

УДК 656.615.003.1:627.472

DOI 10.47049/2226-1893-2026-2-221-239

КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ВТРАТИ НАВІГАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНОПЛАВНОГО КАНАЛУ

А.В. Науменко

аспірант кафедри навігації і керування судном, капітан далекого плавання

ORCID <https://orcid.org/0009-0000-8025-2790>

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. Ефективність функціонування судноплавних каналів у дельтових системах значною мірою визначається здатністю підтримувати нормативні навігаційні характеристики в умовах постійного впливу процесів седиментації, гідрометеорологічних факторів та морфодинамічних змін русла. Погіршення навігаційних параметрів призводить до обмеження осадки суден, зниження пропускної спроможності водного шляху та зростання витрат на його утримання. У роботі розроблено комплексну модель оцінювання ризику втрати навігаційних характеристик судноплавного каналу. Запропонована модель базується на інтеграції факторного аналізу, ймовірного підходу, нечіткої логіки та динамічного моделювання ризиків. Введено інтегральний індекс ризику, який враховує вплив морфодинамічних, гідрологічних, седиментаційних та експлуатаційних факторів. Розроблено критерій прийняття рішень щодо необхідності проведення днопоглиблювальних робіт на основі допустимого рівня ризику. Отримані результати можуть бути використані під час створення систем підтримки прийняття рішень для управління експлуатаційним станом судноплавних каналів та планування днопоглиблювальних заходів.

Ключові слова: експлуатація флоту, морський транспорт, судноплавство, навігаційні характеристики, ризик, керування судном, математичне моделювання, управління операціями судна, системи підтримки прийняття рішень.

UDC 656.615.003.1:627.472

DOI 10.47049/2226-1893-2026-2-221-239

A COMPREHENSIVE MODEL FOR ASSESSING THE RISK OF LOSS OF NAVIGATIONAL CHARACTERISTICS IN A NAVIGABLE CHANNEL

Andrii Naumenko

Ph.D. candidate, Department of Navigation and Ship Control, Master mariner

Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine

© Науменко А.В., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

Abstract. *The operational efficiency of navigable channels in delta systems is largely determined by their ability to maintain standard navigational characteristics under the constant influence of sedimentation processes, hydrometeorological factors, and morphodynamic changes in the channel bed. A deterioration in navigational parameters leads to restrictions on vessel draft, a reduction in the waterway's capacity, and increased maintenance costs. This paper presents a comprehensive model for assessing the risk of loss of navigational characteristics in a navigable channel. The proposed model is based on the integration of factor analysis, a probabilistic approach, fuzzy logic, and dynamic risk modeling. An integrated risk index has been introduced that accounts for the influence of morphodynamic, hydrological, sedimentation, and operational factors. A decision-making criterion has been developed regarding the necessity of dredging operations based on an acceptable risk level. The results obtained can be used in the development of decision support systems for managing the operational condition of navigation channels and planning dredging operations.*

Keywords: *fleet operation, maritime transport, navigation, navigational characteristics, risk, ship control, mathematical modeling, vessel operations management, decision support systems.*

Вступ. Забезпечення гарантованих навігаційних характеристик судноплавних каналів є однією з ключових умов ефективного функціонування морської транспортної системи. Особливої актуальності ця проблема набуває для каналів, розташованих у дельтових та гирлових районах, де під впливом інтенсивних седиментаційних процесів відбувається постійна зміна параметрів русла. Накопичення наносів призводить до зменшення навігаційних глибин, обмеження допустимої осадки суден, зниження пропускної спроможності та збільшення експлуатаційних витрат на утримання водних шляхів.

Постановка проблеми. Традиційні підходи до планування днопоглиблювальних робіт переважно базуються на нормативних або календарних принципах і недостатньо враховують фактичний рівень ризику втрати експлуатаційної придатності каналу. У сучасних умовах виникає необхідність переходу до ризик-орієнтованого управління, яке дозволяє своєчасно виявляти небезпечні тенденції розвитку руслових процесів та приймати обґрунтовані рішення щодо проведення коригувальних заходів.

У сучасних дослідженнях судноплавних каналів значна увага приділяється оцінюванню ризиків, пов'язаних зі зміною навігаційних умов під впливом природних та антропогенних факторів. Робота [1] демонструє можливості врахування змінних гідрометеорологічних умов під час планування руху суден у складних акваторіях, що є важливим для прогнозування втрати навігаційної придатності каналів. Формуванню систем оцінювання навігаційних ризиків присвячені дослід-

ження [2] та [8], у яких запропоновано багатофакторні індексні моделі та байєсівські підходи до оцінювання ризику для інтелектуального судноплавства. Важливим чинником безпеки є людський фактор, зокрема когнітивне навантаження судноводіїв під час проходження обмежених ділянок, що досліджується у [3].

Стан навігаційного каналу значною мірою визначається гідродинамічними процесами та змінами навколишнього середовища. У роботі [4] показано вплив інженерних споруд на гідродинамічний режим прибережних акваторій, тоді як дослідження [5] присвячене моніторингу динамічних навігаційних каналів із використанням сучасних засобів спостереження. Додатково роботи [11] та [12] демонструють можливості використання AIS-даних для визначення характеристик навігаційних вод і встановлення меж зон безпечного судноплавства. Важливим джерелом ризику є також довгострокові морфодинамічні зміни русел і каналів під впливом антропогенних навантажень, що підтверджується результатами дослідження [15].

Окремий напрям становлять методи підтримки прийняття рішень та управління рухом суден у каналах. У роботах [6] та [13] розглядаються алгоритми автономної навігації й оптимізації проходження суден у складних каналних системах за умов невизначеності. Для підвищення безпеки використовуються сучасні методи розпізнавання судноплавних зон та навігаційних обмежень на основі штучного інтелекту [10]. Крім того, ризик-орієнтовані підходи до навігації в складних середовищах, запропоновані у [7], демонструють доцільність переходу від статичних критеріїв до динамічного оцінювання ризику в реальному часі. Дослідження [9] додатково показує можливості кількісної оцінки рідкісних, але потенційно катастрофічних подій за допомогою теорії екстремальних значень.

Аналіз наукових досліджень свідчить про активний розвиток методів оцінювання ризиків у транспортних та інженерних системах. Разом з тим, питання комплексного врахування стохастичних, нечітких та динамічних аспектів формування ризику втрати навігаційних характеристик судноплавних каналів залишається недостатньо дослідженим. У зв'язку з цим актуальним є розроблення інтегрованої математичної моделі, яка дозволяє поєднати різні підходи до оцінювання ризику та забезпечує підтримку прийняття управлінських рішень щодо експлуатації та утримання судноплавних каналів.

Мета дослідження. Сучасні наукові дослідження свідчать, що ризик втрати навігаційних характеристик судноплавного каналу є багатофакторним процесом, який визначається взаємодією гідродинамічних, морфологічних, експлуатаційних та навігаційних чинників, що обумовлює необхідність розроблення інтегрованої моделі оцінювання ризику, здатної враховувати зміни стану каналу, інтенсивність судноплавства та вплив зовнішнього середовища в умовах невизначеності.

Результати дослідження. Ефективність та надійність експлуатації судноплавного каналу в дельтових системах безпосередньо залежать від його функціональної здатності стабільно забезпечувати нормативні (паспортні) навігаційні параметри протягом заданого розрахункового періоду. Ключовим критерієм придатності водного шляху є безперервне підтримання гарантованих габаритів, що дозволяють безпечно здійснювати судноплавні операції.

Однак у процесі життєвого циклу каналу, під безперервним впливом інтенсивних седиментаційних процесів, нестаціонарних гідрометеорологічних факторів та екзогенних морфодинамічних змін, виникає стійка ймовірність деградації його русла. Ризик втрати навігаційних характеристик є комплексним деструктивним чинником, що призводить до низки негативних експлуатаційних наслідків:

- введення осадкових обмежень: вимушене зменшення допустимої осадки суден, що заходять у канал, і, як наслідок, недовантаження великотоннажного флоту (втрата вантажомісткості);

- деградація пропускної спроможності: зниження загальної інтенсивності суднопотоку, виникнення простоїв суден в очікуванні сприятливих гідрологічних умов (наприклад, припливів) або черги на проходження лімітуючих ділянок;

- зростання операційних витрат: різке збільшення фінансових та технічних витрат на утримання каналу через необхідність залучення додаткових потужностей днопоглиблювального флоту для екстреного усунення мілін.

Для прецизійної ідентифікації, прогнозування та кількісного оцінювання зазначеного деструктивного потенціалу в роботі пропонується застосування інтегральної ризик-орієнтованої моделі. Дана модель дозволяє перевести якісні описові характеристики руслових деформацій у площину чітких математичних метрик ризику, поєднуючи ймовірність настання несприятливих гідроморфологічних подій із масштабами їхніх економічних і навігаційних наслідків.

Загальна логіка запропонованої моделі оцінювання ризику втрати навігаційних характеристик судноплавного каналу базується на інтеграції кількох взаємопов'язаних підходів до аналізу ризиків. Модель поєднує факторний аналіз, ймовірнісне оцінювання, нечіткий висновок та динамічне моделювання, що дозволяє враховувати як стохастичний характер процесів замулення, так і невизначеність вихідної інформації. Концептуальну структуру моделі наведено на рис. 1.

Як видно з рис. 1, первинні фактори ризику трансформуються в інтегральний показник Z , на основі якого формуються результати окремих модулів оцінювання ризику. Подальша інтеграція результатів ймовірнісних, нечітких та динамічних моделей забезпечує визначення інтегрального рівня ризику та підтримку прийняття рішень щодо необхідності проведення днопоглиблювальних робіт і вибору відповідних управлінських заходів.

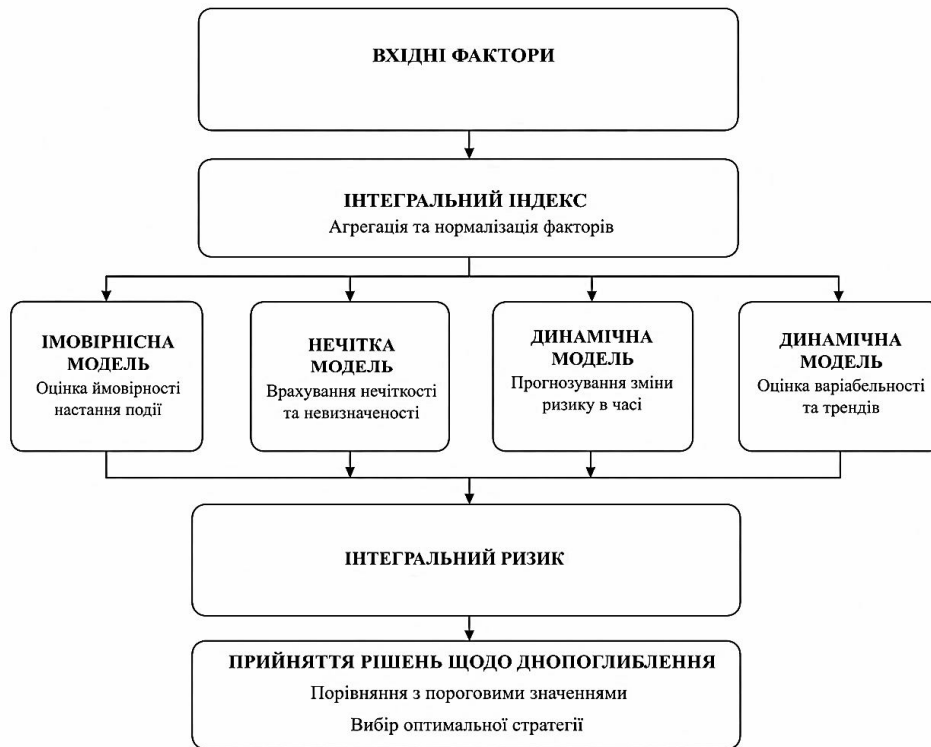


Рис. 1. Концептуальна структура інтегральної моделі оцінювання ризику втрати навігаційних характеристик судноплавного каналу

Отже введемо множину факторів ризику

$$\Omega = \{L, F, S, H, N\},$$

де L – морфодинамічний фактор;

F – флюїдодинамічний фактор;

S – інтенсивність седиментації;

H – гідрологічний режим;

N – навігаційне навантаження. У загальному випадку ризик є функцією

$$R = f(L, F, S, H, N).$$

Інтегральний індекс ризику.

Для оцінювання інтегрального впливу факторів введемо узагальнений показник

$$Z = w_1 L + w_2 F + w_3 S + w_4 H + w_5 N, \quad (1)$$

де $\sum_{i=1}^5 w_i = 1$, $w_i \in [0,1]$.

Вагові коефіцієнти можуть визначатися експертним методом, методом аналізу ієрархій (АНР) або DEMATEL.

Тоді інтегральний ризик визначається як $R = 1 - e^{-Z}$.

Для аналізу поведінки функції ризику розглянемо властивості експоненційної залежності $R = 1 - e^{-Z}$. Дана функція є монотонно зростаючою та обмеженою, що забезпечує коректну інтерпретацію ризику як нормованої величини в інтервалі $(0,1)$.

За малих значень інтегрального показника Z функція має майже лінійний характер, що дає змогу адекватно оцінювати незначні зміни ризику. Водночас зі зростанням Z спостерігається ефект насичення, коли приріст ризику уповільнюється та асимптотично наближається до 1. Це відповідає фізичному змісту процесу, оскільки навіть за значного зростання негативних факторів ризик не може перевищувати граничного значення.

На рис. 2 показано поведінку інтегрального ризику за різних значень параметра чутливості k . Збільшення k призводить до більш стрімкого зростання ризику, що відображає підвищену чутливість системи до змін факторів з виділенням зон низького, середнього та високого ризику.

Таким чином, використання експоненційної функції дозволяє врахувати нелінійний характер формування ризику, за якого сумарний вплив факторів не є адитивним у прямому сенсі, а має властивість згладжування та обмеження. Це особливо важливо для систем із високим рівнем невизначеності, де різке зростання окремих факторів не повинно призводити до некоректно завищених оцінок ризику.

Запропонована модель інтегрального ризику створює основу для подальшого використання в задачах управління станом навігаційного каналу. Зокрема, вона дозволяє оцінювати ефективність управлінських впливів через зміну параметра Z , що, у свою чергу, відображається на рівні ризику R , що відкриває можливість формування оптимізаційних задач, спрямованих на мінімізацію ризику за обмежених ресурсів.

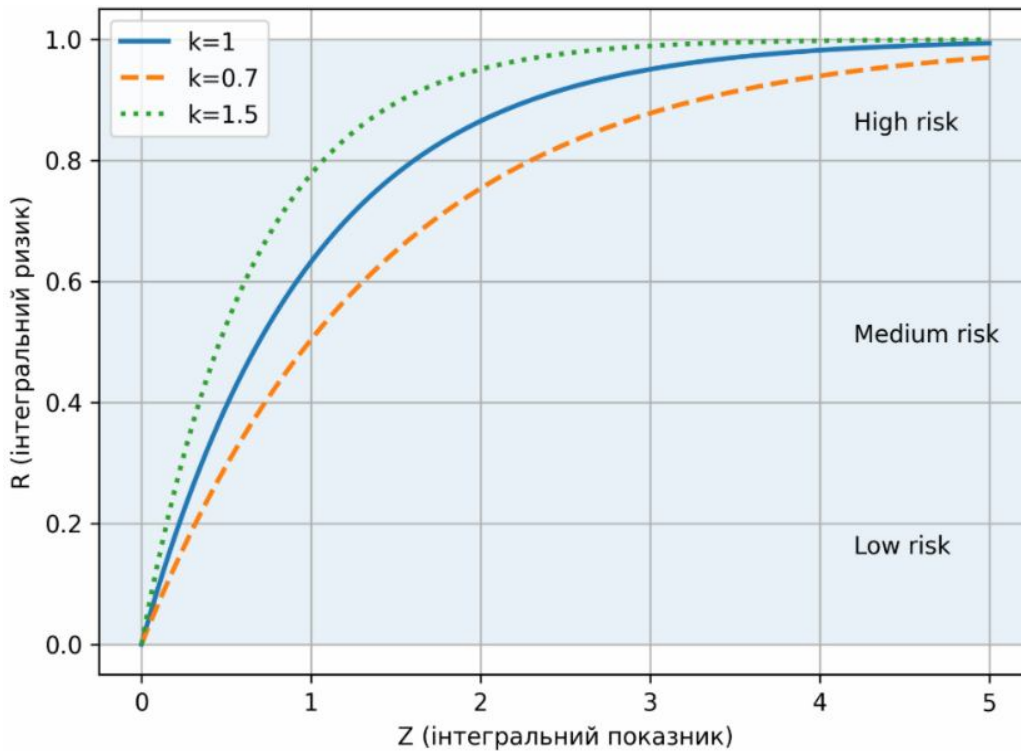


Рис. 2. Інтегральний ризик при різних значеннях параметра чутливості

Імовірнісна модель ризику.

Нехай P_f – ймовірність втрати нормативної глибини. Тоді

$$P_f = P(D < D_{cr}).$$

При нормальному законі розподілу $D \sim N(\mu, \sigma)$ маємо

$$P_f = \Phi\left(\frac{D_{cr} - \mu}{\sigma}\right), \quad (2)$$

де Φ – функція Лапласа.

Отримана ймовірнісна модель ризику дозволяє кількісно оцінити ймовірність втрати нормативної глибини каналу з урахуванням стохастичного характеру зміни його параметрів. Використання нормального закону розподілу забезпечує аналітичну зручність та можливість застосування апарату теорії надійності для оцінювання експлуатаційної придатності каналу.

Коефіцієнт запасу навігаційної стійкості.

Введемо новий показник

$$K_s = \frac{D - D_{cr}}{D_{cr}}, \quad (3)$$

де D – поточна глибина;

D_{cr} – критична глибина.

Тоді, якщо $K_s > 0$ то система працездатна, $K_s = 0$ – граничний стан.

$K_s < 0$ – непрацездатний стан.

Матриця ризиків.

Для оперативної класифікації стану судноплавного каналу використовується матриця ризиків, табл. 1, яка поєднує ймовірність виникнення небезпечної події з тяжкістю її наслідків.

Таблиця 1

Матриця ризиків

Імовірність	Наслідки	Рівень ризику	Діапазон
Низька	Незначні	Low	0-0,25
Низька	Значні	Medium	0,25-0,50
Середня	Значні	High	0,50-0,75
Висока	Критичні	Critical	0,75-1,00

Наведена матриця дозволяє швидко визначати рівень ризику та встановлювати пріоритетність управлінських заходів. Зі зростанням імовірності події та тяжкості наслідків рівень ризику переходить від допустимого до критичного, що потребує негайного реагування.

Нечітка модель ризику.

У реальних умовах функціонування навігаційного каналу значна частина параметрів має невизначений або якісний характер, що ускладнює їх точне кількісне описання. Зокрема, такі характеристики, як інтенсивність седиментації або рівень навігаційного ризику, часто оцінюються експертно з використанням лінгвістичних термінів. У зв'язку з цим доцільно застосувати апарат нечіткої логіки для формалізації процесу оцінювання ризиків.

Для опису рівня ризику введемо лінгвістичну змінну R , яка приймає значення з множини $\{Low, Medium, High, Critical\}$. Кожному з цих термів відповідає функція належності, що відображає ступінь відповідності конкретного значення ризику до відповідної категорії.

Функції належності $\mu_{Low}(R)$, $\mu_{Medium}(R)$, $\mu_{High}(R)$, $\mu_{Critical}(R)$ задають нечітке розбиття простору ризику та забезпечують плавний перехід між різними рівнями оцінювання.

Формування інтегральної оцінки ризику здійснюється на основі системи нечітких продукційних правил, які відображають експертні знання щодо взаємозв'язку між параметрами системи. Такі правила дозволяють врахувати нелінійний та слабо формалізований характер впливу факторів на рівень ризику.

Правила нечіткого висновку

IF

Sedimentation = High

AND

Depth = Low

THEN

Risk = Critical

IF

Sedimentation = Medium

AND

Depth = High

THEN

Risk = Medium

Запропонована система правил нечіткого висновку дозволяє формалізувати причинно-наслідкові зв'язки між станом каналу та рівнем ризику. Зокрема, поєднання високої інтенсивності седиментації та недостатньої глибини закономірно призводить до критичного рівня ризику, тоді як сприятливі умови функціонування системи забезпечують його зниження.

Для оцінювання ризику втрати експлуатаційної придатності судноплавного каналу в умовах невизначеності доцільно використовувати апарат нечіткої логіки. На відміну від класичних методів, нечіткий висновок дозволяє враховувати лінгвістичні оцінки параметрів середовища та експертні знання про взаємозв'язок між інтенсивністю замулення, навігаційною глибиною та рівнем ризику. На рис. 3 наведено структуру нечіткої системи оцінювання ризику судноплавного каналу.

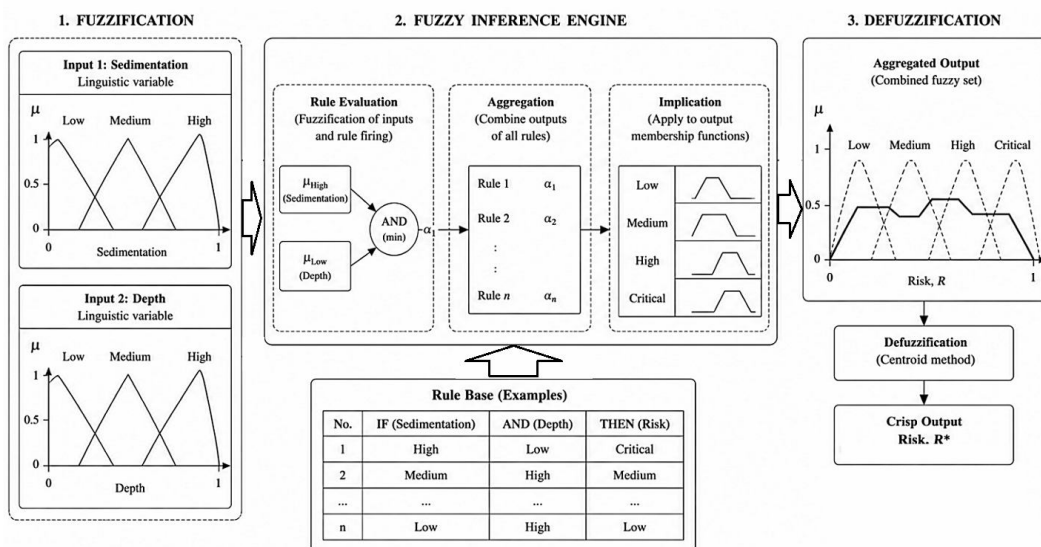


Рис. 3. Архітектура нечіткої системи оцінювання ризику експлуатації судноплавного каналу

Запропонована система складається з трьох основних етапів: фазифікації вхідних параметрів, нечіткого логічного висновку та дефазифікації результату. На етапі фазифікації значення показників седиментації та навігаційної глибини перетворюються у ступені належності до нечітких множин «низький», «середній» і «високий». Далі на основі бази правил формується інтегральна оцінка ризику, яка враховує одночасний вплив усіх факторів.

У результаті дефазифікації агрегованого нечіткого логічного висновку визначається чітке числове значення ризику R^* , яке є об'єктивним критерієм для підтримки управлінських рішень щодо доцільності проведення днопоглиблювальних робіт, визначення пріоритетності експлуатаційних заходів з утримання судноплавного каналу та довгострокового прогнозування навігаційної безпеки. Застосування зазначеного підходу забезпечує суттєве підвищення достовірності оцінювання ризиків за умов неповноти, нечіткості та інваріантності вихідної інформації.

Таким чином, інтеграція нечіткої моделі дозволяє об'єднати різнорідні кількісні та якісні фактори в межах єдиної системи оцінювання, що значно підвищує адекватність моделювання складних природно-технічних комплексів і дозволяє ефективно використовувати отримані результати в автоматизованих системах підтримки прийняття рішень (СППР) для динамічного управління станом навігаційних каналів.

Динамічний ризик.

На відміну від статичних підходів, у яких ризик розглядається як фіксована величина, у реальних умовах експлуатації навігаційного каналу він має динамічний характер і змінюється в часі під впливом як природних, так і керованих факторів. У зв'язку з цим доцільно розглядати ризик як функцію часу, що дозволяє аналізувати його еволюцію та прогнозувати критичні стани системи.

Зміна рівня ризику визначається балансом двох протилежно спрямованих процесів. З одного боку, накопичення наносів призводить до погіршення навігаційних умов і, відповідно, до зростання ризику. З іншого боку, виконання днопоглиблювальних робіт сприяє відновленню експлуатаційних характеристик каналу та зниженню ризиків. Формалізуючи зазначені процеси, отримаємо диференціальне рівняння

$$\frac{dR}{dt} = \lambda S - \mu M, \quad (4)$$

де λ – вплив замулення;

μ – ефективність днопоглиблення.

Тобто ризик зростає через седиментацію та зменшується після виконання днопоглиблювальних робіт.

Для аналізу ефективності управлінських заходів важливо дослідити часову динаміку ризику втрати навігаційних глибин під впливом процесів седиментації та днопоглиблення. Графічне представлення зміни ризику дозволяє визначити критичні моменти експлуатації каналу, оцінити доцільність проведення днопоглиблювальних робіт та обґрунтувати періодичність їх виконання. На рис. 4 наведено типову траєкторію розвитку ризику за різних сценаріїв управління.

Зі схеми видно, що за відсутності днопоглиблювальних заходів ризик $R(t)$ монотонно зростає внаслідок накопичення наносів та поступового зменшення навігаційної глибини. Після досягнення допустимого рівня ризику R_{adm} виникає необхідність реалізації коригувальних управлінських дій для запобігання переходу системи до критичного стану.

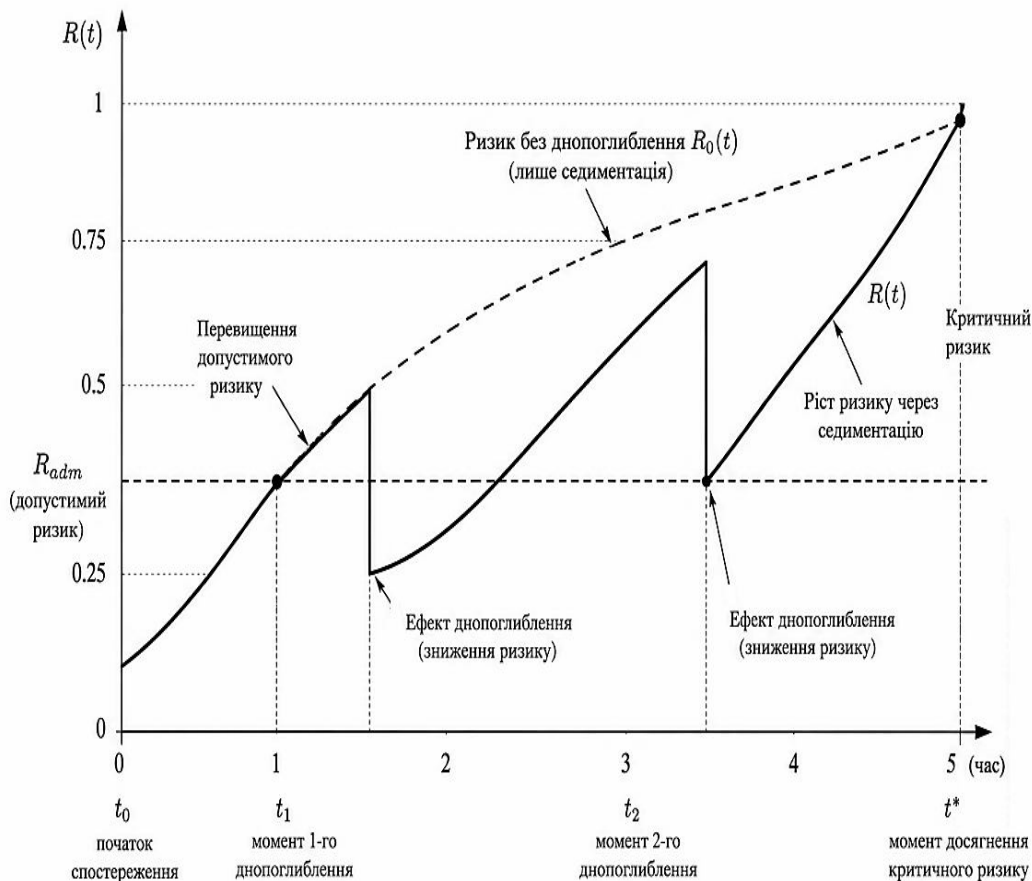


Рис. 4. Динаміка ризику втрати навігаційних глибин з урахуванням днопоглиблювальних робіт

Проведення днопоглиблювальних робіт у моменти t_1 та t_2 забезпечує суттєве зниження ризику та відновлення запасу навігаційної глибини, що подовжує період безпечної експлуатації каналу. Отримана залежність підтверджує доцільність ризик-орієнтованого планування днопоглиблення, за якого рішення приймаються не за фіксованим календарним графіком, а відповідно до фактичного стану каналу та прогнозованої динаміки ризику. Це дозволяє підвищити ефективність використання ресурсів і забезпечити необхідний рівень навігаційної безпеки.

Математична модель динаміки ризику втрати навігаційних глибин.

Функціонування судноплавного каналу в умовах дельтових систем характеризується динамічною зміною ризику втрати навігаційних глибин, що обумовлено взаємодією процесів замулення та керованих технічних впливів. Для формалізації цього процесу вводиться інтегральний показник ризику $R(t)$, динаміка якого описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{dR(t)}{dt} = \lambda S(t) - \mu M(t) - \gamma R(t), \quad (5)$$

де $S(t)$ – інтенсивність замулення каналу;

$M(t)$ – інтенсивність днопоглиблювальних робіт;

λ – коефіцієнт впливу процесів седиментації на зростання ризику;

μ – коефіцієнт ефективності днопоглиблення,

γ – коефіцієнт природного відновлення системи.

Інтенсивність замулення формується під впливом природних факторів і може бути апроксимована лінійною моделлю

$$S(t) = k_1 Q(t) + k_2 H(t) + k_3 W(t) + k_4 L(t), \quad (6)$$

де $Q(t)$ – твердий стік наносів;

$H(t)$ – гідрологічний режим;

$W(t)$ – хвильові процеси;

$L(t)$ – морфодинамічні характеристики;

k_i – вагові коефіцієнти впливу факторів.

У разі відсутності днопоглиблення ($M(t) = 0$) рішення рівняння (5.1) набуває вигляду

$$R_0(t) = R(0) + \lambda \int_0^t S(\tau) d\tau, \quad (7)$$

що описує монотонне накопичення ризику внаслідок седиментаційних процесів.

З урахуванням днопоглиблення загальний розв'язок моделі має вигляд

$$R(t) = R(0) + \int_0^t [\lambda S(\tau) - \mu M(\tau)] d\tau. \quad (8)$$

При цьому днопоглиблювальні роботи доцільно розглядати як дискретні керуючі впливи

$$M(t) = \sum_{i=1}^N M_i \delta(t - t_i), \quad (9)$$

де t_i – моменти виконання днопоглиблення;

M_i – інтенсивність або обсяг відповідних робіт;

δ – дельта-функція Дірака.

З урахуванням цього модель (8) може бути представлена у вигляді

$$R(t) = R(0) + \int_0^t \lambda S(\tau) d\tau - \sum_{t_i < t} \mu M_i. \quad (10)$$

Експлуатаційна придатність каналу визначається критерієм допустимого ризику: $R(t) \leq R_{adm}$, де R_{adm} – гранично допустимий рівень ризику.

Таким чином, моменти активації днопоглиблення визначаються умовою $R(t_i) \geq R_{adm}$ що дозволяє інтерпретувати систему як гібридну динамічну модель з безперервною еволюцією ризику та дискретними керуючими впливами.

Запропонована модель формує теоретичну основу для оптимізації режимів експлуатації судноплавного каналу, зокрема, для визначення раціональних моментів і обсягів днопоглиблення з урахуванням мінімізації ризику та експлуатаційних витрат.

Отже для забезпечення безпечної експлуатації навігаційного каналу рівень інтегрального ризику не повинен перевищувати допустимого значення R_{adm} , що формалізується умовою

$$U = \begin{cases} 1, & R(t) \geq R_{adm}, \\ 0, & R(t) < R_{adm}. \end{cases} \quad (11)$$

де $U = 1$ – активувати днопоглиблення;

$U = 0$ – продовжити експлуатацію.

З урахуванням раніше введеної експоненційної залежності $R = 1 - e^{-Z}$ отримуємо аналітичний критерій управління у вигляді $1 - e^{-Z} \leq R_{adm}$, який після перетворення дозволяє визначити гранично допустиме значення інтегрального показника факторів ризику $Z \leq -\ln(1 - R_{adm})$. Запропонований критерій має

важливе практичне значення, оскільки встановлює чітке кількісне обмеження на стан системи та може бути безпосередньо використаний для прийняття управлінських рішень щодо забезпечення нормативних умов експлуатації каналу.

У підсумку розроблено математичну модель оцінювання ризику втрати навігаційних характеристик судноплавного каналу. Запропоновано інтегральний індекс ризику, імовірнісну модель відмови каналу за критерієм втрати нормативної глибини, коефіцієнт запасу навігаційної стійкості та критерій допустимого ризику експлуатації. Розроблена модель дозволяє кількісно оцінювати поточний стан каналу, прогнозувати розвиток небезпечних процесів та формувати обґрунтовані управлінські рішення щодо проведення днопоглиблювальних робіт.

Обговорення результатів. Запропонований підхід до оцінювання ризику втрати навігаційних характеристик судноплавного каналу, на відміну від традиційних нормативних методик, базується на комплексному врахуванні динаміки взаємопов'язаних факторів та невизначеності середовища, а не лише на фіксованих граничних параметрах русла. Впровадження інтегрального критерію оцінювання дозволяє узагальнити різноманітні дані, забезпечуючи перехід від реактивного до превентивного управління станом суднового ходу за рахунок раннього виявлення тенденцій до погіршення умов навігації. Застосування апарату нечіткої логіки в межах динамічної моделі вирішує проблему дефіциту та якісного характеру вхідної інформації про стохастичні гідрологічні процеси, що уможливорює точне прогнозування рівня ризику в часі та аналіз ефективності альтернативних сценаріїв днопоглиблення. Практична цінність результатів полягає у формуванні ризик-орієнтованого підґрунтя для інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, що сприяє оптимізації витрат на утримання водних шляхів та мінімізації ймовірності введення навігаційних обмежень. Водночас подальший розвиток дослідження потребує ширшої апробації моделі на емпіричних даних конкретних об'єктів. Перспективним напрямом є інтеграція гідрографічного моніторингу, даних дистанційного зондування Землі та методів машинного навчання для підвищення точності прогнозування замулення та переходу до адаптивного управління ризиками в режимі реального часу.

Висновки. У статті розроблено комплексну модель оцінювання ризику втрати навігаційних характеристик судноплавного каналу, яка поєднує факторний аналіз, імовірнісний підхід, апарат нечіткої логіки та динамічне моделювання процесів деградації навігаційних параметрів.

Запропоновано інтегральний показник ризику, що враховує вплив морфодинамічних, гідрологічних, седиментаційних та експлуатаційних факторів. Розроблено імовірнісну модель оцінювання втрати нормативної глибини каналу, введено коефіцієнт запасу навігаційної стійкості та сформовано матрицю класифікації рівнів ризику. Для врахування невизначеності вихідної інформації

запропоновано нечітку модель оцінювання ризику, яка дозволяє інтегрувати кількісні параметри та експертні знання в єдину систему підтримки прийняття рішень. Розроблена динамічна модель забезпечує прогнозування зміни ризику в часі з урахуванням процесів замулення та виконання днопоглиблювальних робіт.

Отримано критерій управління експлуатаційним станом судноплавного каналу на основі допустимого рівня ризику, що дозволяє визначати раціональні моменти проведення днопоглиблювальних заходів. Практична цінність роботи полягає у можливості використання запропонованих моделей у складі автоматизованих систем підтримки прийняття рішень для управління навігаційними каналами та підвищення ефективності використання ресурсів днопоглиблювального флоту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang, Z., Mu, D., Zhao, Y., Liang, X., & Fan, Y. (2026). Dynamics aware spatio-temporal path planning for USV in reef-island waters under time-varying environmental disturbances. *Ocean Engineering*, 362, 126360. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.126360>
2. Zhang, W., Ma, X., & Zhang, Y. (2025). Research on navigation risk assessment index system of intelligent ships. *Ocean Engineering*, 322, 120435. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120435>
3. Guan, H., Xu, Y., Li, L., Deng, J., Ma, W., Gong, X., & Zhang, T. (2025). A novel attention mechanism-based multi-branch long short-term memory network model for mental workload recognition of crew in tunnel navigation. *Ocean Engineering*, 339, 122141. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122141>
4. Wang, P., Zhou, J., Zheng, K., Jin, X., Chan, N.W., Tan, M.L., Lin, X., Wu, J., Jim, C.Y., Johnson, V.C., & Zhang, F. (2025). Impacts of nearshore photovoltaic installation on mariculture and navigation based on the MIKE21 hydrodynamic model. *Journal of Sea Research*, 209, 102651. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2025.102651/>
5. Medina, R., Marino-Tapia, I., Osorio, A., Davidson, M., & Martin, F. (2007). Management of dynamic navigational channels using video techniques. *Coastal Engineering*, 54(6-7), 523-537. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.01.008>.

6. Liu, X., He, Y., Zhang, K., Mou, J., Zhang, K., & Zhao, X. (2025). Research on the decision-making method for autonomous navigation for the ocean-going ship in the ships' routeing waters. *Ocean Engineering*, 323, 120641. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120641>.
7. O'Reilly, G. J., Shahnazaryan, D., Dubini, P., Brunesi, E., Rosti, A., Dacarro, F., Gotti, A., Silvestri, D., Mascetti, S., Ducci, M., Ciucci, M., & Marino, A. (2023). Risk-aware navigation in industrial plants at risk of NaTech accidents. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 88, 103620. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103620>.
8. Zhang, W., Zhang, Y., & Zhang, C. (2024). Navigation risk assessment of intelligent ships based on DS-Fuzzy weighted distance Bayesian network. *Ocean Engineering*, 313, 119452. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119452>.
9. Chen, X., Zhou, H., Li, M., Grifoll, M., Zhou, Y., Liu, J., & Zheng, P. (2026). Quantifying ship-bridge collision risk through extreme value theory: A new methodological framework. *Ocean Engineering*, 347, 124023. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.124023>.
10. Li, W., Liao, M., & Zou, W. (2025). A progressive segmentation network for navigable areas with semantic-spatial information flow. *Expert Systems With Applications*, 261, 125465. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125465>.
11. He, Z., Li, S., Wang, S., & Zhuang, Z. (2021). Mining navigable water current information from ship-based big automated identification system data. *Ocean Engineering*, 242, 110076. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110076>.
12. Zuo, W., Liu, Z., Zhuang, Y., Wan, C., & Shu, Y. (2026). A data-driven approach for determining navigation waters influenced by bridges – A framework and a case study. *Ocean Engineering*, 352, 124509. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124509>.
13. Huang, C., Wang, S., Zheng, J., Chen, X., & Zhou, J. (2025). Ship formation scheduling optimization for the multi-compound channel with deterministic and uncertain arrivals. *Ocean Engineering*, 342, 122815. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122815>.
14. Lin, M., Bakhsheshian, J., Strickland, B., Rennert, R.C., Chu, R.M., Chaichana, K.L., & Zada, G. (2019). Exoscopic resection of atrial intraventricular meningiomas using a navigation-assisted channel-based transsulcal approach: Case series and literature review. *Journal of Clinical Neuroscience*, 71, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2019.10.017>.

15. Brenna, A., Bizzi, S., & Surian, N. (2023). How multiple anthropic pressures may lead to unplanned channel patterns: Insights from the evolutionary trajectory of the Po River (Italy). *CATENA*, 234, 107598. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107598>.

REFERENCES

1. Wang, Z., Mu, D., Zhao, Y., Liang, X., & Fan, Y. (2026). Dynamics aware spatio-temporal path planning for USV in reef-island waters under time-varying environmental disturbances. *Ocean Engineering*, 362, 126360. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.126360>.
2. Zhang, W., Ma, X., & Zhang, Y. (2025). Research on navigation risk assessment index system of intelligent ships. *Ocean Engineering*, 322, 120435. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120435>.
3. Guan, H., Xu, Y., Li, L., Deng, J., Ma, W., Gong, X., & Zhang, T. (2025). A novel attention mechanism-based multi-branch long short-term memory network model for mental workload recognition of crew in tunnel navigation. *Ocean Engineering*, 339, 122141. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122141>.
4. Wang, P., Zhou, J., Zheng, K., Jin, X., Chan, N. W., Tan, M. L., Lin, X., Wu, J., Jim, C.Y., Johnson, V.C., & Zhang, F. (2025). Impacts of nearshore photovoltaic installation on mariculture and navigation based on the MIKE21 hydrodynamic model. *Journal of Sea Research*, 209, 102651. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2025.102651>.
5. Medina, R., Marino-Tapia, I., Osorio, A., Davidson, M., & Martin, F. (2007). Management of dynamic navigational channels using video techniques. *Coastal Engineering*, 54(6-7), 523-537. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.01.008>.
6. Liu, X., He, Y., Zhang, K., Mou, J., Zhang, K., & Zhao, X. (2025). Research on the decision-making method for autonomous navigation for the ocean-going ship in the ships' routeing waters. *Ocean Engineering*, 323, 120641. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120641>.
7. O'Reilly, G. J., Shahnazaryan, D., Dubini, P., Brunesi, E., Rosti, A., Dacarro, F., Gotti, A., Silvestri, D., Mascetti, S., Ducci, M., Ciucci, M., & Marino, A. (2023). Risk-aware navigation in industrial plants at risk of NaTech accidents. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 88, 103620. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103620>.

8. Zhang, W., Zhang, Y., & Zhang, C. (2024). Navigation risk assessment of intelligent ships based on DS-Fuzzy weighted distance Bayesian network. *Ocean Engineering*, 313, 119452. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119452>
9. Chen, X., Zhou, H., Li, M., Grifoll, M., Zhou, Y., Liu, J., & Zheng, P. (2026). Quantifying ship-bridge collision risk through extreme value theory: A new methodological framework. *Ocean Engineering*, 347, 124023. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.124023>.
10. Li, W., Liao, M., & Zou, W. (2025). A progressive segmentation network for navigable areas with semantic-spatial information flow. *Expert Systems With Applications*, 261, 125465. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125465>
11. He, Z., Li, S., Wang, S., & Zhuang, Z. (2021). Mining navigable water current information from ship-based big automated identification system data. *Ocean Engineering*, 242, 110076. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110076>.
12. Zuo, W., Liu, Z., Zhuang, Y., Wan, C., & Shu, Y. (2026). A data-driven approach for determining navigation waters influenced by bridges – A framework and a case study. *Ocean Engineering*, 352, 124509. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124509>.
13. Huang, C., Wang, S., Zheng, J., Chen, X., & Zhou, J. (2025). Ship formation scheduling optimization for the multi-compound channel with deterministic and uncertain arrivals. *Ocean Engineering*, 342, 122815. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122815>.
14. Lin, M., Bakhsheshian, J., Strickland, B., Rennert, R.C., Chu, R.M., Chaichana, K.L., & Zada, G. (2019). Exoscopic resection of atrial intraventricular meningiomas using a navigation-assisted channel-based trans-sulcal approach: Case series and literature review. *Journal of Clinical Neuroscience*, 71, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2019.10.017>.
15. Brenna, A., Bizzi, S., & Surian, N. (2023). How multiple anthropic pressures may lead to unplanned channel patterns: Insights from the evolutionary trajectory of the Po River (Italy). *CATENA*, 234, 107598. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107598>.

Дата надходження статті: 10.06.2026

Дата прийняття статті: 12.06.2026

Дата публікації статті: 16.06.2026