


УДК 656.61.052

DOI: 10.31653/2306-5761.39.2026.114-126

FORMING NAVIGATION HAZARD CONTOURS MODEL ON ELECTRONIC CHARTS TAKING INTO ACCOUNT THE QUALITY OF HYDROGRAPHIC DATA

МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ КОНТУРІВ НАВІГАЦІЙНОЇ НЕБЕЗПЕКИ НА ЕЛЕКТРОННИХ КАРТАХ З УРАХУВАННЯМ ЯКОСТІ ГІДРОГРАФІЧНИХ ДАНИХ

A. Petrovskiy , Ph.D., associate professor

А.В. Петровський, к.т.н., доцент

Kherson State Maritime Academy, Ukraine

Херсонська Державна Морська Академія, Україна

ABSTRACT

This paper presents a formalized mathematical framework for constructing Limiting Danger Lines (LDLs) on Electronic Navigational Charts (ENCs), incorporating hydrographic data uncertainty represented by CATZOC quality categories. The study addresses the lack of automated LDL generation in modern ECDIS systems, particularly for linear and polygonal bathymetric features, as well as the insufficient integration of data quality indicators into existing navigational safety models. A review of current ship-routing methods demonstrates that most approaches rely on discrete or approximate spatial representations, which limits the accuracy of the geometric interpretation of navigational hazards. In contrast, the proposed framework introduces a novel interpretation of CATZOC as a parameter of geometric uncertainty, transforming it from a descriptive attribute into an operational component of spatial modeling. The model is based on computational geometry techniques, including Minkowski sums and buffer operations, ensuring consistent spatial expansion of ENC objects such as soundings, isobaths, and depth areas. This enables the formation of a continuous hazard field rather than discrete safety contours. Additionally, the framework incorporates route dependence through cross-track distance (XTD), allowing hazard boundaries to be dynamically adjusted based on the planned vessel trajectory. The proposed approach unifies point, line, and polygonal ENC features within a single geometric structure, eliminating inconsistencies in hazard representation. It also enables a transition from threshold-based safety checks to continuous spatial analysis of navigational risk. The model is particularly effective in areas with low-confidence hydrographic data, especially CATZOC C, D, and in restricted waters where precise hazard delineation is critical. The results demonstrate that the LDL-based ENC safety framework provides a consistent and mathematically rigorous approach to modeling navigational uncertainty, offering significant potential for enhancing ECDIS functionality and improving maritime safety.

Keywords: ECDIS, safety navigation, CATZOC, LDL, Safety Depth, Safety Contour, XTD, Minkowsky sum, route check, spatial uncertainty, geometric buffering.



Copyright© 2026 the Author(s).

This is an open access article under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.

Published by the National University "Odesa Maritime Academy".

Date received: 10-04-2026

Date accepted: 21-05-2026

Date published (online): 31-05-2026

Cite this article as: A. Petrovskiy, "Forming navigation hazard contours model on electronic charts taking into account the quality of hydrographic data," *Shipping & Navigation*, no. 39, pp. 114–126, 2026, doi: 10.31653/2306-5761.39.2026.114-126.

АНОТАЦІЯ

У статті запропоновано формалізовану математичну модель побудови ліній окреслення навігаційної небезпеки (Limiting Danger Lines, LDL) на електронних навігаційних картах (Electronic Navigational Charts, ENC) з урахуванням невизначеності гідрографічних даних, представленої категоріями якості CATZOC (Category of Zone of Confidence in Data). Актуальність дослідження зумовлена відсутністю формалізованого підходу до автоматизованої побудови LDL для точкових, лінійних і полігональних батиметричних об'єктів, а також недостатньою інтеграцією показників якості даних у сучасні моделі навігаційної безпеки та перевірки маршруту. У роботі виконано аналіз сучасних підходів до планування маршрутів суден, який показав, що більшість із них базується на дискретних або апроксимованих моделях простору та не забезпечує достатньо точної геометричної інтерпретації навігаційних небезпек. Запропоновано підхід, у межах якого CATZOC інтерпретується як параметр геометричної невизначеності, що дає змогу трансформувати його з описового показника в операційний елемент математичної моделі. При цьому вертикальна складова невизначеності використовується для оцінювання ефективної глибини, безпечної глибини (Safety Depth) та запасу води під кілем судна (Under Keel Clearance, UKC), а горизонтальна — для формування геометричного буфера навколо потенційно небезпечних об'єктів. Модель базується на методах обчислювальної геометрії, зокрема на використанні суми Мінковського та операції буферизації, що дає змогу формувати безперервну область навігаційної небезпеки для різних типів об'єктів ENC: точкових об'єктів, зокрема глибин, перешийків, затонулих об'єктів та ізольованих небезпек; лінійних об'єктів, зокрема ізобат; а також полігональних об'єктів, зокрема ділянок глибин. Наукова новизна дослідження полягає в поєднанні в межах єдиної математичної моделі геометричної невизначеності CATZOC, глибинної небезпеки, векторної геометрії ENC, операції буферизації та залежності від маршруту судна через параметр поперечного відхилення від маршруту (Cross Track Distance, XTD) для формування LDL як межі релевантної області небезпеки. Отримані результати можуть бути використані як математична основа для подальшої автоматизації побудови LDL, перевірки маршруту (route check) та формування додаткових навігаційних шарів в ECDIS, особливо в умовах обмеженого навігаційного простору та низької якості гідрографічних даних.

Ключові слова: ECDIS, безпека судноплавства, CATZOC, LDL, Safety Depth, Safety Contour, XTD, сума Мінковського, route check, просторова невизначеність, геометрична буферизація.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями

При здійсненні попередньої прокладки судноводій виконує оцінювання безпеки маршруту з урахуванням як глибин, так і якості гідрографічних даних електронних навігаційних карт (ENC). Для позначення меж безпечної води у практиці ECDIS застосовується Limiting Danger Line (LDL) – лінія окреслення навігаційної небезпеки, що наноситься штурманом у User Map ECDIS для врахування потенційно небезпечних районів з урахуванням параметру Safety Depth, запасу води під кілем (UKC), якості гідрографічних даних, припливів, навігаційних небезпек та інших факторів.

При попередній прокладці як точкові об'єкти (Obstruction – шар OBSTRN; Rock – шар UWTRC; Wreck – шар WRECKS; Sounding –

шар SOUNDG; Isolated Danger Symbol (IDS)), так і батиметричні лінійні (ізобати) та полігональні об'єкти (depth areas) можуть знаходитися в зонах Category Zone of Confidence (CATZOC) різного рівня достовірності. Категорія CATZOC/QOBD (Quality of Bathymetric Data) повинна розглядатися не лише як характеристика похибки, а як комплексний показник якості гідрографічних даних, що включає повноту зйомки, точність місцеположення, точність визначення глибин, характер морського дна та інші характеристики якості даних ENC. При цьому необхідно розрізняти дві складові невизначеності CATZOC:

– вертикальна невизначеність, яка використовується для оцінювання можливого відхилення глибини, перерахунку Safety Depth та контролю UKC;

– горизонтальна невизначеність, яка використовується для побудови геометричного буфера навколо потенційно небезпечного об'єкта та врахування можливого зміщення його фактичного положення.

Стандарти International Hydrographic Office (ІНО) передбачають використання похибок лише до точкових об'єктів. Разом із тим, у документах ІНО [1,2] зазначається, що дані, отримані певними методами спостереження (наприклад, супутниковими), можуть отримувати нижчі категорії достовірності:

«As a general guideline, the following choices are made by the Hydrographic Office:

– Data from ports are generally assigned ZOC A1, A2 or B.

– Satellite data are assigned ZOC C.

– Laser data by plane are assigned ZOC B, sometimes A2.

– Private ship-owner data are assigned ZOC D.

– Data before 1980 are assigned ZOC B, C or D. In general, the older the data, the lower the value. » [1, p.15]

У межах дослідження припускається, що аналогічний підхід може бути застосований також до батиметричних лінійних об'єктів ENC (ізобат, depth contours, depth areas), якщо вони знаходяться у районах зі зниженою якістю гідрографічних даних. Таке положення розглядається як авторське припущення математичної моделі, а не як пряма нормативна вимога стандартів ІНО.

Якщо збільшувати карту ENC до відповідного масштабу, можна побачити, що кожна крива ізобата є лише не закритим/закритим полігоном, тобто це окремі точки, з'єднані між собою 2D-сплайнами. Відкриваючи карту стороннім програмним забезпеченням (наприклад, через QGIS), можна впевнитись, що відповідний шар ізобат має атрибутивний опис та координатне представлення, що дозволяє застосовувати до них методи геометричного аналізу, буферизації та операції суми Мінковського.

На нанесення LDL через User Map витрачається багато часу, особливо в умовах обмеженого навігаційного простору та змінної якості гідрографічних даних. У сучасних ECDIS використовуються функції перевірки маршруту на навігаційні небезпеки, однак відсутній формалізований підхід до автоматизованої побудови LDL відносно об'єктів, до яких застосовуються поправки CATZOC в залежності від маршруту судна. Для розширення відповідного функціоналу ECDIS і подальшої автоматизації нанесення LDL необхідна математична модель, яка поєднуватиме точкові небезпеки, лінійні батиметричні об'єкти та полігональні відповідні області ENC з урахуванням як вертикальної, так і горизонтальної невизначеності CATZOC.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частини загальної проблеми

Сучасні дослідження мають вже деякі результати у вказаному напрямку. У роботі [3] представлено узагальнюючий огляд методів прокладки маршруту суден з урахуванням погодних умов, де запропоновано класифікацію існуючих підходів. Автори виділяють детерміновані, стохастичні та гібридні методи, підкреслюючи, що більшість з них орієнтовані на оптимізацію часу та витрат, але не забезпечують детального геометричного опису навігаційних небезпек. У дослідженні [4] запропоновано реалізацію алгоритму A* для задачі weather routing, що дозволяє ефективно знаходити маршрут з урахуванням зовнішніх умов, однак просторове представлення залишається дискретним. Робота [5] розширює підхід шляхом використання probabilistic roadmaps, що дозволяє враховувати невизначеність середовища та будувати більш гнучкі маршрути. Водночас цей метод також базується на апроксимації простору. У [6] розглядається підхід до маршрутизації з урахуванням невизначеності, де застосовуються методи м'яких обчислень, що

підвищує адаптивність, але не вирішує проблему точної геометричної інтерпретації. Запропоновано метод планування маршруту з обмеженням часу переходу, де оптимізація здійснюється за кількома критеріями у [7]. Аналогічно, у [8] розроблено багатокритеріальний алгоритм, що враховує енергетичні та погодні фактори, однак обидва підходи використовують спрощене представлення простору. У [9] запропоновано вдосконалений фреймворк weather routing, який поєднує різні джерела даних, проте залишається орієнтованим на макрорівень планування. Робота [10] демонструє використання AIS-даних для побудови маршрутів, що дозволяє враховувати реальну поведінку суден. Подібний підхід розглянуто і в [11], де історичні траєкторії використовуються для оптимізації маршруту. Недоліком таких методів є залежність від якості даних та відсутність формалізованої моделі безпеки. Автори [12] провели аналіз підходів до візуалізації та оцінки безпеки, які враховують рівні достовірності даних ENC, та продемонстрували експлуатаційні обмеження фіксованих запасів безпеки в районах з низькою достовірністю гідрографічних досліджень. Однак запропоновані підходи в першу чергу зосереджені на візуалізації безпеки маршрутів та операційній оцінці, а не на формальному геометричному моделюванні меж навігаційної небезпеки. Дослідження не надає математичної основи для побудови LDL для гетерогенних об'єктів ENC, таких як точкові, ізобати та області глибини. У роботі [13] запропоновано використання клітинних автоматів для моделювання руху судна, що дозволяє враховувати локальні взаємодії, але знову ж таки базується на дискретному просторі. Дослідження [14] розглядають задачу прокладки маршруту в Арктиці з урахуванням льодових умов, що демонструє можливість адаптації алгоритмів до специфічних середовищ, однак модель залишається прикладною та не універсальною. Сучасні інтелектуальні підходи представлені у роботах [15-17], де використовуються методи

підкріплювального та глибокого машинного навчання. Вони дозволяють автоматично формувати стратегії руху, проте мають обмежену інтерпретованість і не забезпечують явної геометричної моделі безпеки. У [18] запропоновано використання ройових алгоритмів (PSO) для багатокритеріальної оптимізації маршруту, що підвищує якість рішень, але не вирішує проблему точного представлення навігаційного середовища. Нарешті, у роботах [19] та [20] досліджуються методи оцінки ризику зіткнень і побудови маршрутів на основі ізохрон та домену судна, що дозволяє більш точно враховувати взаємодію суден, однак не інтегрує батиметричні обмеження та невизначеність гідрографічних даних.

Разом із тим, для задач формування LDL, перевірки маршруту та оцінювання навігаційної безпеки суттєве значення мають також дослідження, пов'язані з Safety Depth, Safety Contour, якістю даних ENC, керуванням запасом води під кілем, просторовою невизначеністю та геометричною буферизацією. Такі підходи створюють методичну основу для переходу від дискретної перевірки окремих навігаційних об'єктів до безперервного просторового аналізу навігаційної небезпеки.

Таким чином, аналіз джерел [3–20] показує, що існуючі підходи до планування маршруту судна охоплюють широкий спектр методів - від класичних алгоритмів пошуку шляху до сучасних інтелектуальних систем. Незважаючи на це, більшість із них використовує дискретне або апроксимоване представлення простору, що обмежує можливість точної геометричної інтерпретації навігаційних небезпек. Крім того, у розглянутих роботах практично відсутній формалізований облік якості даних CATZOC/QOBD у поєднанні з геометрією навігаційних об'єктів ENC, параметрами Safety Depth, Safety Contour, UKC та залежністю від маршруту судна. Це створює передумови для розвитку більш строгої геометричної моделі формування LDL, яка дозволяє інтегрувати якість гідрографічних

даних, тип геометрії ENC-об'єкта, буферизацію, просторову невизначеність та контекст маршруту судна в межах єдиного математичного підходу.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою статті є розробка формалізованої математичної моделі побудови LDL на електронних навігаційних картах (ENC), яка забезпечує інтеграцію батиметричних об'єктів різної природи (точкових, лінійних, полігональних) з урахуванням невизначеності гідрографічних даних CATZOC та залежності від маршруту судна з урахуванням XTD у межах єдиного геометричного підходу до забезпечення навігаційної безпеки. При цьому модель орієнтована насамперед на використання зі стандартом формату S-57 ENC, а також може розглядатися як математична основа для перспективної інтеграції в архітектуру S-100, зокрема у взаємозв'язку з S-101 ENC, S-102 Bathymetric Surface, S-104 Water Level Information for Surface Navigation та S-129 Under Keel Clearance Management, що дозволяє враховувати якість гідрографічних даних, батиметрію, змінні рівні води та контроль запасу води під кілем у межах єдиної моделі оцінювання навігаційної небезпеки.

Об'єктом дослідження є процес забезпечення навігаційної безпеки судноводіння при використанні ENC в умовах невизначеності гідрографічних даних. **Задачі дослідження:** проаналізувати існуючі підходи до побудови контурів небезпек та забезпечення безпеки навігації в ECDIS; дослідити особливості використання категорій CATZOC/QOBD для відповідних типів об'єктів ENC; сформувані єдину геометричну інтерпретацію невизначеності гідрографічних даних; розробити математичну модель побудови LDL на основі геометричних операцій (зокрема суми Мінковського та буферизації); забезпечити інтеграцію точкових, лінійних та полігональних об'єктів ENC у межах єдиної моделі; врахувати вплив маршруту судна та

параметра XTD на формування релевантної області навігаційних обмежень; сформувані алгоритмічну послідовність побудови LDL у загальному вигляді для практичного застосування при попередній прокладці.

Методи дослідження: методи обчислювальної геометрії (сума Мінковського, буферизація, аналіз меж множин); методи математичного моделювання просторових структур; геоінформаційні методи обробки векторних даних ENC; методи аналізу навігаційних обмежень та умов безпеки судноводіння; елементи теорії множин та морфологічного аналізу. Для коректного застосування геометричних операцій (сума Мінковського, буферизація, вимірювання відстаней) у межах моделі передбачається виконання розрахунків у локальній метричній проекції, а не безпосередньо в географічних координатах широти та довготи, що забезпечує коректність метричних операцій при побудові LDL.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

У розглянутих роботах практично відсутній формалізований облік якості даних електронних навігаційних карт CATZOC/QOBD у поєднанні з геометрією навігаційних об'єктів ENC, параметрами Safety Depth, Safety Contour, UKC та залежністю від маршруту судна. Це створює передумови для розвитку більш строгої геометричної моделі формування LDL, яка дозволяє інтегрувати якість гідрографічних даних, тип геометрії ENC-об'єкта, буферизацію, просторову невизначеність та контекст маршруту судна в межах єдиного математичного підходу.

Наукова новизна полягає у поєднанні в межах єдиної моделі: геометричної невизначеності CATZOC, глибинної небезпеки (Safety Depth / UKC), векторної геометрії ENC, маршруту судна (з урахуванням XTD) та операцій буферизації / суми Мінковського для формування LDL як межі релевантної області навігаційної небезпеки.

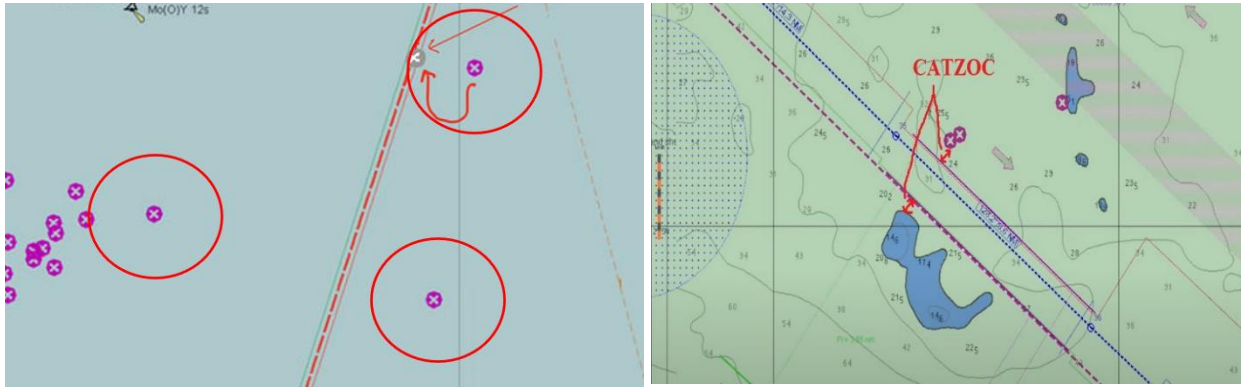


Рис. 1. Стандартне використання LDL для точкових небезпек

Існуючі стандарти [1] визначають CATZOC як якісну або скалярну міру якості даних. На противагу цьому, запропонована модель перевизначає CATZOC як параметр радіальної невизначеності (горизонтальна невизначеність):

- забезпечуючи просторове розширення гідрографічних об'єктів;
- перетворюючи невизначеність, що базується на атрибутах, на геометричну невизначеність;
- забезпечуючи пряму інтеграцію в просторові операції.

Це перетворює CATZOC з описового індикатора на операційний геометричний оператор. Традиційно при плануванні маршруту спираються на порівняння порогів з безпечною глибиною або дискретною класифікацією небезпек. Запропонований підхід впроваджує безперервне просторове представлення навігаційної невизначеності. Також на відміну від буферних моделей на основі GIS, які мають статичний характер, запропонована структура впроваджує поле небезпеки, обумовлене маршрутом, при цьому:

- небезпеки перетинаються з коридором, **визначеним поперечною відстанню XTD**;
- оцінка безпеки стає залежною від запланованої траєкторії;
- просторовий ризик більше не є абсолютним, а стає контекстно-залежним.

Такі властивості дозволяють адаптувати геометрію небезпеки до навігаційних планів і модель замінює дискретні тригери безпеки безперервним просторовим представленням.

Розглянемо випадок, коли є необхідність використання LDL (рис.1).

Такі лінії окреслення небезпек LDL будуються в ручному режимі. При побудові таких ліній полігоном є невідповідності по точності їх відображення. Всі окреслені об'єкти повинні бути з підписом реальної глибини d^{eff} з урахуванням поправки на категорію зони.

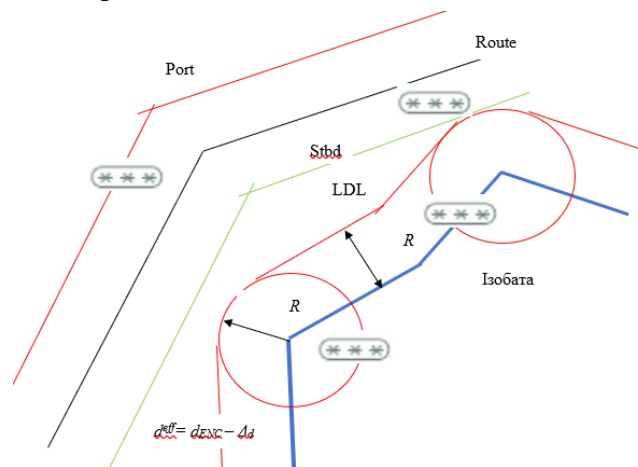


Рис. 2. Відображення двох плечей маршруту з XTD

Наприклад, Safety Contour пролягає осторонь, як маршруту, так і його XTD (рис.2), однак, такі LDL все одно потрібно нанести, оскільки CATZOC – С, що визначає похибку у місцеположенні до 500 м (горизонтальна невизначеність). Оскільки на карті ізобати теж знаходяться в такій частині акваторії і

отримані з однакового джерела (супутникові дані), авторським припущенням є висновок, що лінійні об'єкти (ізобати), і, якщо є полігони (depth areas), теж мають таку ж похибку, тобто повинні бути окреслені LDL з перерахованою глибиною (від точкової глибини по карті d_{ENC} відняти величину поправки Δ_d (1)).

При окресленні таких об'єктів повторюють контур ізобати / полігону, що є не точним. Тобто використовується паралельне зміщення небезпеки через LDL. При цьому, якщо маршрут пролягає у вузькості, то може, в деяких випадках, окреслюватися забагато акваторії, що зменшує навігаційний канал (рис.3а).

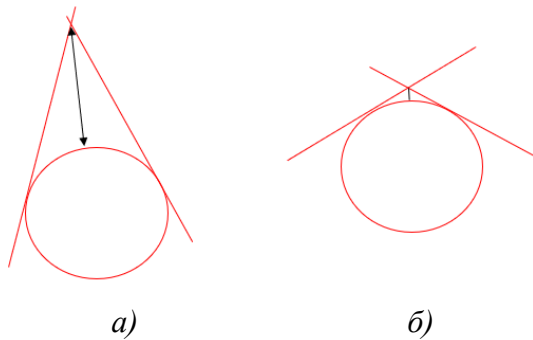


Рис. 3. Варіанти з'єднання LDL (коло – окреслення точкового об'єкту LDL)

Звісно, на категоріях А1, А2, В немає сенсу використовувати пропонований метод, а ось при категоріях С, D, особливо на гострих кутах поєднання 2D-сплайнів полігону ізобат (рис.3а), метод економить додатковий навігаційний простір (на тупих кутах, рис. 3б, метод може бути малоефективним). Тобто замість площі між дугою кола і кутом, побудованим LDL використовується тільки дуга кола, як окреслення зони можливого місцерозташування вершини полігону ізобати (рис.2), а бокові LDL закінчуються у місці дотику до кола. Збільшення навігаційного простору здійснюється за рахунок підвищення точності геометричного окреслення LDL без зниження безпеки судноплавства. Продовженням ефективного

геометричного відображення LDL є побудова формалізованої моделі.

У дослідженні вертикальна та горизонтальна складові CATZOC розглядаються окремо. Вертикальна невизначеність використовується для оцінювання безпеки глибини та визначення потенційно небезпечних об'єктів через Safety Depth / UKC. Горизонтальна складова CATZOC використовується для геометричного моделювання області просторової невизначеності навколо ENC-об'єктів під час побудови LDL.

Для кожного об'єкта розраховується ефективна глибина:

$$d^{eff} = d_{ENC} - \Delta_d \quad (1)$$

де: $\Delta_d = a + b d_{ENC}$

Надана формула відповідає табличній [1, с.19, табл.А-1], де a – константа категорії ZOC, b – частка від точкової глибини / небезпеки.

Критерій небезпеки для глибин: $d^{eff} \leq D_{safe}$ (розрахованого значення Safety Depth).

Використання (1) передбачено лише для оцінювання вертикальної похибки глибини та не повинне безпосередньо застосовуватись для горизонтального зміщення LDL.

Опис множини небезпечних об'єктів.

Нехай L – лінійний батиметричний об'єкт ENC (ізобата),

P – полігональна depth area;

S – точковий батиметричний об'єкт (soundings, IDS, obstruction, wreck).

Спочатку визначаються потенційно небезпечні об'єкти відповідно до Safety Depth/ Safety Contour, після чого враховується невизначеність гідрографічних даних CATZOC

$$(x_{true}, y_{true}) \in B((x_{ENC}, y_{ENC}), R_{CATZOC}) \quad (2)$$

де R_{CATZOC} - кола з радіусом, що відповідає категорії, невизначеність карти горизонтальної складової.

Множина можливих істинних положень,
 P_{true} :

$$P_{true} = \bigcup_{p \in P} B(p, R_{CATZOC}) = P \oplus B(0, R_{CATZOC})$$

$$L_{true} = \bigcup_{l \in L} B(l, R_{CATZOC}) = L \oplus B(0, R_{CATZOC}) \quad (3)$$

Тепер CATZOC можна уявити геометричним оператором: $P \rightarrow P \oplus B(R_{CATZOC})$ та $L \rightarrow L \oplus B(R_{CATZOC})$.

Ці операції формують область навігаційної небезпеки (Ω^{danger}), тоді LDL визначається як межа цієї області: $LDL = \partial \Omega^{danger}$.

Для лінійних батиметричних об'єктів та полігональних (вертикальна складова):

$$L_i^{danger} = \{L_i | d_i - \Delta_d \leq D_{safe}\} \quad (4)$$

$$P_i^{danger} = \{P_i | d_i - \Delta_d \leq D_{safe}\}$$

де: d_j - глибина з карти ENC;

Δ_d - похибка spot-глибини / IDS відповідно до CATZOC.

LDL можна представити як морфологічну операцію і тоді LDL, як функція маршруту:

$$LDL = f(L, P, S, CATZOC, R, XTD) \quad (5)$$

$$R_{\Sigma} = R_{CATZOC} + R_{nav} + R_{env} \quad (6)$$

де: R_{nav} - похибки судноводіння (GNSS, інерція, людський фактор);

R_{env} - зовнішні умови (вітер, течії, хвилювання);

R_{Σ} - є підсумковим параметром і включає всі фактори, використовується у *Buffer* і має складну залежність.

У дослідженні розмежовуються поняття області небезпеки та LDL. *Buffer*-операції та сума Мінковського використовуються для формування області небезпеки Ω_i^{danger} , а LDL визначається виключно як її межа і є огинаючою сімейства кіл і складається з паралельних зсувів лінійних сегментів і дуг кіл у вершинах:

$$\Omega_i^{danger} = P_i \oplus B(0, R_{CATZOC})$$

$$\Omega_i^{danger} = L_i \oplus B(0, R_{CATZOC})$$

$$LDL_i = \partial \Omega_i^{danger} \quad (7)$$

де $B(0, R_{CATZOC})$ – коло радіусу, що відповідає геометричній невизначеності розташування небезпеки зони CATZOC.

Області небезпеки:

$$\Omega_i^{danger} = \{x \in R^2: dist(x, P_i) \leq R_{CATZOC}\} \quad (8)$$

$$\Omega_i^{danger} = \{x \in R^2: dist(x, L_i) \leq R_{CATZOC}\}$$

Buffer - це характеристика того, як саме геометрично моделюється зона невизначеності / небезпеки навколо об'єктів ENC.

Оскільки потрібна відповідність LDL саме відносно маршруту, то, нехай:

Route(WPT) – маршрут, як послідовність точок WPT з координатами

$$Route(WPT) = (x(WPT), y(WPT))$$

У подальшому: у формулах, де використовується як множина – *Route*, а його *Buffer* (релевантна область дослідження відносно плеча маршруту) $\in Z_{Route}$:

$$Z_{Route} = Buffer(Route, d_{XTD}) \quad (9)$$

Обмеження області будуть для лінійних та полігональних типів:

$$\Omega_i^{final} = (P_i \oplus B(R_{CATZOC})) \cap Z_{Route}$$

$$\Omega_i^{final} = (L_i \oplus B(R_{CATZOC})) \cap Z_{Route} \quad (10)$$

$$LDL_i^{final} = \partial \Omega_i^{final}$$

Далі необхідно зробити зміщення LDL в сторону плеча маршруту (side), щоб виконати правило вважати себе ближче до небезпеки. Для цього побудуємо обмеження через

півпростір H_{route} . Для кожної точки маршруту вводимо по типах об'єктів:

$$\begin{aligned} \Omega_i^{side} &= (P_i \oplus B(R_{CATZOC})) \cap H_{route} \\ \Omega_i^{side} &= (L_i \oplus B(R_{CATZOC})) \cap H_{route} \quad (11) \\ LDL_i^{side} &= \partial\Omega_i^{side} \end{aligned}$$

де $H_{route} = \{x \in R^2: (x - Route(WPT))n \geq 0\}$ – напівпростір, визначений нормаллю n .

якщо:

$(x - Route(WPT))n \geq 0$ – вибір сторони в напрямку нормалі;

$(x - Route(WPT))n \leq 0$ – для вибору протилежної сторони;

$(x - Route(WPT))n = 0$ – відповідає точкам, що лежать на межі напівпростору, та включається до області.

Buffer залишається круговим, а «напрямок» задається не деформацією, а обрізанням області. Оскільки на картах дуже часто зустрічаються зміни CATZOC уздовж ізобат у тому числі, а dataset карти має уявлення ізобат як полігонів, то запропонована модель дозволяє відображати LDL з різними CATZOC. У таких випадках ізобата у dataset не може мати один єдиний ID-номер. Не зважаючи на візуальну присутність різних CATZOC, dataset має для кожного ID-номера об'єкта лише одне значення CATZOC. На карті SENC оператор бачить одну цілу ізобату, але програмно ECDIS при цьому звертається до кількох ізобат з різними ID-номерами, які при відображенні складають візуально єдину ізобату, що досягається однаковими координатами кінця i – i частини ізобати і початком наступної $(i+1)$ – i частини ізобати.

Моделювання LDL для точкових об'єктів.

Глибина над небезпекою або точкова глибина не повинна бути меншою за визначену глибину, як безпечну (Safety Depth). Небезпечною є ситуація, коли різниця $\leq D_{safe}$:

$$d_j - \Delta_{d_j} \leq D_{safe} \quad (12)$$

Проведення відбору об'єктів для дослідження:

$$dist(S_j, Route(WPT)) \leq d_{XTD} + R_{CATZOC} \quad (13)$$

де d_{XTD} - бокова дистанція дослідження на поточному плечі маршруту.

Сума Мінковського:

$$S \oplus B(Route) = B(S, Route) \quad (14)$$

Формула (14) задає геометричну інтерпретацію суми Мінковського для точкового об'єкта ENC, де результатом є кругова область потенційної навігаційної небезпеки.

$$\Omega_j^{danger} = B(S_j, R_{CATZOC})$$

Обмеження: $\Omega_j^{final} = \Omega_j^{danger} \cap Z_{Route}$

Єдина модель для ізобат, полігонів, точкових глибин і небезпек, яка моделює опрацювання LDL тільки через параметри CATZOC:

$$\begin{aligned} \Omega_{danger} &= \left(\bigcup_i (P_i^{danger} \oplus B(R_{CATZOC})) \cup \bigcup_k (L_k^{danger} \oplus B(R_{CATZOC})) \right) \bigcup_j B(S_j, R_{CATZOC}) \cap Buffer(Route, d_{XTD}) \end{aligned} \quad (15)$$

Тоді для ізобат та полігональних об'єктів:

$$\begin{aligned} LDL &= \partial Buffer(L, R_{CATZOC}) \\ LDL &= \partial Buffer(P, R_{CATZOC}) \end{aligned} \quad (16)$$

Відбувається те, що кожен сегмент зсувається паралельно і у вершинах автоматично виникають дуги. Для зміщення у сторону маршруту для точки контуру P_i знаходимо найближчу точку на маршруті $Route(WPT)$ і отримуємо вектор до найближчої точки маршруту

$$\vec{\vartheta} = Route(WPT) - p_i$$

де $p_i \in \partial P$ і є поточною точкою межі полігонального об'єкта.

Вибір напрямку зміщення за правилом: $\vec{\vartheta}\vec{n} = 0$, тоді використовується симетричний *buffer* (небезпека точно на межі), якщо $\vec{\vartheta}\vec{n} > 0$, зміщуємо по нормалі (у бік маршруту), інакше - у протилежний бік.

Для ізобат і полігонів відповідно:

$$\begin{aligned} LDL(p_i) &= p_i + R_{CATZOC} \text{sign}(\vec{\vartheta}\vec{n})\vec{n} \\ LDL(P_i) &= P_i + R_{CATZOC} \text{sign}(\vec{\vartheta}\vec{n})\vec{n} \end{aligned} \quad (17)$$

Повний варіант з урахуванням інших впливів, наприклад, параметрів зовнішнього середовища, навігаційних перешкод здійснюється через звичайний *Buffer*, тоді для ізобат і полігонів:

$$\begin{aligned} LDL &= \partial(P \oplus B(Route)) \cap Buffer(Route, d_{XTD}) \\ LDL &= \partial(L \oplus B(Route)) \cap Buffer(Route, d_{XTD}) \end{aligned} \quad (18)$$

Для множини $A \subset R^2$ і відстані $R_{CATZOC} > 0$:

$$Buffer(A, R_{CATZOC}) = \{x \in R^2 \mid \text{dist}(x, A) \leq R_{CATZOC}\} \quad (19)$$

- якщо A є точкою - формується круг $Buffer(point, R_{CATZOC}) = circle$;
- якщо A є ізобатою - формується трубчаста область навколо лінії

$$LDL = \partial Buffer(L, R_{CATZOC});$$

- якщо A є полігоном - формується розширена область навколо полігона

$$LDL = \partial Buffer(P, R_{CATZOC})$$

Однак, направлене зміщення (*Directional offset*) як варіант єдиної моделі і для точкових небезпек, і для ізобат, полігонів може бути нестабільним, ламатися на кутах і бути складним у реалізації, у той час, як *Buffer* з

обрізкою є більш стабільним варіантом і легше реалізується.

Для повного варіанту Soundings / IDS:

$$\begin{aligned} \Omega_j^{danger} &= Circle(S_j, R_{CATZOC}) \\ LDL_j &= \partial \Omega_j^{danger} \end{aligned} \quad (21)$$

Загальна модель з урахування загального R_{Σ} (6):

$$\begin{aligned} LDL &= \partial \left[\left(\bigcup_i (P_i^{danger} \oplus B(R_{\Sigma})) \cup \bigcup_k (L_k^{danger} \oplus B(R_{\Sigma})) \right) \bigcup_j B(S_j, R_{\Sigma}) \right] \cap Buffer(Route, d_{XTD}) \end{aligned} \quad (22)$$

Алгоритм роботи:

1. Отримати ENC, CATZOC та маршрут.
2. Визначити Safety Depth / Safety Contour.
3. Відібрати потенційно небезпечні об'єкти.
4. Обчислити вертикальну похибку глибин потенційно небезпечних об'єктів.
5. Визначити горизонтальну невизначеність R_{Σ}
6. Побудувати області безпеки через суму Мінковського та *buffer*.
7. Об'єднати всі види небезпек у Ω_j^{danger}
8. Обмежити область маршрутом та XTD.
9. Побудувати: $LDL_j = \partial \Omega_j^{danger}$ як межу релевантної області навігаційної безпеки.

Нижче надана структурна схема, яка відображає зв'язок всіх рівнів та компонентів моделі (рис.4).

Основні результати та їх обговорення

Запропонована модель використовує строгу геометричну буферизацію на основі суми Minkowski, що забезпечує коректне паралельне зміщення контурів, вводить формальний коридор руху (XTD) та операцію перетину.

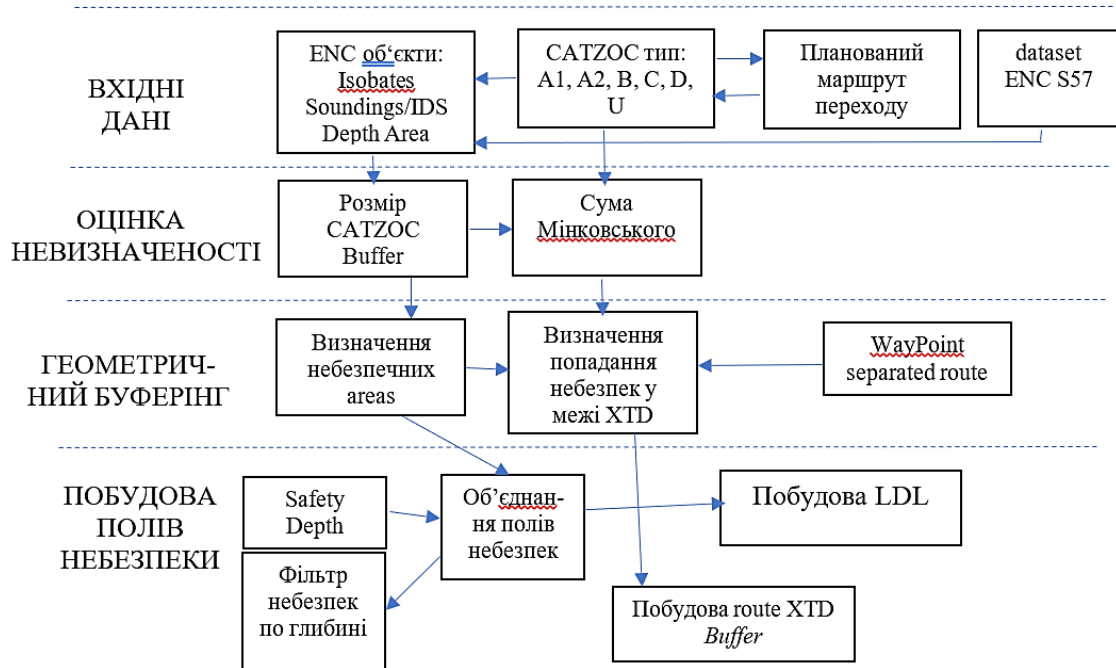


Рис. 4. Структурна схема всіх рівнів та компонентів моделі

Використана модель працює у точній векторній геометрії, що забезпечує коректність меж безпеки. Рекомендації для практичного використання: області обмеженого навігаційного простору з CATZOC гірше за В.

Практичним результатом застосування запропонованої моделі для користувача ECDIS може бути:

- автоматично сформований шар LDL;
- додатковий контур попередження під час перевірки маршруту;

– динамічна область навігаційних обмежень відносно планованого маршруту та XTD;

– допоміжний шар User Map для районів зі зниженою якістю гідрографічних даних.

Запропонована модель не розглядається як готовий ECDIS-модуль, а як математична основа для подальшої реалізації засобів автоматизованої побудови LDL та оцінювання навігаційного ризику. Нижче наведено практичний приклад порівняння звичайного способу нанесення LDL та за допомогою моделі (рис.5).



а) звичайна коректура

б) з використанням розробленої моделі

Рис. 5. Порівняння способів відображення LDL

У наявності збільшення навігаційного простору без підвищення небезпеки. Якщо для звичайного способу (рис.5а) потрібно робити додаткову точку WPT для зміни маршруту, то при використанні моделі (рис.5б) – достатньо зменшити XTD відповідного борту.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

На відміну від існуючих підходів маршрутизації, які базуються переважно на сіткових або графових представленнях простору, запропонована модель побудови LDL використовує строгий геометричний апарат (суму Мінковського) для побудови Buffer, явно враховує невизначеність даних ENC через параметри CATZOC та обмежує аналіз коридором руху судна (XTD). Аналіз сучасних досліджень показав, що більшість підходів до планування маршруту судна не дозволяє коректно враховувати геометрію небезпек. Крім того, у розглянутих роботах відсутня формалізована інтеграція показників якості гідрографічних даних (CATZOC) у математичну модель. Запропонована модель усуває зазначені обмеження шляхом використання строгої геометричної буферизації та локального врахування невизначеності. Модель побудови LDL розроблена для ENC-даних формату S-57 з перспективою інтеграції у середовище S-100. Вхідними даними моделі є: ENC-об'єкти різної геометрії; параметри Safety Depth / Safety Contour; CATZOC/QOBD; маршрут судна та XTD. Модель виконує послідовно: відбір потенційно небезпечних об'єктів; оцінювання вертикальної похибки глибин; побудову горизонтальної області невизначеності через buffer / суму Мінковського; просторове обмеження відносно маршруту. Результатом роботи моделі є релевантна область навігаційної небезпеки та LDL як її межа. Модель може застосовуватись як математична основа автоматизованої побудови LDL, перевірки попередньої прокладки та допоміжних навігаційних шарів ECDIS. Основними обмеженнями залишаються потреба у

валідації на реальних ENC-даних, вибір стратегії обробки змінного CATZOC та подальша програмна реалізація алгоритмів геометричних операцій.

Подальші дослідження можуть бути пов'язані з розвитком запропонованої моделі у напрямку її практичної реалізації, валідації та розширення функціональних можливостей. Зокрема, доцільним є проведення експериментального дослідження на основі реальних даних ENC з метою порівняння запропонованого підходу з традиційними методами побудови контурів безпеки в ECDIS. Окремим напрямком може бути розробка ефективних алгоритмів обчислення геометричних операцій для обробки великомасштабних картографічних даних у режимі реального часу. Значний науковий інтерес становить розширення моделі з урахуванням динамічних факторів (погодні умови, похибки позиціонування, маневрені характеристики судна), а також інтеграція з даними суднових сенсорів (RADAR, AIS) для побудови адаптивних моделей навігаційного ризику в реальному часі.

REFERENCES

- [1] Mariners' Guide to Accuracy of Depth Information in Electronic Navigational Charts (ENC), Edition 1.0.0 – September 2020, International Hydrographic Organization, 2020, P.28 https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/S-67/S-67%20Ed%201.0.0%20Mariners%20Guide%20to%20Accuracy%20of%20Depth%20Information%20in%20an%20ENC_EN.pdf
- [2] Guidelines and recommendations for hydrographic offices for the allocation of CATZOC/QOBD values from survey data, Edition 1.1.0 – March 2025, International Hydrographic Organization, 2025, P.32 https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/S-68/S-68_Guidelines_for_Allocation_of_CATZOC_Ed_1.1.0.pdf

- [3] Zis, T., Psaraftis, H., Ding, L. Ship weather routing: A taxonomy and survey. *Ocean Engineering*, Vol. 213, 2020. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107697
- [4] Grifoll, M., Borén, C., Castells-Sanabra, M. A comprehensive ship weather routing system using CMEMS products and A* algorithm, *Ocean Engineering*, Vol 255, 2022. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111427
- [5] Charalambopoulos, N. et al., Efficient ship weather routing using probabilistic roadmaps. *Ocean Engineering*, Vol 273, 2023. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.114031
- [6] Szlapczynski, R., Szlapczynska, J., Vettor, R. Ship weather routing featuring w-MOEA/D and uncertainty handling, *Applied Soft Computing*, Vol 138, 2023. DOI: 10.1016/j.asoc.2023.110142
- [7] Li, Y., Cui J., Zhang X., Yang X., A ship route planning method under sailing time constraint. *JMSE*, Vol. 11(6), 2023. DOI: 10.3390/jmse11061242
- [8] Yang, J., Wu L., Zheng J., Multi-Objective Weather Routing Algorithm for Ships: The Perspective of Shipping Company's Navigation Strategy. *JMSE*, Vol. 10(9), 2022. DOI: 10.3390/jmse10091212
- [9] Sun, W., Tang S., Liu X., Zhou S., An Improved Ship Weather Routing Framework for CII Reduction Accounting for Wind-Assisted Rotors, *JMSE*, Vol. 10(12), 2022. DOI: 10.3390/jmse10121979
- [10] Spyrou-Sioula K., Kontopoulos I., et al, AIS-enabled weather routing for Cargo Loss Prevention,. *JMSE*, Vol. 10(11), 2022. DOI: 10.3390/jmse10111755
- [11] He Y.K., Zhang D., Zhang J.F., Zhang M.Y., Li T.W.: Ship Route Planning Using Historical Trajectories Derived from AIS Data. *TransNav*, Vol.13(1), 2019, pp.69-76, DOI: 10.12716/1001.13.01.06
- [12] Kastrisios, C., Ware, C. (2026). Uncertainty-aware visualization and integration for maritime route safety assessment. *Cartography and Geographic Information Science*, 1–18. DOI: 10.1080/15230406.2026.2653841
- [13] Dudchenko, S., Tymochko O., et al. Application of fuzzy cellular automata to optimize a vessel route considering the forecasted hydrometeorological conditions,. *EEJET*, Vol.2 3(128), 2024. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.302876
- [14] Lee, H., Roh M., Kim K., Ship route planning in Arctic Ocean based on POLARIS. *Ocean Engineering*, Vol. 234, 2021. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109297
- [15] Chen, C. et al. A knowledge-free path planning approach using reinforcement learning. *Ocean Engineering*, Vol. 189, 2019. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106299
- [16] Ma W., Han Y. et al. Ship route planning with intelligent mapping optimization. Vol. 176, 2023, DOI: 10.1016/j.cie.2022.108920
- [17] Saravanan T., Rajakumar P., et al. Deep reinforcement learning for autonomous navigation in Unknown Environments, *Journal of Information Systems Engineering and Management*. Vol 10 22s, 2025, DOI: 10.52783/jisem.v10i22s.3620
- [18] Zhao, W., Wang H. et al. Multi-Objective Weather Routing Algorithm for Ships Based on Hybrid Particle Swarm Optimization, Vol. 21, 2022, p.28-38. DOI: 10.1007/s11802-022-4709-8
- [19] Ha, J. et al. Quantitative calculation method of the collision risk for collision avoidance in ship navigation using the CPA and ship domain, *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 8(3), 2021, p.894-909 DOI:10.1093/jcde/qwab021
- [20] Ha, J., Noh, M., Lee, H., Ship route planning for collision avoidance based on the improved isochrone method. *IJNAOE*, Vol. 16, 2024. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2024.100613