

Н. С. УРУМ

кандидат педагогічних наук, доцент,
в.о. завідувача кафедри природничо-математичних
та інженерно-технічних дисциплін
Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного
транспорту Національного транспортного університету»
ORCID: 0000-0003-2493-9314

І. В. ТРОФИМЕНКО

кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем
на водному транспорті
Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного
транспорту Національного транспортного університету»
ORCID: 000-0002-0919-2948

З. Я. ДОРОФЄЄВА

старший викладач кафедри природничо-математичних
та інженерно-технічних дисциплін
Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного
транспорту Національного транспортного університету»
ORCID: 0000-0003-3354-578X

С. В. ЛІСОВСЬКИЙ

старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем
на водному транспорті
Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного
транспорту Національного транспортного університету»
ORCID: 0009-0003-6390-7910

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТУ СУДНА НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЦІЇ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ, ГІДРОДИНАМІЧНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ

У статті проведено комплексний аналіз сучасних методів оптимізації маршруту судна на основі інтеграції гідрометеорологічних, гідродинамічних та інформаційно-технологічних моделей. Актуальність дослідження зумовлена посиленням вимог Міжнародної морської організації щодо скорочення викидів парникових газів, зокрема впровадження показників EEXI (Energy Efficiency Existing Ship Index) та CII (Carbon Intensity Indicator), що набули чинності з 1 січня 2023 року відповідно до поправок до Додатку VI MARPOL. Оптимізація погодної маршрутизації розглядається як один із найефективніших операційних заходів для виконання Стратегії ІМО 2023 щодо досягнення нульових нетто-викидів парникових газів до 2050 року. Систематизовано п'ять основних класів алгоритмів оптимізації маршруту: ізохронний метод та його модифікації, динамічне програмування, графові алгоритми (Дейкстри, A*), еволюційні алгоритми (генетичні, NSGA-II, PSO) та методи машинного навчання. Для кожного класу наведено математичні формулювання цільових функцій та обмежень, проаналізовано обчислювальну складність, переваги та обмеження. Розглянуто моделі гідродинамічної взаємодії судна з морським середовищем, включаючи додатковий опір від хвилювання та вітру, моделі втрати швидкості та критерії морехідності. Проаналізовано архітектуру сучасних інформаційних систем weather routing та їх інтеграцію з ECDIS і глобальними метеорологічними моделями. Сформульовано рекомендації щодо вибору методів оптимізації для умов Чорноморського басейну з урахуванням його специфічних гідрометеорологічних та навігаційних особливостей.

Ключові слова: оптимізація маршруту судна, weather routing, ізохронний метод, динамічне програмування, еволюційні алгоритми, CII, EEXI, гідродинамічна модель, морехідність, Чорне море.



N. S. URUM

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Acting Head of the Department of Natural Sciences, Mathematics
and Engineering Disciplines
Separated Structural Unit “Danube Institute of Water Transport
of National Transport University”
ORCID: 0000-0003-2493-9314

I. V. TROFYMENKO

Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Navigation and Operation
of Technical Systems in Water Transport
Separated Structural Unit “Danube Institute of Water Transport
of National Transport University”
ORCID: 000-0002-0919-2948

Z. YA. DOROFIEIEVA

Senior Lecturer at the Department of Natural Sciences, Mathematics
and Engineering Disciplines
Separated Structural Unit “Danube Institute of Water Transport
of National Transport University”
ORCID: 0000-0003-3354-578X

S. V. LISOVSKIY

Senior Lecturer at the Department of Navigation and Operation
of Technical Systems in Water Transport
Separated Structural Unit “Danube Institute of Water Transport
of National Transport University”
ORCID: 0009-0003-6390-7910

ANALYSIS OF SHIP ROUTE OPTIMISATION METHODS BASED ON INTEGRATION OF HYDROMETEOROLOGICAL, HYDRODYNAMIC AND INFORMATION TECHNOLOGY MODELS

This article presents a comprehensive analysis of modern ship route optimisation methods based on the integration of hydrometeorological, hydrodynamic and information technology models. The relevance of the research is determined by the strengthening of the International Maritime Organisation regulatory requirements for greenhouse gas emission reduction, particularly the implementation of the Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) and Carbon Intensity Indicator (CII), which came into force on 1 January 2023 pursuant to amendments to MARPOL Annex VI. Weather routing optimisation is considered as one of the most effective operational measures for achieving the IMO 2023 Strategy goals of reaching net-zero greenhouse gas emissions by or around 2050. Five main classes of route optimisation algorithms are systematised: the isochrone method and its modifications (3DMI, Isochrone-A, IPO), dynamic programming (2D and 3D), graph algorithms (Dijkstra, A*, Bidirectional A*), evolutionary algorithms (genetic algorithms, NSGA-II, PSO) and machine learning methods (surrogate models, deep reinforcement learning). For each class, mathematical formulations of objective functions and constraints are provided, and computational complexity, advantages and limitations of application are analysed. Hydrodynamic models of ship-sea environment interaction are examined, including added resistance from waves and wind based on Kwon and ITTC methods, speed loss models and seakeeping criteria in accordance with IMO second generation intact stability requirements. The architecture of modern weather routing information systems is analysed, including integration with ECDIS via RTZ format and the use of global meteorological models GFS, ECMWF and ICON. Recommendations for the selection of optimisation methods for Black Sea basin conditions are formulated, taking into account its specific hydrometeorological and navigational characteristics.*

Key words: ship route optimisation, weather routing, isochrone method, dynamic programming, evolutionary algorithms, CII, EEXI, hydrodynamic model, seakeeping, Black Sea.

Постановка проблеми

Морський транспорт забезпечує перевезення понад 80 % світового вантажообігу та є основою глобальної торгівлі. Водночас міжнародне судноплавство відповідальне за приблизно 2,89 % глобальних викидів парникових газів, що еквівалентно близько 1076 млн тонн CO₂ на рік [1, с. 5]. У відповідь на кліматичні виклики Міжнародна морська організація (далі – ІМО) прийняла у 2023 році оновлену Стратегію щодо скорочення викидів парникових газів, яка передбачає досягнення нульових нетто-викидів до 2050 року з проміжними контрольними точками: скорочення загальних щорічних викидів парникових газів щонайменше на 20 %, з прагненням до 30 %, до 2030 року та щонайменше на 70 %, з прагненням до 80 %, до 2040 року порівняно з рівнем 2008 року [1].

З 1 січня 2023 року набули чинності обов'язкові вимоги щодо показника енергоефективності існуючих суден (Energy Efficiency Existing Ship Index, далі – EEXI) та щорічного показника вуглецевої інтенсивності (Carbon Intensity Indicator, далі – CII). Відповідно до цих вимог, кожне судно валовою місткістю понад 400 GT зобов'язане розрахувати свій показник EEXI, а судна понад 5000 GT – збирати операційні дані для щорічного звіту CII [2]. На основі показника CII судно отримує рейтинг від А (найкращий) до Е (найгірший), причому судно з рейтингом D протягом трьох послідовних років або Е протягом одного року зобов'язане подати коригувальний план дій у складі Плану управління енергоефективністю судна [2].

Серед операційних заходів зниження вуглецевої інтенсивності оптимізація маршруту судна (далі – weather routing) визнається одним із найбільш ефективних та економічно доцільних інструментів [3]. За результатами досліджень, вплив метеорологічно-морських чинників (вітер, хвилювання, течії) становить до 14 % загального споживання палива [4, с. 42], а застосування систем погодної маршрутизації забезпечує економію палива від 3 % до 12 % залежно від типу судна, маршруту та погодних умов [3]. Резолюція ІМО А.893(21) «Guidelines for Voyage Planning» визначає «weather routing» як систематичне застосування метеорологічних та океанографічних даних для планування оптимального маршруту [5, с. 2–4].

Задача оптимізації маршруту є багатокритеріальною, що вимагає одночасного врахування безпеки плавання, мінімізації часу рейсу, зниження витрат палива та дотримання екологічних нормативів. Математична складність цієї задачі зумовлена нелінійністю гідродинамічних моделей взаємодії судна з морським середовищем, стохастичністю метеорологічних прогнозів та необхідністю інтеграції різнорідних інформаційних джерел у режимі реального часу. Це визначає актуальність систематизації та порівняльного аналізу існуючих методів оптимізації з метою обґрунтування їх вибору для конкретних умов експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання оптимізації маршруту судна досліджуються від 1950-х років, коли Хенсон та Джеймс вперше запропонували метод ізохрон для визначення маршруту мінімального часу. Хагівара (Hagiwara) (1989) розвинув та формалізував модифікований ізохронний метод з плаваючою координатною сіткою, який став основою для подальших досліджень [6]. Систематичний огляд методів та алгоритмів weather routing, що охоплює підходи від алгоритму Дейкстри та динамічного програмування до ізохронних та ітеративних методів, представлено в роботі Вальтера та ін. (Walther) (2016), де показано, що задача weather routing може формулюватися як задача на обмеженому графі, задача нелінійної оптимізації з обмеженнями або як їх комбінація [7, с. 31–35].

Сучасні дослідження зосереджуються на багатоцільовій оптимізації. Лін та ін. (Lin) (2013) розробили тривимірний модифікований ізохронний метод (3DMI), що враховує комплексний динамічний вплив вітру, хвиль та течій на маршрут трансокеанського рейсу [8]. Чен та ін. (Chen) (2024) запропонували п'ять удосконалених стратегій ізохронного методу, серед яких метод Isochrone-A* продемонстрував найкращу здатність до багатоцільової оптимізації та практичного застосування в реальному часі [9, с. 2137–2140]. Кітаріолу та Темеліс (Kytariolou, Themelis) (2023) представили методологію оптимізації маршруту на основі прогнозованих погодних даних з урахуванням критеріїв безпеки [10].

Бенчмаркове дослідження Вей та ін. (Wei) (2025), проведене в Chalmers University of Technology, порівняло п'ять основних алгоритмів оптимізації – модифікований ізохронний, ізопонний, 2D та 3D динамічне програмування та алгоритм Дейкстри – та визначило їхні переваги й обмеження для різних сценаріїв плавання [11]. Манаріні та ін. (Mannarini) (2024) представили модель VISIR-2, реалізовану мовою Python, що базується на графовому методі та включає новий алгоритм пошуку маршрутів із мінімальними викидами CO₂ на основі модифікації алгоритму Дейкстри [12, с. 4356–4360].

Серед вітчизняних досліджень слід відзначити роботи Шевченко А.П. та співавторів [13] з питань підготовки моряків в умовах впровадження сучасних інформаційних технологій на морському транспорті, а також дослідження Трофименко А.О. та співавторів [14] щодо комплексного моделювання контролерів судових систем, які мають безпосереднє відношення до інформаційно-технологічних аспектів weather routing.

Незважаючи на значну кількість досліджень у галузі weather routing, залишаються недостатньо систематизованими: порівняльний аналіз обчислювальної складності різних класів алгоритмів з урахуванням вимог реального часу; інтеграція критеріїв CII та EEXI у цільові функції оптимізації; адаптація методів оптимізації до специфічних умов закритих та напівзакритих морських басейнів, зокрема Чорного моря; та комплексне порівняння гідродинамічних моделей втрати швидкості для різних типів суден.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є комплексний аналіз та систематизація сучасних методів оптимізації маршруту судна на основі інтеграції гідрометеорологічних, гідродинамічних та інформаційно-технологічних моделей. Для досягнення мети передбачено класифікацію основних алгоритмів оптимізації маршруту з наведенням їх математичних формулювань, аналіз гідродинамічних моделей взаємодії судна з морським середовищем, дослідження архітектури сучасних інформаційних систем weather routing, а також порівняльний аналіз алгоритмів за критеріями обчислювальної складності, точності та придатності для задач реального часу з формулюванням рекомендацій для умов Чорноморського басейну.

Викладення основного матеріалу дослідження

Задача оптимізації маршруту судна формалізується як задача оптимального керування з обмеженнями. Нехай маршрут описується послідовністю навігаційних точок $W = \{w_0, w_1, \dots, w_n\}$, де w_0 – точка відправлення, w_n – точка призначення. Для кожного сегменту маршруту визначається курс θ_i та швидкість V_i . Загальна цільова функція:

$$J = \int_{t_0}^{t_n} f(V(t), \theta(t), S(t)) dt \rightarrow \min \tag{1}$$

де $V(t)$ швидкість судна; $\theta(t)$ – курс; $S(t)$ – вектор стану морського середовища; f – функція витрат. Вектор стану морського середовища включає параметри вітру, хвилювання та течії:

$$S(t) = \{Vw(t), aw(t), Hs(t), Tp(t), as(t), Vc(t), ac(t)\} \tag{2}$$

де Vw, aw – швидкість та напрямок вітру; Hs, Tp, as – значна висота хвиль, пік-період та напрямок хвилювання; Vc, ac – швидкість та напрямок течії. Обмеження задачі включають вимоги безпеки та комерційні:

$$Hs(w_i, t_i) \leq Hs_{max}; T(W) \leq T_{ETA}; CII(W) \leq CII_{req} \tag{3}$$

де Hs_{max} – максимально допустима висота хвиль; T_{ETA} – граничний час прибуття; CII_{req} – вимога вуглецевої інтенсивності згідно з MARPOL Annex VI [2]. Витрата палива на сегменті маршруту визначається:

$$FC = \sum_i SFC \times P_{total,i} \times \Delta t_i \tag{4}$$

де SFC – питома витрата палива (г/кВт·год); $P_{total,i}$ – загальна потужність, що включає потужність руху на тихій воді та додаткову потужність для подолання опору від зовнішніх факторів. Показник вуглецевої інтенсивності CII для рейсу визначається відповідно до MARPOL Annex VI Regulation 28 як [2]:

$$CII = (FC \times C_f) / (D_{cap} \times D_{dist}) \tag{5}$$

де C_f – коефіцієнт перетворення палива в CO_2 (3,206 для HFO згідно з ІМО); D_{cap} – вантажомісткість судна (DWT); D_{dist} – пройдена відстань (морські милі). Зниження CII шляхом оптимізації маршруту досягається через зменшення FC при збереженні D_{dist} на прийнятному рівні.

Ізохронний метод є одним із найстаріших та найбільш інтуїтивно зрозумілих підходів до weather routing. Метод полягає у побудові ліній рівного часу (ізохрон) від точки відправлення. На кожному часовому кроці Δt від кожної точки поточної ізохрони генеруються можливі позиції судна для $(2m + 1)$ курсових кутів [6]:

$$\theta_j = \theta_{ref} \pm j \times \Delta\theta, j = 0, 1, \dots, m \tag{6}$$

де θ_{ref} – курс на точку призначення вздовж великого кола. Ефективна швидкість судна з урахуванням впливу середовища:

$$V_{eff} = V_{calm} - \Delta V_{wave} - \Delta V_{wind} + V_{current} \times \cos(ac - \theta) \tag{7}$$

де V_{calm} – швидкість на тихій воді; $\Delta V_{wave}, \Delta V_{wind}$ – втрата швидкості від хвиль та вітру. Обчислювальна складність класичного ізохронного методу становить $O(N \times m)$, де N – кількість часових кроків, m – кількість курсових варіантів. Перевагою є низька обчислювальна складність та інтуїтивна інтерпретація.

Основними недоліками класичного методу є: розширення області пошуку на кожному кроці; можливість появи різких поворотів поблизу точки призначення; складність реалізації багатоцільової оптимізації [9, с. 2139]. Модифікований 3D ізохронний метод (3DMI) усуває частину цих недоліків шляхом введення плаваючої координатної сітки та врахування тривимірної динаміки морського середовища, розглядаючи два типи стратегій: ETA-routing та FUEL-routing [8]. Чен та ін. (Chen) (2024) запропонували метод Isochrone-A*, який динамічно коригує область пошуку після середнього етапу рейсу та використовує розширену функцію вартості [9, с. 2141–2145].

Таблиця 1

Порівняльні характеристики модифікацій ізохронного методу

| Метод | Складність | Багато- цільовість | Реальний час | Особливості |
|----------------------|-------------------------------|--------------------|--------------|-----------------------------|
| Класичний (Hagiwara) | $O(N \times m)$ | Ні | Так | Простий, обмежена точність |
| 3DMI (Lin et al.) | $O(N \times m \times k)$ | Частково | Так | Динамічна сітка, 3D фактори |
| Isochrone-A* | $O(N \times m \times \log m)$ | Так | Так | Адаптивна область пошуку |
| IPO (predictive) | $O(N \times m \times p)$ | Так | Так | Предиктивна оптимізація |

Динамічне програмування є математично строгим підходом, що гарантує знаходження глобального оптимуму на дискретизованому просторі. Область плавання дискретизується на сітку вузлів (i, j) , де i – індекс етапу, j – індекс стану. Принцип оптимальності Беллмана:

$$J^*_n(x_n) = \min_u \{ L(x_n, u_n) + J^*_{n+1}(x_{n+1}) \} \tag{8}$$

де J_n^* – оптимальна вартість від етапу n до кінця; L – вартість переходу; u_n – керуючий вплив. Для 2D ДП рекурентне співвідношення:

$$C(i, j) = \min_k \{ C(i-1, k) + c(k, j, t) \} \tag{9}$$

де $c(k, j, t)$ включає витрату палива та штрафні функції за порушення обмежень безпеки [11]:

$$c(k, j, t) = FC(k, j, t) + \lambda_1 \times \max(0, H_s - H_{s,max}) + \lambda_2 \times \max(0, \varphi - \varphi_{max}) \tag{10}$$

де λ_1, λ_2 – вагові коефіцієнти штрафних функцій. Обчислювальна складність 2D ДП становить $O(N \times M^2)$, а 3D ДП – $O(N \times M^2 \times V)$, де V – кількість дискретних значень швидкості [11]. Основна перевага – гарантія глобального оптимуму на дискретній сітці. Основний недолік – «прокляття розмірності»: обчислювальні витрати зростають експоненціально при збільшенні кількості змінних стану.

Графові методи представляють акваторію як зв'язаний граф $G = (V, E)$, де V – множина вершин, E – множина ребер. Алгоритм Дейкстри знаходить найкоротший шлях з обчислювальною складністю $O((|V| + |E|) \times \log|V|)$ при використанні пріоритетної черги [7, с. 36]. Алгоритм A^* є евристичним розширенням:

$$f(n) = g(n) + h(n) \tag{11}$$

де $g(n)$ – відома вартість від старту; $h(n)$ – евристична оцінка вартості до цілі. Для маршрутизації: $h(n) = d_{GC}(n, goal) / V_{max}$, де d_{GC} – відстань великого кола. При допустимій евристиці алгоритм гарантує оптимальність [7, с. 38]. Модель VISIR-2 використовує модифікований алгоритм Дейкстри для маршрутів з мінімальними викидами CO_2 . Це open-source ПЗ мовою Python, що включає уніфіковану модель впливу хвиль, течій та вітру [12, с. 4358–4365].

Таблиця 2

Порівняння графових алгоритмів для weather routing

| Алгоритм | Складність | Переваги | Обмеження |
|-----------------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Дейкстри | $O((V+E)\log V)$ | Глобальний оптимум, простота | Тільки додатні ваги |
| A^* | $O(b^d)$ | Прискорення евристикою | Якість залежить від евристики |
| Bidirectional A^* | $O(b^{(d/2)})$ | Суттєве прискорення | Складність реалізації |
| VISIR-2 (Dijkstra+ CO_2) | $O((V+E)\log V)$ | Open-source, мінімізація CO_2 | Потребує НРС для великих сіток |

Еволюційні алгоритми є стохастичними методами глобальної оптимізації, що імітують природний відбір. У контексті weather routing кожний індивід представляє маршрут як послідовність навігаційних точок. Генетичний алгоритм оперує популяцією рішень $P = \{x_1, \dots, x_r\}$, де кожне рішення оцінюється функцією пристосованості:

$$F(x) = w_1 \times T(x) + w_2 \times FC(x) + w_3 \times R(x) \tag{12}$$

де $T(x)$ – час рейсу; $FC(x)$ – витрата палива; $R(x)$ – показник ризику; w_1, w_2, w_3 – нормовані вагові коефіцієнти. Оператор мутації зміщує навігаційні точки:

$$x'_j = x_j + N(0, \sigma^2) \times \delta_{max} \tag{13}$$

NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) є стандартним підходом для багатоцільової оптимізації маршруту [7, с. 40]. Типова постановка включає дві суперечливі цілі:

$$\min F(x) = \{f_1(x) = T(x), f_2(x) = FC(x)\} \tag{14}$$

Результатом NSGA-II є множина Парето-оптимальних маршрутів, з яких судноводій обирає компромісний варіант. Метод рою частинок (PSO) оновлює швидкість частинки за правилом:

$$v_i(t+1) = w \times v_i(t) + c_1 \times r_1 \times (p_{best,i} - x_i) + c_2 \times r_2 \times (g_{best} - x_i) \tag{15}$$

де w – коефіцієнт інерції; c_1, c_2 – когнітивний та соціальний параметри; r_1, r_2 – випадкові числа $[0, 1]$; $p_{best,i}$ – найкраще рішення i -ої частинки; g_{best} – глобально найкраще. Основна перевага еволюційних методів – здатність до багатоцільової оптимізації. Недоліки: стохастичність результатів та значний час обчислень [7, с. 42].

Методи машинного навчання (МН) застосовуються для побудови сурогатних моделей та прямої оптимізації маршруту. Для прогнозування додаткового опору від хвиль використовуються нейронні мережі:

$$\Delta R_{wave} = f_{NN}(H_s, T_p, \alpha_{wave}, V, \theta) \approx \Delta R_{CFD} \tag{16}$$

Навчання моделі мінімізацією функції втрат:

$$L = (1/N) \times \sum_i (\Delta R_{NN,i} - \Delta R_{CFD,i})^2 + \lambda ||\Theta||^2 \tag{17}$$

де λ – параметр регуляризації; Θ – ваги нейронної мережі. Deep Reinforcement Learning формулює задачу маршрутизації як марковський процес прийняття рішень із множиною станів S (позиція, погода), множиною дій A (курс, швидкість), функцією переходу P та функцією винагороди R . Перевагою сурогатних моделей є швидкість інференсу $O(N)$, що на кілька порядків швидше за повні гідродинамічні розрахунки. Обмеження включають необхідність великих обсягів навчальних даних та ризик позатренувального узагальнення [13].

Точність weather routing безпосередньо залежить від адекватності гідродинамічних моделей. Загальний опір судна на хвилюванні:

$$R_{total} = R_{calm} + \Delta R_{wave} + \Delta R_{wind} + \Delta R_{current} \tag{18}$$

Напівемпіричний метод Kwon (2008) для відносної втрати швидкості [4, с. 44]:

$$\Delta V / V = C\beta \times CU \times C_{form} \tag{19}$$

де $C\beta$ – коефіцієнт впливу кута набігу хвиль; CU – коефіцієнт впливу числа Бофорта; C_{form} – коефіцієнт форми корпусу. Метод ITTC (2014) для доданого опору від нерегулярного хвилювання:

$$\Delta R_{wave} = 2 \iint [R_{aw}(\omega, \beta) / \zeta a^2] \times S(\omega, \beta) d\beta d\omega \tag{20}$$

де R_{aw} – передаточна функція доданого опору; ζa – амплітуда хвилі; $S(\omega, \beta)$ – двовимірний спектр хвилювання. Критерії морехідності визначають обмеження на безпечні режими:

$$\varphi_{roll} \leq \varphi_{max} ; acc_{vert} \leq acc_{max} ; \Delta V / V \leq (\Delta V / V)_{max} \tag{21}$$

ІМО випустила Тимчасові керівництва MSC.1/Circ.1627 щодо критеріїв остійності другого покоління (Second Generation Intact Stability Criteria), які визначають критерії оцінки п'яти динамічних режимів втрати остійності, включаючи параметричну качку та надмірні прискорення [15]. Ці критерії є важливими обмеженнями при оптимізації маршруту, оскільки визначають зони акваторії, де плавання є небезпечним для конкретного судна.

Таблиця 3

Зведене порівняння класів алгоритмів оптимізації маршруту

| Клас алгоритму | Складність | Оптимальність | Реальний час | Багато-цільовість | Застосування |
|-------------------|--------------------------|---------------|--------------|-------------------|---------------------|
| Ізохронний | $O(N \times m)$ | Локальна | Так | Обмежена | Короткі рейси |
| Динам. прогр. | $O(N \times M^2)$ | Глобальна* | Умовно | Обмежена | Середні рейси |
| Графові (A^*) | $O((V+E)\log V)$ | Глобальна* | Так | Обмежена | Універсальні |
| Еволюційні | $O(P \times G \times N)$ | Стохастична | Ні | Так | Берегове планування |
| Машинне навч. | $O(N)$ інфер. | Залежить | Так | Так | Сурогатні мод. |

Примітка: * – глобальна оптимальність на дискретизованому просторі; P – розмір популяції; G – кількість поколінь.

Сучасні системи weather routing являють собою складні програмно-апаратні комплекси, що інтегрують метеорологічні дані, моделі судна та алгоритми оптимізації. Основними джерелами метеорологічних даних є глобальні числові моделі прогнозу погоди: GFS (Global Forecast System, NOAA), ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) та ICON (DWD). Ці моделі надають прогнози параметрів вітру, хвилювання та течій з роздільною здатністю від $0,125^\circ$ до $0,5^\circ$ та горизонтом прогнозу до 10–15 діб [3].

Інтеграція weather routing з ECDIS (Electronic Chart Display and Information System) є критичним фактором ефективного впровадження. Оптимізовані маршрути передаються у форматі RTZ відповідно до стандартів IEC 61174. Комерційні системи (NAPA MyRA, StormGeo S-Suite, DTN) забезпечують розрахунок оптимального маршруту з урахуванням моделі продуктивності конкретного судна, включаючи характеристики корпусу, пропульсивної установки та вантажного стану [3]. Типи оптимізації включають: shortest distance, time optimization та fuel optimization. Мультиоб'єктивна оптимізація будує фронт Парето для суперечливих цілей.

Таблиця 4

Основні комерційні системи weather routing

| Система | Розробник | Алгоритм | Інтеграція |
|---------|---------------------|--|--------------------------|
| MyRA | NAPA (Фінляндія) | Модель продуктивності судна | ECDIS (RTZ), SEEMP |
| S-Suite | StormGeo (Норвегія) | Seakeeping + оптимізація | ECDIS, Fleet Performance |
| SPOS | MeteoGroup | Метеомодель + маршрутизація | Navmaster ECDIS |
| VISIR-2 | CMCC (Італія) | Графовий (Дейкстри + CO ₂) | Open-source (Python) |

Чорне море характеризується специфічними гідрометеорологічними та навігаційними особливостями: обмежена площа акваторії (приблизно 436 тис. км²) з максимальною відстанню між портами до 600–700 морських

міль; значна мінливість погодних умов, особливо в зимовий період; наявність складних протокових зон (Босфор, Керченська протока); обмежена кількість навігаційних маршрутів; та специфічний хвильовий режим із переважанням коротких вітрових хвиль [16, с. 126].

Для коротких рейсів у межах Чорного моря (до 2–3 діб) найбільш доцільним є використання модифікованих ізохронних методів або A^* з графовим представленням акваторії. Для рейсів через протоки необхідно враховувати додаткові обмеження: обов’язкове лоцманське проведення, обмеження швидкості та вимоги щодо мінімальної видимості [16, с. 130]. Цільова функція для Чорного моря:

$$J = w_{FC} \times FC + w_T \times T + w_R \times R + w_{ECA} \times C_{_ECA} + w_{CII} \times \Delta CII \quad (22)$$

де $C_{_ECA}$ – штрафна функція за порушення вимог зон контролю викидів; ΔCII – відхилення фактичного СІІ від цільового.

Таблиця 5

Рекомендації щодо вибору алгоритмів для Чорноморського басейну

| Тип рейсу | Рекомендований метод | Обґрунтування | Очікувана економія |
|---------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Короткий каботажний (до 200 nm) | Модифікований ізохронний | Простота, швидкість | 2–4 % |
| Середній (200–600 nm) | A^* з евристикою | Баланс точності та швидкості | 4–7 % |
| Прохід проток | ДП з обмеженнями | Облік нормативних обмежень | 1–3 % |
| Берегове планування флоту | NSGA-II | Багатоцільова оптимізація СІІ | 5–10 % |

Актуальним завданням є також врахування загроз для GNSS у Чорноморському регіоні. Зростання кількості інцидентів глушіння та спуфінгу супутникових сигналів вимагає інтеграції резервних методів навігації в алгоритми weather routing [13].

Аналіз сучасного стану досліджень визначає такі тенденції: інтеграція показників СІІ та EEXI безпосередньо в цільові функції оптимізації [2]; розвиток гібридних підходів, що поєднують швидкість детерміністичних алгоритмів (A^* , ДП) із гнучкістю еволюційних методів; застосування сурогатних моделей на основі машинного навчання; розробка стандартизованих бенчмарків для об’єктивного порівняння алгоритмів [11]. Особливо перспективним є розвиток автономних систем навігації, де weather routing стає невід’ємною частиною системи прийняття рішень автономного судна, з вимогами реального часу та інтеграції з іншими системами судна [14].

Висновки

Проведений комплексний аналіз методів оптимізації маршруту судна на основі інтеграції гідрометеорологічних, гідродинамічних та інформаційно-технологічних моделей дозволяє сформулювати такі висновки.

1. Систематизовано п’ять основних класів алгоритмів weather routing: ізохронний метод ($O(N \times m)$), динамічне програмування ($O(N \times M^2)$), графові алгоритми ($O((V+E) \log V)$), еволюційні алгоритми ($O(P \times G \times N)$) та методи машинного навчання ($O(N)$ для інференсу). Кожен клас має специфічні переваги: ізохронний – простота та швидкість; ДП – гарантія глобального оптимуму; графові – баланс точності та ефективності; еволюційні – здатність до багатоцільової оптимізації; МН – швидкість прогнозування.

2. Встановлено, що точність weather routing критично залежить від адекватності гідродинамічних моделей взаємодії судна з морським середовищем. Напівемпіричний метод Kwon забезпечує прийнятну точність оцінки втрати швидкості для попереднього планування, тоді як спектральний метод ІТТС необхідний для точних розрахунків доданого опору. Інтеграція критеріїв остійності другого покоління ІМО у системи weather routing є актуальним завданням підвищення безпеки плавання.

3. Аналіз архітектури сучасних інформаційних систем weather routing показав тенденцію до інтеграції з ECDIS через стандартизовані формати (RTZ), використання глобальних метеорологічних моделей (GFS, ECMWF) та включення показників СІІ/EEXI у процес оптимізації відповідно до вимог MARPOL Annex VI.

4. Для умов Чорноморського басейну рекомендовано: для коротких рейсів – модифіковані ізохронні методи або A^* ; для середніх рейсів – графові алгоритми з евристикою; для берегового планування флоту – NSGA-II з цільовою функцією, що включає СІІ. Очікувана економія палива при застосуванні weather routing у Чорному морі становить від 2 % до 10 % залежно від типу рейсу та погодних умов.

Перспективами подальших досліджень є розробка гібридних алгоритмів, що поєднують детерміністичні та стохастичні підходи; створення відкритих бенчмарків для Чорноморського басейну; інтеграція weather routing з системами автономної навігації; та впровадження результатів досліджень у освітній процес морських закладів вищої освіти.

Список використаної літератури

1. IMO 2023 Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. Resolution MEPC.377(80). London : International Maritime Organization, 2023. 19 p.

2. Frequently Asked Questions on EEXI and CII. *IMO Hot Topics*. URL: <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/eexi-cii-faq.aspx> (дата звернення: 15.01.2026).
3. Sofar Ocean. *A Guide to Voyage Planning and Weather Routing*. San Francisco : Sofar Ocean Technologies, 2024. URL: <https://www.sofarocan.com/posts/a-guide-to-voyage-planning-and-weather-routing> (дата звернення: 10.01.2026).
4. Veneti I. K., Konstantopoulos C., Pantziou G. Minimizing the fuel consumption and the risk in maritime transportation: A bi-objective weather routing approach. *International Journal of Geographical Information Science*. 2017. Vol. 31, No. 1. P. 34–60. <https://doi.org/10.1080/13658816.2016.1189474>.
5. Guidelines for Voyage Planning. IMO Resolution A.893(21). London : International Maritime Organization, 1999. 12 p.
6. Hagiwara H. *Weather routing of (sail-assisted) motor vessels : doctoral thesis*. Delft : Delft University of Technology, 1989. 240 p.
7. Walther L., Rizvanolli A., Wendebourg M., Jahn C. Modeling and optimization algorithms in ship weather routing. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*. 2016. Vol. 4. P. 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.004>.
8. Lin Y.-H., Fang M.-C., Yeung R. W. The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements (II): Optimized routings. *Applied Ocean Research*. 2013. Vol. 43. P. 184–194. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.07.010>.
9. Chen Y., Zhang C., Mao W. et al. Strategies to improve the isochrone algorithm for ship voyage optimisation. *Ships and Offshore Structures*. 2024. Vol. 19, No. 12. P. 2137–2149. <https://doi.org/10.1080/17445302.2024.2329011>.
10. Kytariolou A., Themelis N. Ship routing optimisation based on forecasted weather data and considering safety criteria. *The Journal of Navigation*. 2023. Vol. 76, No. 1. P. 104–123. <https://doi.org/10.1017/S0373463322000558>.
11. Wei S., Mao W., Chen Y. et al. Benchmark study of five optimization algorithms for weather routing. Chalmers University of Technology Research Publication, 2025. URL: <https://research.chalmers.se/en/publication/516144> (дата звернення: 12.01.2026).
12. Mannarini G., Salinas M. L., Carelli L. et al. VISIR-2: ship weather routing in Python. *Geoscientific Model Development*. 2024. Vol. 17. P. 4355–4382. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-4355-2024>.
13. Шевченко А. П., Якусевич Ю. Г., Дорофеева З. Я., Тришин В. В. Деякі проблеми підготовки моряків на тлі впровадження сучасних інформаційних технологій на морському транспорті. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75), № 1. С. 382–388.
14. Трофименко А. О., Якусевич Ю. Г., Федунів В. М., Тришин В. В. Комплексна модель контролера обмеження навантаження на рухову установку на основі коливань на електричну мережу судна. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35 (74), № 3. С. 208–213.
15. IMO Interim Guidelines on Second Generation Intact Stability Criteria. MSC.1/Circ.1627. London : International Maritime Organization, 2020. 72 p.
16. Bowditch N. *The American Practical Navigator*. Publication No. 9. Bethesda : National Geospatial-Intelligence Agency, 2019. Vol. I–II. 896 p.
17. MSC.1/Circ.1228 – Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions. London : International Maritime Organization, 2007. 8 p.
18. SOLAS Chapter V, Regulation 34 – Safe Navigation and Avoidance of Dangerous Situations. London : International Maritime Organization, 2004. 6 p.
19. Zis T. P. V., Psarftis H. N., Ding L. Ship weather routing: A taxonomy and survey. *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 213. Article 107697. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107697>.
20. MARPOL Annex VI – Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships. London : International Maritime Organization, 2022. 58 p.
21. Chen Y., Zhang C., Guo Y. et al. State-of-the-art optimization algorithms in weather routing – ship decision support systems: challenge, taxonomy, and review. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 331. Article 121198. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121198>.

References

1. IMO (2023). *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. Resolution MEPC.377(80)*. London: International Maritime Organization.
2. IMO (2022). Frequently Asked Questions on EEXI and CII. Retrieved from <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/eexi-cii-faq.aspx>
3. Sofar Ocean (2024). *A Guide to Voyage Planning and Weather Routing*. San Francisco: Sofar Ocean Technologies. Retrieved from <https://www.sofarocan.com/posts/a-guide-to-voyage-planning-and-weather-routing>

4. Veneti, I. K., Konstantopoulos, C., Pantziou, G. (2017). Minimizing the fuel consumption and the risk in maritime transportation: A bi-objective weather routing approach. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(1), 34–60. <https://doi.org/10.1080/13658816.2016.1189474>
5. IMO (1999). *Guidelines for Voyage Planning, Resolution A.893(21)*. London: International Maritime Organization.
6. Hagiwara, H. (1989). *Weather routing of (sail-assisted) motor vessels* (Doctoral thesis). Delft University of Technology.
7. Walther, L., Rizvanolli, A., Wendebourg, M., Jahn, C. (2016). Modeling and optimization algorithms in ship weather routing. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, 4, 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.004>
8. Lin, Y.-H., Fang, M.-C., Yeung, R. W. (2013). The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements (II). *Applied Ocean Research*, 43, 184–194. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.07.010>
9. Chen, Y., Zhang, C., Mao, W. et al. (2024). Strategies to improve the isochrone algorithm for ship voyage optimisation. *Ships and Offshore Structures*, 19(12), 2137–2149. <https://doi.org/10.1080/17445302.2024.2329011>
10. Kytariolou, A., & Themelis, N. (2023). Ship routing optimisation based on forecasted weather data and considering safety criteria. *The Journal of Navigation*, 76(1), 104–123. <https://doi.org/10.1017/S0373463322000558>
11. Wei, S., Mao, W., Chen, Y. et al. (2025). Benchmark study of five optimization algorithms for weather routing. *Chalmers University of Technology Research Publication*. Retrieved from <https://research.chalmers.se/en/publication/516144>
12. Mannarini, G., Salinas, M. L., Carelli, L. et al. (2024). VISIR-2: ship weather routing in Python. *Geoscientific Model Development*, 17, 4355–4382. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-4355-2024>
13. Shevchenko, A. P., Yakusevych, Yu. H., Dorofieieva, Z. Ya., Tryshyn, V. V. (2025). Deiaki problemy pidhotovky moriakiv na tli vprovadzhennia suchasnykh informatsiinykh tekhnolohii na morskomu transporti [Some problems of seafarers training in the context of modern IT in maritime transport]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky*, 36(75), 1, 382–388.
14. Trofymenko, A. O., Yakusevych, Yu. H., Fedunov, V. M., Tryshyn, V. V. (2024). Kompleksna model kontrolera obmezhenia navantazhennia na rukhovu ustanovku na osnovi kolyvan na elektrychnu mrezhu sudna [Comprehensive model of load limitation controller]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky*, 35(74), 3, 208–213.
15. IMO (2020). *Interim Guidelines on Second Generation Intact Stability Criteria. MSC.1/Circ.1627*. London: International Maritime Organization.
16. Bowditch, N. (2019). *The American Practical Navigator*. Publication No. 9. Bethesda: National Geospatial-Intelligence Agency.
17. IMO (2007). *Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions. MSC.1/Circ.1228*. London: International Maritime Organization.
18. IMO (2004). *SOLAS Chapter V, Regulation 34 – Safe Navigation and Avoidance of Dangerous Situations*. London: International Maritime Organization.
19. Zis, T. P. V., Psaraftis, H. N., Ding, L. (2020). Ship weather routing: A taxonomy and survey. *Ocean Engineering*, 213, 107697. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107697>
20. IMO (2022). *MARPOL Annex VI – Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships*. London: International Maritime Organization.
21. Chen, Y., Zhang, C., Guo, Y. et al. (2025). State-of-the-art optimization algorithms in weather routing – ship decision support systems: challenge, taxonomy, and review. *Ocean Engineering*, 331, 121198. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121198>

Дата першого надходження статті до видання: 11.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 07.05.2026