

## ПРОВЕДЕННЯ ДНОПОГЛИБЛЮВАЛЬНИХ РОБІТ В РАЗІ ЗМІННОГО ГІДРОГРАФІЧНОГО ЛАНДШАФТУ МОРСЬКОГО ДНА

*Розглянути теоретичні та технологічні аспекти проведення днопоглиблювальних робіт в разі змінного гідрографічного ландшафту морського дна. Наведено аналіз методів та механізмів за допомогою яких можливо використовувати природні процеси в напрямку складання прогнозу зміни рельєфу дна на мілководді в умовах судноплавства. Визначено, що безпека судноплавства безпосередньо залежить від точності та актуальності інформації про зміни рельєфу морського дна, оскільки його структура постійно змінюється під впливом природних факторів. В умовах мілководдя, судноплавних каналів та гирл річок такі зміни можуть суттєво впливати на прохідність маршрутів і підвищувати ризик аварійних ситуацій. У цій роботі представлені методи проведення днопоглиблювальних робіт в умовах змінюваного гідрографічного ландшафту морського дна із застосуванням математичного моделювання та аналізу гідрометеорологічних даних. Розроблений підхід базується на врахуванні таких зовнішніх факторів, як вітер, хвилювання, придонні течії, опади та структура ґрунту, що дозволяє підвищити точність прогнозів змін рельєфу дна. Ключовим аспектом дослідження є введення концепції scale factor, яка враховує вплив різних динамічних процесів залежно від просторово-часових умов. Це дозволяє виокремити значущі та незначні зміни рельєфу під час створення електронних навігаційних карт і забезпечувати судноводіїв актуальною інформацією про глибини в режимі реального часу. У межах виконаного дослідження розроблена модель динаміки рельєфу морського дна, що дозволяє прогнозувати процеси замулення, ерозії та зміни донних структур упродовж заданого періоду часу. Додатково розглядається можливість інтеграції отриманих прогнозних даних в електронні картографічні системи, такі як ECDIS та Inland ECDIS. Включення динамічної складової в навігаційні системи дозволить покращити точність відображення фарватеру та підвищити безпеку судноплавства завдяки своєчасному оновленню інформації про рельєф дна. Результати роботи можуть бути застосовані в навігації, гідрографії, портовому плануванні та управлінні днопоглиблювальними роботами.*

**Ключові слова:** безпека судноплавства, днопоглиблювальні судна, ландшафт морського дна, мілководдя, маневрування суден, морський транспорт, моделювання навігаційної зони, навігація, навігаційні перешкоди, прибережні води, портові води, судноплавство, стиснені акваторії.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** У практиці судноводіння зустрічаються методи визначення впливу збурення зовнішнього середовища на судно, що рухається. Проте ці методи не враховують масштаб, а точніше різницю масштабів, а, отже, і міру їх впливу на рухомий об'єкт [1-3]. Тому прийнято таке допущення, що динамічні процеси можуть бути "значимими" і "незначними" залежно від масштабу простору і часу, в яких вони відбуваються [4-6]. Сьогодні недостатньо пояснити, чому і за яких причин судно виявилось на мілині, сьогодні необхідно передбачати, як можуть змінюватися природні процеси в динаміці [7, 8]. На підставі цих даних можна скласти прогнози зміни рельєфу дна на мілководді в умовах судноплавства. Ключовим фактором є розробка програм, які дозволяють відстежувати зміни природних процесів з відображенням і фіксацією їх на електронних носіях [9-11].

У практиці судноводіння досить часто існує проблема незбігу глибин на навігаційних картах і в реальності. Це, як правило, відбувається на мілководді або, найчастіше, на підхідних каналах в пригірлових ділянках річок. У цих випадках виникає загроза посадки судна на мілину. Як показує аналіз, днопоглиблювальні роботи в таких місцях проводяться без урахування впливу

рельєфстворюючих чинників, таких, як наприклад, сила і напрям вітру, довжина і висота хвилі та стан морського дна [12, 13]. Визначення проміжків часу, через які необхідно проводити днопоглиблення, а також складання прогнозу зміни рельєфу дна на цей час, одне із завдань цього дослідження. Рішення такої задачі дозволить судноводієві підвищити інформативність і точність положення фарватеру, що у свою чергу надасть можливість уникнути негативних наслідків, пов'язаних з посадкою на мілину.

**Формулювання цілей статті.** Метою цієї роботи є уточнення прогностичних елементів динамічних процесів довкілля під час руху судна і визначення якісних характеристик "значимості" під час використання пропонованого п'ятого елементу просторового виміру "scale factor" для врахування їх впливу на рухоме судно. Внаслідок того, що залежно від вибраного масштабу карти необхідно буде побудувати відповідну модель динаміки електронної навігаційної карти (ЕНК), допоміжним завданням є визначення алгоритму для моделювання динамічних процесів морського середовища в період руху судна.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На теперішній час вже є ряд робіт, присвячених моделюванню поверхні водного простору в динаміці, а також зміні рельєфу морського дна і руху судна з урахуванням цього процесу [14-16]. Слід зазначити, що на усіх сучасних транспортних суднах паперові навігаційні карти застосовуються лише як резервні, а на електронних картах судноводій спостерігає рух судна тільки в площині екрану монітора в системі координат  $x, y$ . Використання ЕНК дає іноді судноводієві неправдиве уявлення про точність розташування об'єктів залежно від масштабу [17-19]. Слід зазначити, що точність і деталізація відображення, наприклад, засобів навігаційного устаткування (ЗНО), прив'язані до базового масштабу карти і при збільшенні масштабу відображення точність і деталізація карти не зміняться [20-22]. Сучасні технології дозволяють отримувати зображення судна в динаміці у взаємодії із зовнішнім середовищем з урахуванням вибраного ще на стадії складання карти параметра "scale factor", який обмежується вимогами до необхідної точності відображення об'єктів ЗНО на карті.

Встановлений алгоритм розвитку динамічних процесів рельєфу морського дна. Для цього проведені повторювальні проміри дна на досліджуваному полігоні, з використанням багатопроменевого ехолота (рис. 1).

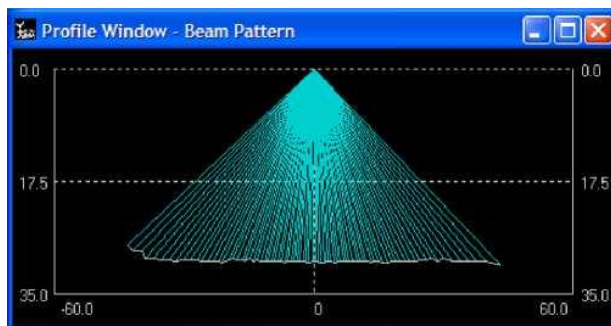


Рисунок 1 – Багатопроменевий ехолот в роботі

На промірний планшет нанесена сітка квадратів в умовній системі координат  $x, y, z$  (рис. 2), а в кожній вершині з координатами  $x_i, y_i$  визначена  $z_i$ .

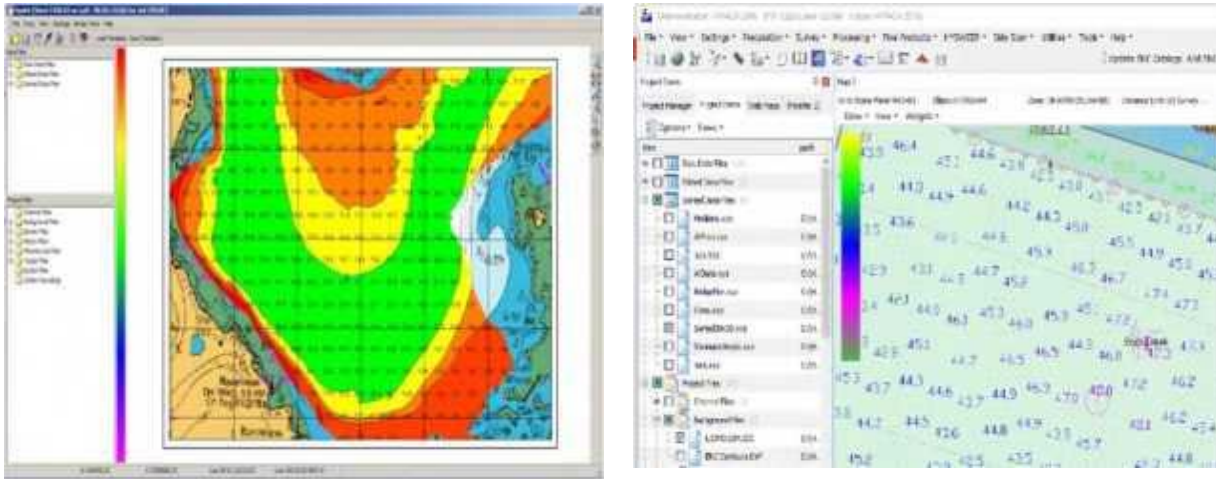


Рисунок 2 – Промірний планшет з нанесеною сіткою координат

При виборі "значимого" масштабу керувалися вимогами до точності вимірюваних параметрів. Внаслідок чого отримали, що масштаб часу слід віднести до одного місяця, а масштаб сітки квадратів може бути від одного до десяти метрів залежно від характеру рельєфу і швидкості рухливості ґрунту. Динаміку рельєфу відобразимо на ENC і IENC з урахуванням того, що Dynamic charts (морські і річкові) повинні забезпечувати безпеку судноплавства, і тому вони повинні максимально точно відображати нанесену інформацію, особливо ізобати.

Як відомо, рельєф морського дна постійно змінюється, особливо в гирлових ділянках річок, на підхідних каналах, в місцях підводних течій і при тривалих штормах [23-25]. Ці зміни можуть бути значними (до декількох метрів), що в умовах мілководдя може привести до аварійної ситуації судна та додатково погіршити екологічну ситуацію [26-28].

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо завдання побудови моделі динаміки рельєфу морського дна. Алгоритм такої моделі припускає наявність нижче перерахованих початкових даних: тип ґрунту; рухливість ґрунту; фізичні характеристики води (щільність, температура в придонному шарі); глибина моря; характеристики хвилювання моря (висота і довжина хвилі, напрям руху хвилі, сила і напрям вітру), характеристики придонної течії (швидкість, напрямок і розподіл по вертикалі).

Для складання моделі вимагається встановити закономірності пересування (розмиття, намиття) підводного ґрунту шляхом визначення функціональних залежностей зміни рельєфу морського дна від динамічних параметрів морського середовища, тобто необхідно визначити вид функції  $F(x; y; z)$ , яка описує рух окремо взятої точки на поверхні морського (річкового) дна в координатному просторі  $x_i, y_i, z_i$ , де  $i = 1, n$ ;  $n$  – номер ітерації в процесі вибору моделі.

Можливо також використовувати модель динаміки рельєфу морського дна, застосувавши метод паралельного перенесення характерних форм рельєфу.

Для цього побудуємо координатну сітку з квадратів, розміри яких дозволяють відчутти переміщення характерних форм рельєфу дна із заданою точністю. У цій сітці координати  $x, y = x_1, y_1$  в кожній вузловій точці фіксовані і залишаються постійними, змінною є лише координата  $z = z_i$ , де  $i = 1, n$ ;  $n$  – номер ітерації в процесі визначення виду функції  $F(z)$ .

На гирловій ділянці Дунаю, де відбувається замулювання фарватеру, був вибраний досліджуваний полігон, де встановлений гідрометеорологічний буй (рис. 3), на який безперервно ведеться запис усіх характеристик, у тому числі і тих, що впливають на пересування підводного ґрунту [29, 30].



Рисунок 3 – Гідрометеорологічний буй

Прийнявши гіпотезу про паралельне перенесення рухомої хвилі підводного рельєфа ґрунту, застосовано ітераційний метод Гаусса – Зейделя [31]. Приймаючи, що паралельне перенесення відбувається в кожній точці  $x_i$ ;  $y_i$  по власній траєкторії, що відповідає зміні підводного рельєфу ґрунту по висоті  $h_i$  на відстань  $b_i$  (в проєкціях на координатні осі  $x$  і  $y$  відповідно) для  $i$ -ої точки. Необхідно відмітити, що  $h_i$  відноситься до часу  $t_0$ , а  $b_i$  до часу  $t_1$ . Тоді запишемо досліджуваний масив у вигляді системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{n1}x_1 + \dots + a_{nn}x_n &= b_n \end{aligned} \right\}, \tag{1}$$

Прийmemo рівняння (1) як масив даних про рельєф дна і представимо його у виді:

$$\left. \begin{aligned} a_{11}x_1 &= a_{12}x_2 - a_{13}x_3 - \dots - a_{1n}x_n + b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 &= -a_{23}x_3 - \dots - a_{2n}x_n + b_2 \\ \dots & \\ a_{(n-1)1}x_1 + a_{(n-1)2}x_2 + \dots + a_{(n-1)(n-1)}x_{n-1} &= -a_{(n-1)n}x_n + b_{n-1} \\ a_{(n-1)1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{n(n-1)}x_{n-1} + a_{nn}x_n &= b_n \end{aligned} \right\},$$

де  $a_{ii}$  – визначувані коефіцієнти.

Тут у  $j$ -му рівнянні перенесені в праву частину усі члени, що містять  $x_i$ , для  $i > j$  та система записана у вигляді:

$$(L + D)\vec{x} = -U\vec{x} + \vec{b},$$

де  $D$  означає матрицю, в якій на головній діагоналі стоять діагональні елементи матриці  $A$ , а всі інші елементи  $D$  нулі; матриці  $U$  та  $L$  містять верхню і нижню трикутні частини  $A$ , на головній діагоналі матриць  $U$  та  $L$  стоять нулі:

Після вибору відповідного початкового наближення ітераційний процес будується по формулі:

$$(L + D)\vec{x}^{(k+1)} = -U\vec{x}^{(k)} + \vec{b}, k = 0, 1, 2, 3, \dots, n.$$

Значення  $x$  послідовно обчислювали перетворенням системи:

$$\left. \begin{aligned} x_1^{(k+1)} &= c_{12}x_2^{(k)} + c_{13}x_3^{(k)} + \dots + c_{1n}x_n^{(k)} + d_1 \\ x_2^{(k+1)} &= c_{21}x_1^{(k+1)} + c_{23}x_3^{(k)} + \dots + c_{2n}x_n^{(k)} + d_2 \\ &\dots \\ x_n^{(k+1)} &= c_{n1}x_1^{(k+1)} + c_{n2}x_2^{(k+1)} + \dots + c_{n(n-1)}x_{n-1}^{(k+1)} + d_n \end{aligned} \right\},$$

де

$$c_{ij} = -\frac{a_{ij}}{a_{ii}}, d = \frac{b_i}{a_{ii}}, i = 1, \dots, n.$$

Таким чином,  $i$ -та компонента  $n$ -го наближення обчислюється за формулою:

$$x_i^{(k+1)} = \sum_{j=1}^{i-1} c_{ij}x_j^{(k+1)} + \sum_{j=i+1}^n c_{ij}x_j^{(k)} + d_i, i = 1, \dots, n.$$

Умова закінчення ітераційного процесу при досягненні заданої точності  $\varepsilon$  в спрощеній формі має такий вигляд:

$$\|x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}\| \leq \varepsilon.$$

Умова збіжності:

$$|a_{ii}| > \sum > |a_{ij}|.$$

Вище розглянута спрощена модель, яка показує лише приблизно, як поводитиметься підводний рельєф при сталому навантаженні [32, 33]. Для отримання реалістичнішої картини в результаті моделювання скористаємося системами нелінійних рівнянь.

Представимо модель рельєфу дна у вигляді системи нелінійних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ &\dots \\ f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

або

$$X = |x_1, x_2, x_3, \dots, x_n|.$$

Вирішуючи цю систему, знаходимо, задовольняючий системі із заданою точністю  $\varepsilon$ , вектор:

$$f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0, i = \overline{1 \dots n}.$$

При рішенні цієї системи використовувалися ітераційні методи:

$$\overline{X^0} = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0].$$

Перетворивши систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ \dots \\ f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

до вигляду

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \varphi_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ x_2 &= \varphi_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ \dots \\ x_n &= \varphi_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{aligned} \right\}$$

або

$$x_i = \varphi_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), i = \overline{1, n},$$

вибираємо початкове приближення

$$\overline{X^0} = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0].$$

Використовуючи значення змінних, отриманих на кроці  $(k-1)$ , знаходимо наближені значення коренів:

$$x_i^{(k)} = i(x_1^{k-1}, x_2^{k-1}, x_3^{k-1}, \dots, x_n^{k-1}). \quad (2)$$

Ітераційний процес припиняється, щойно виконається умова (за всіма змінними):

$$|x_j^k - x_j^{k-1}| \leq \varepsilon, j = \overline{1, n}$$

при виконанні умови збіжності ітераційного процесу пошуку, а саме:

$$\sum_{i=1}^n \left| \frac{\delta \varphi_i}{\delta x_j} \right| < 1, j = \overline{1, n}.$$

У результаті нескладних математичних операцій можна знайти функцію  $y(x)$  при паралельному перенесенні геометричних форм рельєфу дна, використовуючи розв'язання задачі Коші. Так, наприклад, розглянемо методи Рунге – Кутте, засновані на апроксимації шуканої функції  $Y(x)$  у межах кожного кроку многочленом, отриманим за допомогою розкладання функції  $Y(x)$  в межах кроку  $h$  кожної  $i$ -ої точки в ряду Тейлора:

$$\begin{aligned} y(x_i + h) &= y(x_i) + h \cdot y'(x_i) + \frac{h^2}{2!} y''(x_i) + \\ &+ \frac{h^3}{3!} y'''(x_i) + \frac{h^4}{4!} y^{(4)}(x_i) + \frac{h^5}{5!} y^{(5)}(x_i) + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Запропонована модель дає змогу в інформаційному блоці IECDIS дати графічне відображення динамічного процесу ізобат на частині електронної карти, як показано на рис. 4, а також зображення динаміки рельєфу морського дна в 3-D зображенні.

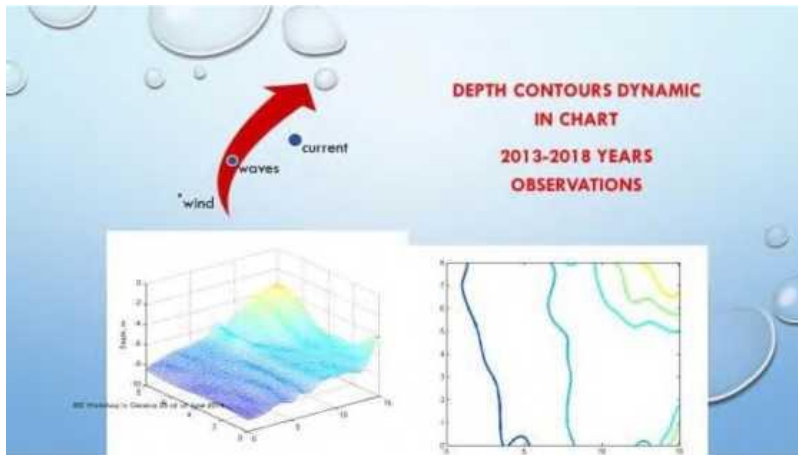


Рисунок 4 – Зображення рельєфу дна в динаміці (ліворуч) та ізобар (праворуч)

Запропоновану модель можна представити у вигляді блок-схеми (рис. 5).

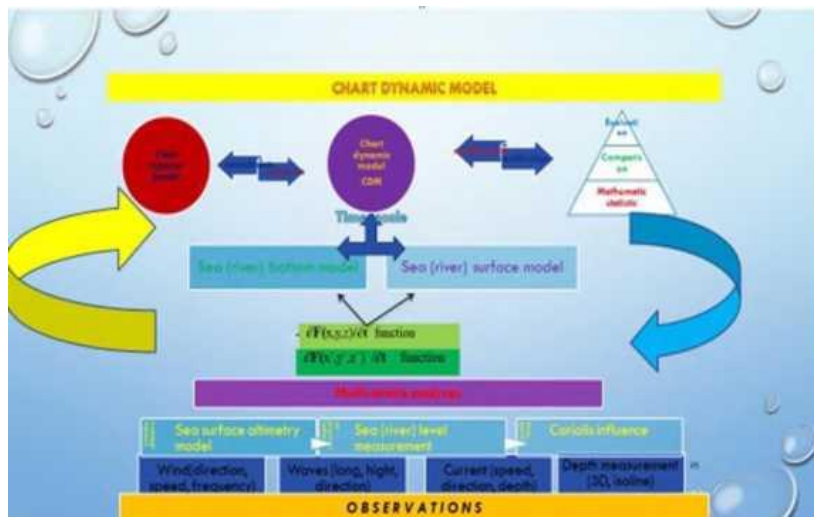


Рисунок 5 – Блок-схема динамічної моделі навігаційної карти

Ця модель передбачає проведення постійних спостережень за станом зовнішнього середовища з використанням гідрометеорологічного буя. Отримані результати спостережень заносять в електронний банк даних. У цьому банку зберігаються і надалі опрацьовуються такі дані як швидкість, тривалість і напрямок вітру, дані про стан хвилювання (довжина і висота хвилі, а також напрямок її руху), розрахована швидкість придонної течії, зміни рівня водної поверхні та глибини. Використовуючи ці дані, шляхом проведення багатofакторного аналізу можна визначити вагову характеристику кожного з елементів зовнішнього середовища, а потім методом ітерацій можна підібрати функції, що описують водну поверхню і поверхню дна. Ці функції віднесено до різних масштабів часу, тому, приводячи їх до одного масштабу з урахуванням динамічних складових, отримуємо “chart dynamic model”.

Запропонований спосіб моделювання динамічної карти дає можливість скласти прогноз замулювання морського/річкового дна на заданий період часу. Після порівняння прогнозу з фактичним результатом вводять поправки в функцію, що підбирається, вдосконалюючи модель [34-36].

На блок-схемі (див. рис. 5) відображено алгоритм моделювання так званої динамічної навігаційної карти, масштаб якої прив'язаний до періоду і параметрів морської хвилі. Так, наприклад, для досліджуваної ділянки побудови динамічної карти одиницею масштабу часу обрано 30 с, в якості одиниці масштабу відображення коливання поверхні рівня води обрано 10 см. Для відображення динаміки рельєфу морського дна за одиницю масштабу часу обрано 1 місяць із необхідною 10 см точністю відображення ізобат.

На рис. 6 зображено два фрагменти положення ізобат в залежності від хвилювання моря відносно

поверхні води, що коливається. Ці два положення характеризують зміну глибини на спостережуваній ділянці за період у 30 с, що відповідає одиниці масштабу і величині хвильового утворення, знятого з вимірювань гідрометричного буя.



Рисунок 6 – Зміна положення ізобат на досліджуваній ділянці, внаслідок утворення хвиль на поверхні моря за період у 30 с

На рис. 7 зображено криволінійну сітку координат, що спирається на вузлові точки, найбільш чутливі в обраному динамічному полі. Накладаємо цю сітку координат на картографічне зображення, будемо модель з використанням виразів (1) – (3), яка дає змогу побачити коливання поверхні в режимі 3D.

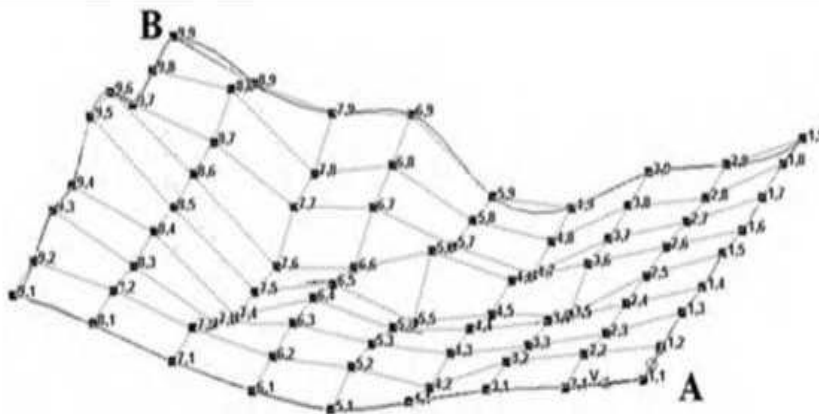


Рисунок 7 – Вузлові точки умовної сітки координат у 3D зображенні

На рис. 8 наведено також два фрагменти положення ізобат, але вже відображуючих зміну глибин в залежності від динамічних процесів рельєфу морського дна в часовому масштабі в 1 місяць.

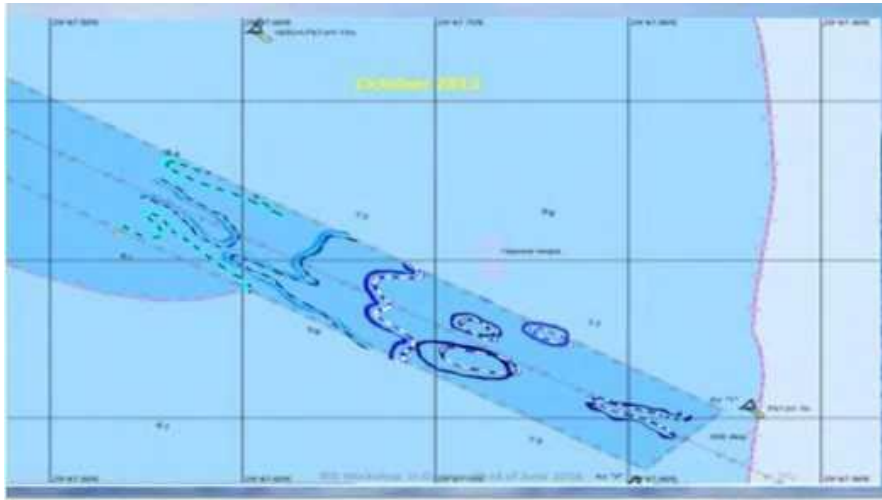


Рисунок 8 – Зміна положення ізобат на досліджуваній ділянці внаслідок руху підводного ґрунту з періодом в 1 місяць

Як видно з наведених зображень, одним із завдань побудови динамічної моделі навігаційної карти є вибір найбільш значимого масштабу для проведення досліджень і поєднання різномасштабних результатів в один інформаційний формат. Розв'язання цього завдання наведено в загальному вигляді на рис. 5, де в процесі ітерації вводять необхідні поправки в алгоритм використовуваної моделі, а також підбирають найбільш значущий масштаб, виходячи з необхідної точності до результатів вимірювань і використовуваних методів.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження можна зробити такі висновки.

В інформаційний блок навігаційних картографічних систем ECDIS і Inland ECDIS рекомендується вводити динамічну складову, що дає змогу бачити положення судна на хвилі відносно дна в реальному режимі часу, та можливість візуально оцінювати ступінь ризику дотику днищем судна поверхні дна.

Запропоновані методи моделювання шляхом паралельного перенесення рельєфу дна, що засновані на даних статистичних спостережень для прогнозу занесення дна на фарватері, дають достовірний результат, зазвичай, на піщаних і мулистих ґрунтах, де рельєф має яскраво виражені хвилеподібні форми, а також за умови зовнішніх впливів, що повторюються порівняно часто.

Для цілей спрощеного прогнозування можна використовувати модель, яка показує лише наближено положення ізобат у динаміці. Для точнішого прогнозу можна використовувати модель рельєфу дна у вигляді системи нелінійних рівнянь. У складних гідрометеоумовах пропонується використання алогічних методів, заснованих на апроксимації шуканої функції  $Y(x)$ .

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судноводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у суднових СППР // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
2. Тимочко О.І., Левченко О.В., Руденко В.М., Сітков О.М. Використання гібридних роботизованих комплексів для інспекції морських нафтогазових об'єктів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
3. Тимошук О.М., Мельник О.В. Аналіз можливості використання маневру розходження зміною курсу // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
4. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.

5. Даки О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
6. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
7. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
8. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
9. Тимошук О.М., Даки О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13>.
10. Ворохобін І.І., Бурмака І.О., Кулаков М.О., Петриченко О.О. Спосіб департаментизації електронної карти при зовнішньому управлінні розходження суден в зоні відповідальності СУРС // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 32. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 26-33. DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021.26-33.
11. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotzkyi Y., Fomin O., Pířtěk V., Kuřcera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
12. Сагін С.В., Сагін С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
13. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії воднохвильових збурень // Автоматизація судових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
14. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану судових енергетичних установок засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
15. Сагін С.В., Бондар С.А. Розробка методу діагностування технічного стану елементів головної енергетичної установки засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 175-186. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
16. Сагін С.С., Сагін С.В. Використання гібридної системи координації руху морських суден під час їх маневрування в стиснених водах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.24.
17. Ворохобін І.І. Зависимость вероятности безопасного прохождения судном стесненного района от закона распределения погрешности смещения // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 30. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 58-66. DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.58-66.
18. Шпілевський В.В., Крупов І.В. Гармонізація координатних систем у прикордонних районах країн на Дунаї // Судноводіння. – 2020. – Вип. 30. – С. 152-163. doi: 10.31653/2306-5761.30.2020.152-163.
19. Крупов І.В. Аналіз систем автоматичного управління земснарядами // Суднові енергетичні установки. – 2023. – Вип. 47. – С. 46-54. doi: 10.31653/smf47.2023.46-54.
20. Бурмака І.А., Ворохобін І.І., Федоров Д.Б. Учет динамики судов при автоматическом выборе маневра расхождения уклонением одного судна и пассивным торможением другого // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 31. – С. 80-88. DOI: 10.31653/2306-5761.31.2021.80-88.
21. Сагін С.С., Сагін С.В. Забезпечення безпеки маневрування великотоннажних суден в стиснених портових водах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.

22. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Використання інтегрованих діагностичних моделей для оцінки експлуатаційних характеристик суднового пропульсивного комплексу // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 133-140. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.15.
23. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУОМА. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
24. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами судових дизелів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
25. Сагін С.С., Ворохобін І.І. Мінімізація ризику виникнення небезпеки морських подій під час навігаційних переходів суден морського транспорту // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 76-88.
26. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності судових енергетичних установок у водному середовищі // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
27. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37–43. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198.
28. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43.
29. Голіков В.А. Крупов І.В. Аналіз ефективності використання земснарядів в експлуатаційних умовах // Суднові енергетичні установки. – 2023. – Вип. 46. – С. 41-46. doi: 10.31653/smf46.2023.41-46
30. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35.
31. Кривий О.Ф., Міусов М.В., Кривий М.О., Математичне моделювання роботи судових стерн при різних режимах маневрування // Судноводіння. – 2023. – Вип. 34. – С. 93-114. doi: 10.31653/2306-5761.34.2023.93-114.
32. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ«ОМА». – С. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
33. Сагін С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств : науч. -техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ«ОМА». – С. 79-89.
34. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
35. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
36. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.

## REFERENCES

1. Levchenko O. Synthesis of vessels' options in dangerous situations taking into account time and resource restrictions in vessel CDSS. // Water transport. – 2021. – № 3(34). – P. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.

2. Tymochko O.I., Levchenko O.V., Rudenko V.M., Sitkov O.M. Use of hybrid robotic complex for inspection of marine oil and gas facilities // *Water transport*. – 2024. – Vol. 2(40). – P. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
3. Tymoshchuk O., Melnyk O. Analysis of the possibility of using the divergence maneuver by changing the course // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2023 – Vol.1(37). – P.96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
4. Sagin S.V., Sagin S.S., Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences *Water transport*. – 2023. – № 2(38). – C. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
5. Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M. Feature and requirements for navigational safety of navigation on inland waterways // *Water transport*. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
6. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnosis of reliability and economy of diesel engines of sea and river means of transport // *Ship power plants*. – 2023. – Vol. 46. – P. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
7. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33-42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
8. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants*. – 2022. – Vol. 45. – P. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
9. Tymoshchuk O., Daki O., Boyko O., Karadobriy T. Analytical Inspection of adaptive vessel control systems and ways of their construction // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2020. – Vol. 3(31). – P. 120-125. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
10. Vorokhobin I., Burmaka I., Kulakov M., Petrychenko O. A Method of electronic chart departmentisation under external control of vessels' passing in VTS areas // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2021. – Vol.32. – P.26-33. doi.org/10.31653/2306-5761.32.2021.26-33.
11. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
12. Sagin S.S., Sagin S.V. Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessels approaching // *Water Transport*. – 2024. – №. 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
13. Levinskyi M.V., Levinskyi V.M. Choosing the structure and parameters of vessel's course automatic control system under the influence of water-wave disturbances // *Automation of ship technical facilities*. – 2020. – Вып. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
14. Sagin S.V., Zablotskyi Yu.V. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // *Water transport*. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
15. Sagin S.V., Bondar S.A. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport *Water transport*. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 175-186. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
16. Sagin S.S., Sagin S.V. Using a hybrid system for coordinating the movement of sea vessels during their maneuvering in compressed waters // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – C. 208-220. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.24.
17. Vorokhobin I. Impact of the cross-track error distribution law on safe navigation in narrow waters // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2020. – Vol.30. – P.58-66. doi.org/10.31653/2306-5761.30.2020.58-66.
18. Shpylevsky V., Krupov I. Coordinates systems harmonization in the frontier districts of the Danube // *Shipping & Navigation*. – 2020. – № 30. – P. 152-163. doi: 10.31653/2306-5761.30.2020.152-163.
19. Krupov I. Analysis of Automatic Dredger Control Systems // *Ship power plants*. – 2023. – № 47. – P. 46-54. doi: 10.31653/smf47.2023.46-54.

20. Burmaka I., Vorokhobin I., Fedorov D. Account dynamics of ships at the automatic choice of manoeuvre of divergence by deviation of one ship and by the passive braking of the other // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2021. – Vol.31. – P.80-88. doi.org/10.31653/2306-5761.31.2021.80-88.
21. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – C. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
22. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Use of integrated diagnostic models to assess the operational characteristics of a ship's propulsion system // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – C. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
23. Poberezhniy R.V., Sagin S.V. Ensuring the environmental performance of diesel engines in river and sea transport vessels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
24. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. determination of optimal modes of exhaust gas control processes for marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – № 1(39). – P. 173–185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
25. Sagin S.S., Vorokhobin I.I. Minimizing the risk of maritime incidents during navigation passages of sea transport vessels // *Water transport*. – 2024. – Vol. 2(40). – P. 76-88.
26. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // *Water transport*. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
27. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37–43. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198.
28. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43.
29. Golikov V.A., Krupov I.V. Analysis of the Efficiency of Dredger Utilization in Operational Conditions // *Ship power plants*. – 2023. – № 46. – P. 41-46. doi: 10.31653/smf46.2023.41-46.
30. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35.
31. Kryvyi O.F., Miyusov M.V., Kryvyi M.O. Mathematical modelling of ship's rudders operation under various maneuvering modes // *Shipping & Navigation*. – 2023. – № 34. – P. 93-114. doi: 10.31653/2306-5761.34.2023.93-114.
32. Rusnak D.Y., Sagin S.V. Ensuring environmental requirements during ultrasonic desulfurization of hydrocarbon fuels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 40. – P. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
33. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Optimization of operating modes of the exhaust gas bypass system of marine medium-speed diesel engines // *Automation of ship facilities*. – 2019. – № 25. – P. 79-89.
34. Levchenko O.V., Hannoshyna I.M., Ostupchuk T.V. Information support system for decision-making processes on the bridge of a ship // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 24–27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
35. Levchenko O.V., Maranov O.V. The current state of research on predicting the manoeuvrability of ships and their hydrodynamics in confined waters // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 55–60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
36. Levchenko O.V., Maranov O.V. Integration of combined decision support systems to ensure navigational safety and optimize vessel traffic in port areas // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 99–108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.

**Krupov I.V.****CONDUCTING DREDGING OPERATIONS IN THE CASE OF A VARIABLE HYDROGRAPHIC SEAFLOOR LANDSCAPE**

*The presented study provides an explanation of the mechanisms by which natural processes can be utilized to predict seafloor topography changes in shallow waters under navigational conditions. The safety of navigation directly depends on the accuracy and timeliness of information regarding changes in the seafloor topography, as it is constantly affected by natural factors. In shallow waters, navigation channels, and river estuaries, such changes can significantly impact route accessibility and increase the risk of maritime incidents. This study presents methods for conducting dredging operations in the context of a dynamically changing hydrographic seafloor landscape, utilizing mathematical modeling and hydrometeorological data analysis. The proposed approach takes into account external factors such as wind, wave action, bottom currents, sedimentation, and seabed composition, allowing for improved accuracy in predicting seafloor changes. A key aspect of the research is the introduction of the «scale factor» concept, which considers the influence of various dynamic processes depending on spatial and temporal conditions. This enables the identification of significant and minor seafloor changes when generating Electronic Navigational Charts and ensures that navigators receive real-time updates on depth conditions. As part of the study, a seabed dynamics model was developed to predict sedimentation, erosion, and seabed structure changes over a specified period. Additionally, the research explores the integration of predictive data into electronic charting systems such as ECDIS and Inland ECDIS. Incorporating dynamic seabed updates into navigation systems will enhance fairway representation accuracy and improve maritime safety through timely updates on seafloor topography. The findings of this study can be applied in navigation, hydrography, port planning, and dredging operations management.*

**Keywords:** coastal waters, compressed water areas, dredgers vessels, maritime transport, navigation zone modeling, navigation, navigational obstacles, port waters, seabed landscape, shallow water, ship maneuvering, shipping safety, shipping.

*Стаття прийнята 16.03.2025*