious action is needed to support the sustainability of climate change and risk reduction measures in the use of transport technologies.

Artificial intelligence and machine learning will be potentially transformative technologies in predicting changes in navigation and weather conditions. Various insights from advanced satellite technologies, Internet of Things innovations, and digitalization can be used not only to detect climate change but also to proactively address environmental impacts on the performance of international transport.

Climate change impacts integrated socio-ecological systems [11], disrupting their sustainable functioning and causing irreversible changes. Sea ice is declining, permafrost is melting faster, heat waves and heavy precipitation are increasing, and water resources are depleting. These impacts are changing lifestyles, management strategies, technological solutions, and implementation measures. It is necessary to develop, integrate, and adjust strategies for interaction between economic actors in the context of changing climate conditions and climate adaptation over time.

The combination of geopolitical tensions, the impacts of climate change, and armed conflicts has led to disruptions and interruptions in trade and supply chains.

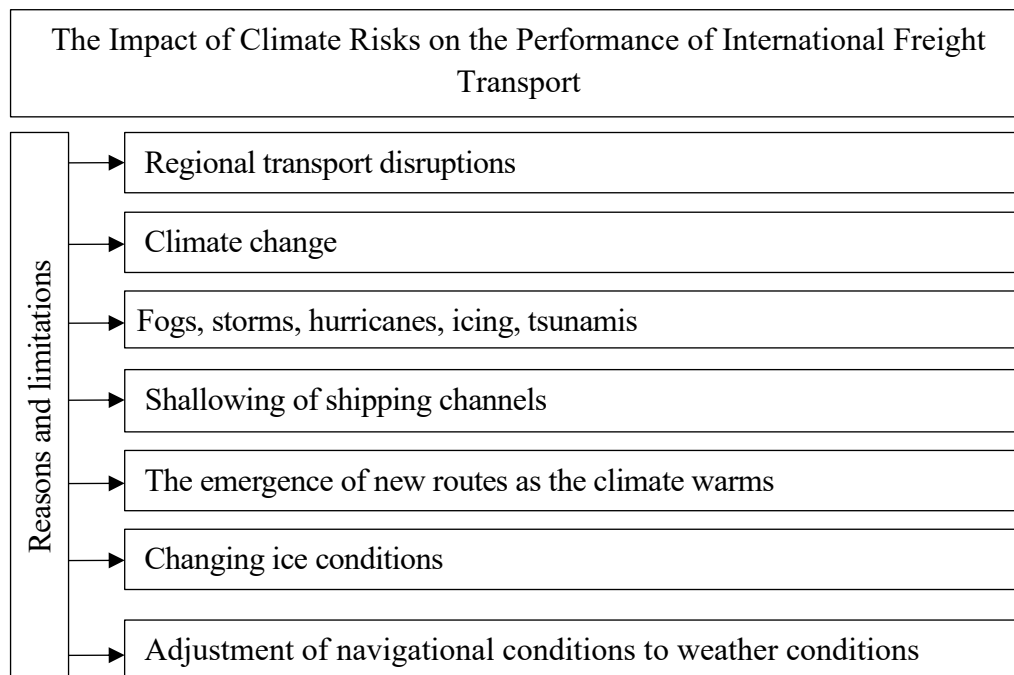


Fig. 3 – The impact of climate risks on the performance of international freight transport

The key trends in global maritime freight transport are:

- 2% growth in global seaborne trade, with significant cost changes;
- regional transport disruptions related to the refinement of the Suez and Panama Canals, port congestion, and increased operating costs;
- freight growth associated with increased distances and higher insurance premiums;
- rising consumer prices driven by rising freight rates.

According to UNCTAD forecasts [1], global seaborne trade will grow by an average of 2.4% in 2029.

The recommendations of the United Nations Conference on Trade and Development are aimed at coordinated action in the areas of navigation and adaptation, increased investment in low-carbon fuels, the use of modern technologies in forecasting, more precise route planning through the development of software and hardware for managing uncertain external influences, and the development of flexible logistics solutions.

To improve safety, reliability, and resilience, the maritime logistics sector must embrace new digital technologies. As maritime logistics overcomes the challenges, priority must be given to developing management tools to cope with the uncertain impact of external disturbances, helping to withstand disruptions and adapt to their sources. The external environment is becoming increasingly fluid and unpredictable, adding new challenges and tasks to maritime transport performance. It's important to maintain focus not on the final goal, but to apply a specific set of knowledge to achieve it and implement it in specific conditions.

Evidence and prospects for further exploration in this direction.

The novelty of this work lies in its systematization and classification of the impact of geopolitical conflicts and climate risks on the efficiency of maritime transport. It outlines the key trends in the modern development of maritime freight transport in the context of dynamic environmental changes, including a 2% growth in global seaborne trade with significant cost fluctuations, regional transport disruptions, and rising consumer prices caused by rising freight rates. Recommendations and prospects for the development of maritime transport in an uncertain environment are offered, including the use of modern information-intelligence technologies for managing low-carbon fuel development, coordinated route planning, and the development of new logistics solutions. This allows for the discovery of new directions for the further development of international transport.

List of Wikorista Gerels

1. Review of maritime for 2021 United Nation Organization Overview, https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2021_en_0.pdf, (2024)
2. Review of maritime for 2023 United Nation Organization Overview, <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023>, (2023)
3. Sharko O.V., Doroshenko O.S., Zhyshchynskiy Y. S.: Improving the efficiency of transport logistics in conditions of uncertainty and risk. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті». MINTT-2025. 28–30 травня 2025 року, Одеса, Україна, pp. 245-248 (2025). URL: <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2025/05/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8-%D0%9C%D0%86%D0%9D%D0%A2%D0%A2-2025-%D1%80..pdf>
4. Sharko O., Doroshenko O.: Increasing the efficiency of transport by optimising the management structure of complex logistics scheme. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2025. №1(24). PP. 89-101. DOI: 10.36910/automash.v1i24.1712
5. Mar-Ortiz, J., Gracia, M.D., Castillo-García, N. Challenges in the design of decision support systems for port and maritime supply chains (2018) *Studies in Computational Intelligence*, 764, pp.49-71.
6. Яворская А.Ф. Критериальные ограничения устойчивого развития локальных морских транспортных комплексов. Економіка та управління національним господарством 2018, вип.17, С.182-188
7. Ступникова Е.А., Резинкин Д.Е. Анализ неопределенности развития международных грузовых контейнерных перевозок. Вестник Евразийской науки 2023, Т.15, №6, С.29-32
8. Lind, M., Hägg, M., Siwe, U., Haraldson, S. Sea Traffic Management - Beneficial for all Maritime Stakeholders (2016) *Transportation Research Procedia*, 14, pp. 183-192.
9. Plaza-Hernández, M., Gil-González, A.B., Rodríguez-González, S., Prieto-Tejedor, J., Corchado-Rodríguez, J.M. Integration of IoT technologies in the maritime industry (2021) *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1242 AISC, pp. 107-115.
10. Zhao, Z., Wu, W., Zheng, Q., Yu, X., Yu, S. Three elements of liquefaction risk of liquefiable solid bulk cargoes during sea transport: Critical review (2023) *Marine Georesources and Geotechnology*, 41 (12), pp. 1465-1483.
11. Newlands, N.K. Big Data Governance, Technology, and Implementation in Climate-Resilient Societies(2022) *The Palgrave Handbook of Climate Resilient Societies: Volumes 1-2*, 2, pp. 1341-1360