

УДК 504

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ЕКОСИСТЕМНИМИ РИЗИКАМИ МОРЯ

В. М. Коморін

НДУ «Український науковий центр екології моря»,
Французький бульвар, 89, 65009, Одеса, Україна, vkomorin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4847-0496>

У статті представлено результати дослідження, спрямованого на розробку та верифікацію математичної моделі управління екосистемними ризиками морських акваторій. Основною метою дослідження є створення ефективного інструменту для оцінки та управління ризиками, що виникають внаслідок антропогенного впливу, змін клімату та інших природних факторів. Запропонована модель базується на існуючій теорії управління екосистемними ризиками моря та враховує взаємозв'язки між природними і антропогенними факторами, станом морських екосистем, їхньою вразливістю та екосистемними послугами.

Модель використовує математичні методи, зокрема диференціальні рівняння, статистичні аналізи, імітаційне моделювання та мережевий аналіз, що дозволяє створити детальні моделі, які відображають динаміку морських екосистем та їхню реакцію на зовнішні впливи. Для верифікації моделі були проведені чисельні експерименти, які демонструють її здатність прогнозувати зміни у стані морських екосистем під впливом різних факторів. Результати дослідження показують, що запропонована модель може бути ефективним інструментом для оптимізації стратегій управління, мінімізації екосистемних ризиків та підвищення стійкості морських екосистем.

Практичні рекомендації, розроблені на основі результатів дослідження, включають стратегії попередження, мінімізації та адаптації до потенційних загроз, враховуючи специфіку кожного регіону та екосистеми. Запропонована модель допомагає оптимізувати управлінські рішення, знижуючи ризики та покращуючи стан морських екосистем в умовах антропогенного впливу та змін клімату. Вона є надійним інструментом для забезпечення стійкості та збереження морських екосистем. Цей підхід дозволяє забезпечити науково обгрунтоване управління ризиками, що підвищує стійкість морських екосистем та їх збереження для майбутніх поколінь.

Модель також враховує ключові фактори впливу на морські екосистеми, включаючи біологічне різноманіття, якість води, промислове рибальство, туризм та рекреацію, і дозволяє оцінювати ефективність різних управлінських рішень у контексті цих факторів. Застосування цієї моделі в практиці управління екосистемами дозволяє приймати більш обгрунтовані рішення щодо охорони та збереження морських ресурсів, сприяючи їх стійкому розвитку та забезпеченню екосистемних послуг, що мають критичне значення для суспільства.

Ключові слова: екосистемні ризики; управління ризиками; морські акваторії; екологічні соціально-економічні системи; стійкість морських екосистем; математична модель; стратегії управління.

1 ВСТУП

Морські екосистеми є важливою складовою природного середовища, що забезпечує численні екосистемні послуги, які мають критичне значення для людства. Вони сприяють регуляції клімату, підтримці біорізноманіття, забезпеченню рибних ресурсів та виконують важливі рекреаційні функції. Водночас, ці екосистеми піддаються значним ризикам через антропогенний вплив, зміни клімату та інші природні фактори. Основні проблеми, що

виникають внаслідок цих впливів, включають евтрофікацію та її наслідки, втрату біорізноманіття та забруднення вод [1-3]. Ці негативні явища можуть мати довгострокові наслідки для екологічного стану морських вод та економічного благополуччя суспільства [4].

З огляду на зазначені виклики, ефективне управління екосистемними ризиками є надзвичайно важливим завданням. Для цього необхідні сучасні методи та інструменти, що дозволяють не лише оцінювати поточний стан

морських екосистем, але й прогнозувати їх майбутній розвиток під впливом різних факторів. У контексті загострення антропогенного впливу, змін клімату та стихійних лих, завдання, пов'язані з управлінням екосистемними ризиками морських акваторій, набувають особливої важливості.

У статті "Теоретико-методологічні аспекти управління екосистемними ризиками моря" [5] представлено сучасні теоретико-методологічні основи цього наукового напрямку, які є базою для подальших досліджень у цій сфері.

Метою даного дослідження є розробка та верифікація математичної моделі для управління екосистемними ризиками моря на основі існуючої теорії, представленої у публікації [5]. Використання такої моделі надасть можливість оптимізувати стратегії управління, мінімізуючи екосистемні ризики та покращуючи стійкість морських екосистем.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

1. Створення математичної моделі управління екосистемними ризиками моря на основі існуючої теорії.
2. Верифікація математичної моделі шляхом чисельних експериментів з використанням існуючих оцінок стану морських екосистем України.
3. Оцінка ефективності моделі та розробка рекомендацій щодо її практичного застосування для оптимізації управлінських рішень у сфері охорони морських екосистем.

У роботі [5] розглядаються основні терміни та принципи, створена концептуальна модель теорії управління екосистемними ризиками моря, здійснено порівняльний аналіз існуючих методологій та стратегій, а також розроблені наукові гіпотези для підвищення теоретичних знань у цій сфері. Здійснено порівняльний аналіз різних методологій та стратегій управління екосистемними ризиками, що визначило найефективніші з них на окремих етапах створення оптимальної стратегії управління екосистемними ризиками.

Таким чином, дана стаття спрямована на представлення результатів дослідження, яке полягає у розробці та верифікації математичної моделі для управління екосистемними ризиками моря на основі існуючої теорії. Це дозволить підвищити ефективність заходів з охорони та збереження морських екосистем, сприяючи їх сталому розвитку та стійкості.

2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Методологічний підхід до управління екосистемними ризиками

Методологічний підхід до управління екосистемними ризиками морських акваторій ґрунтується на використанні математичних моделей, які дозволяють точно оцінити та прогнозувати вплив різних факторів на стан морських екосистем. Основою цього підходу є концептуальна модель управління екосистемними ризиками моря [5]. Ця модель враховує взаємозв'язки між природними та антропогенними факторами, станом морських екосистем, їхньою вразливістю та екосистемними послугами.

Центральним елементом цього підходу є математичне моделювання, яке використовується для створення моделей, що відображають динаміку морських екосистем і їх взаємодію з зовнішніми факторами. Математичні моделі дозволяють враховувати фізичні, біологічні, хімічні та соціально-економічні аспекти, що дозволяє всебічно оцінити комплексний вплив на екосистему. Моделювання здійснюється за допомогою диференціальних рівнянь, статистичних методів, імітаційного моделювання та мережевого аналізу.

Диференціальні рівняння є ключовим інструментом для опису динамічних процесів в екосистемах, таких як зміни популяцій морських організмів, розповсюдження забруднюючих речовин та інші екологічні процеси. Використання диференціальних рівнянь дозволяє створити детальні моделі, що відображають часову еволюцію екосистеми під впливом різних факторів [4, 6].

Статистичні методи застосовуються для аналізу наявних даних про стан морських екосистем, виявлення тенденцій та встановлення кореляцій між різними показниками. Це дозволяє ідентифікувати ключові фактори, що впливають на екосистему, та оцінити їхній відносний вплив. Статистичний аналіз також використовується для валідації математичних моделей та перевірки їх відповідності реальним даним.

Імітаційне моделювання дозволяє проводити чисельні експерименти, симулюючи різні сценарії впливу на екосистему та оцінюючи результати впровадження різних стратегій управління ризиками. Це забезпечує можливість прогнозувати наслідки управлінських рішень та

оптимізувати стратегії для мінімізації екосистемних ризиків.

Мережевий аналіз використовується для вивчення взаємозв'язків між компонентами екосистеми, зокрема харчових ланцюгів, потоків енергії та речовин. Цей підхід дозволяє виявити ключові вузли та зв'язки в екосистемі, які є критичними для її стабільності та функціонування. Мережевий аналіз також допомагає оцінити вразливість екосистеми до різних типів впливу та розробити стратегії для підвищення її стійкості.

Моніторинг та оцінка стану екосистем є невід'ємною складовою методологічного підходу. Постійний моніторинг гідрофізичних, гідрохімічних та біологічних показників дозволяє оцінювати стан морського середовища, виявляти зміни, встановлювати тенденції та оцінювати ефективність заходів управління ризиками. Ідентифікація та оцінка ризиків здійснюється на основі зібраних даних та математичних моделей, що дозволяє кількісно оцінювати ризики за допомогою статистичних аналізів та прогнозування можливих сценаріїв.

Розробка стратегій управління ризиками включає створення заходів з попередження, мінімізації та адаптації до потенційних загроз. Ці стратегії враховують специфіку кожного регіону та екосистеми, а також включають адаптивне управління, що передбачає гнучке реагування на зміни в стані екосистеми та внесення коректив на основі нових даних. Постійна оцінка ефективності впроваджених заходів та коригування стратегій на основі результатів моніторингу забезпечує актуальність та ефективність управління екосистемними ризиками.

Загалом, методологічний підхід до управління екосистемними ризиками морських акваторій спрямований на забезпечення науково обґрунтованого управління ризиками, що дозволяє підвищити стійкість морських екосистем та забезпечити їх збереження для майбутніх поколінь.

2.2 Математична модель екосистемних ризиків

В цьому підрозділі запропонована спрощена система рівнянь, яка відображає взаємозалежність між такими компонентами як морська екосистема, система управління екосистемними ризиками, фактори впливу на екосистему, користувачі екосистемних послуг та екосистемні послуги.

Введемо наступні змінні:

E – інтегральний показник стану морської екосистеми;

F – інтегральний показник впливу на екосистему зовнішніх факторів;

I – інтегральний показник екосистемних послуг;

S – показник ефективності системи управління екосистемними ризиками;

St – показник користувачів екосистемних послуг;

M – показник рівня ефективності системи моніторингу.

Розглянемо більш детально показники та їх можливі визначення для морської екосистеми.

Пропонуємо такі інтегральні показники нашої моделі як показник стану морської екосистеми, показник стану екосистемних послуг та показник впливу користувачів екосистемних послуг виразити через відповідні складові індексу здоров'я океану, що оцінює стан морського середовища та його здатність підтримувати різноманітні форми життя [7].

Загалом Індекс здоров'я океану обчислюється на основі 10 цілей, які відображають людське використання океанів та стан морських екосистем:

1. **Біологічне різноманіття** – збереження та зміцнення морського біологічного різноманіття.
2. **Чисті води** – забезпечення чистих морських вод, що не впливають негативно на інші цілі.
3. **Товарні ресурси** – забезпечення використання та вилову морських ресурсів у сталій манері.
4. **Морепродукти** – забезпечення стійкого вилову морепродуктів та споживання.
5. **Карбонівий складник** – збереження біологічного вуглецю в морському середовищі.
6. **Туризм та рекреація** – підтримка туризму та рекреації, що поліпшують досвід людей.
7. **Береговий захист** – забезпечення природного захисту від берегової ерозії та інших природних стихій.
8. **Морська мережа живлення** – підтримка рівноваги в харчових ланцюгах морського життя.
9. **Особливі місця в морі** – збереження особливих місць з природними, культурними чи історичними цінностями.
10. **Живучість спільнот** – підтримка стійких і продуктивних морських спільнот, які здатні пристосуватися до змін.

В розумінні нашої моделі, частина цілей

відповідає компоненті показників стану морської екосистеми, частина – показників, що характеризують екосистемні послуги та їх користувачів (див. табл. 1). Наприклад, інтегральний показник стану морської екосистеми враховує ряд різних показників, включаючи біологічне різноманіття, якість води, доступ до морських ресурсів та стійкість екосистеми.

Таблиця 1 – Співставлення складових моделі управління екосистемними ризиками моря із цілями та підцілями моделі для розрахунку індексу здоров'я океану відповідно до методики [7]

Table 1 – Co-establishment of the components of the marine ecosystem risk management model with the goals and sub-targets of the model to calculate the ocean health index according to the methodology [7]

Складова моделі	Ціль / підціль
E – показник стану морської екосистеми-	Біорізноманіття (BD): Характеристика оселищ (HAB); Характеристика видів (SPP)
	Зберігання вуглецю (CS)
	Якість води (CW)
I – показник стану екосистемних послуг	Використання продукції, яка видобуваються з морських рослин та тварин
	Туризм і відпочинок
	Збереження культурної спадщини
	Збереження видів, занесених в червону книгу
	Охорона та відновлення природоохоронних акваторій та територій
St – показник користувачів екосистемних послуг	Промислове рибальство (FIS); Марикультура (MAR)
	Любительська та спортивна риболовля (AO)
	Роль природних формувань, які захищають від руйнування морське узбережжя (CP)
St – показник користувачів екосистемних послуг	Прибережне життя і економіка (LE): Заробіток (LIV) Економіка (ECO)

Величина кожної цілі та підцілі розподіляється на шкалі від 0 до 100, де 100 відображає кращий можливий стан для даної цілі.

Показник індексу відповідної складової для кожного регіону (I_{reg}) обчислюється як зважені середні всіх оцінок (G) для кожної цілі (g), таким чином:

$$I_{reg}^i = \sum_{g=1}^N w_g G_g / \sum_{g=1}^N w_g,$$

де w_g - це вага для кожної цілі.

Для глобальної оцінки, ваги цілей (w_g) приймалися рівними. В ідеалі, ці ваги повинні бути виведені емпірично. Деталі можуть варіюватися від регіону до регіону і від часу до часу, в залежності від наявних даних, наукових знань та методологічних змін. Для отримання найновішої та найбільш детальної інформації про специфіку розрахунку.

Бал цілі (G) є середнім між поточним станом (x) та очікуваним станом у майбутньому ($x^{^F}$):

$$G = (x + x^{^F}) / 2.$$

Поточний стан (x) - це стан цілі відносно до контрольної точки (X_R):

$$x_i = X / X_R.$$

X_R визначається відповідно до контексту (наприклад, фонові або історичні значення, відомі або встановлені цілі).

Очікуваний стан цілі ($x^{^F}$) залежить від поточного стану (x), недавніх тенденцій (T), поточних тисків (p), та стійкості (r) до цих тисків:

$$x^{^F} = [1 + \beta T + (1 - \beta) (r - p)] x.$$

Тут β (відповідно до [7] β прийнято 0.67) відображає важливість тренду порівняно зі стійкістю та тиском.

Міри тиску та стійкості допомагають зрозуміти очікуваний стан, враховуючи інформацію за рамками недавніх тенденцій. Такі міри можуть відображати кумулятивні ефекти, які ще не проявлені в трендах, або вплив поточних рівнів стійкості та тиску на майбутній стан.

Оцінка тиску, позначена як p , відображає сумарний тиск, який впливає на ціль і негативно впливає на значення її оцінки. Оцінки тиску відрізняються в межах від 0 до 1 і розраховуються для кожного регіону та цілі, і включають як екологічні (pE), так і соціальні тиски (pS). Вони обчислюються за формулою

$$p = \gamma * pE + (1 - \gamma) * pS.$$

Параметр γ являє собою відносну вагу екологічного та соціального тиску, яка дорівнює 0.5 для глобальної оцінки. У більшості цілей на глобальному рівні немає чітких доказів на

користь нерівномірного зважування екологічного та соціального тиску. На регіональному або місцевому масштабах можуть бути докази на користь нерівномірного зважування на окрему ціль і γ слід відповідно коригувати.

Екологічний тиск оцінюється через п'ять широких, глобально важливих категорій екологічних стресорів: рибальський тиск, знищення природних місць існування, зміни клімату (включаючи кислотність морської води), водне забруднення та внесення видів (інвазійні види та генетичні впливи). Кожна категорія тиску може включати декілька стресорів. Інтенсивність кожного стресору в кожному регіоні змінюється від 0 до 1, де 1 вказує на найвищий стрес.

Чутливість кожної цілі або підцілі до кожного стресору (або, коли це можливо, до елемента цілі, наприклад, конкретного місця існування) визначається і ранжується наступним чином: "високий" (оцінка = 3), "середній" (оцінка = 2), "низький" (оцінка = 1) або "немає" (оцінка = NA) вплив. Де це можливо, визначення цих рангів базується на літературних даних, а в інших випадках - на колективному експертному судженні. Ранги тиску базуються на приблизних оцінках глобальної середньої інтенсивності та частоти стресору. Цей підхід може призвести до переоцінки або недооцінки для різних місць на планеті, але для вирішення такої варіації в значущий спосіб потребувало б використання значно більшої кількості даних, ніж в наявності, та можливостей для їх аналізу на масштабі окремого регіону або місця.

Соціальні тиски відображають неефективність уряду та соціальних інститутів. Вони розглядаються для кожного регіону і міряються на шкалі від 0 до 1, де 1 вказує на найвищий тиск. Загальний соціальний тиск розраховується як середнє значення відповідних соціальних стресорів, використовуючи формулу

$$p_s = \frac{\sum_i^N z_i}{N},$$

де z_i - це виміри соціального тиску, специфічні для цілі.

З урахуванням моделі для оцінки індексу здоров'я океану нами створено систему рівнянь для моделювання динаміки системи управління екосистемними ризиками.

$$1. E(t + \Delta tE) = k * E(t) + c_e * (S(t + \Delta tS) - S(t)) - a_e * (F(t + \Delta tF) - F(t)) - b_e * (St(t + \Delta tSt) - St(t))$$

Стан екосистеми E моделюється в результаті процесів самовідновлення системи відповідно до коефіцієнту k , змін у стані системи управління ризиками, зовнішніх факторів та користувачів екосистемних послуг, кожна з яких множиться на свій ваговий коефіцієнт (c_e , a_e і b_e відповідно).

$$2. I(t + \Delta tI) = I(t) + e_I * (E(t + \Delta tE) - E(t)) + f_I * (S(t + \Delta tS) - S(t)) - g_I * (F(t + \Delta tF) - F(t))$$

Стан екосистемних послуг I моделюється за допомогою змін у стані екосистеми, системи управління ризиками та зовнішніх факторів, кожна з яких множиться на свій ваговий коефіцієнт (e_I , f_I і g_I відповідно).

$$3. St(t + \Delta tSt) = St(t) + g1_st * (I(t + \Delta tI) - I(t)) - g2_st * (F(t + \Delta tF) - F(t)) + g3_st * (M(t + \Delta tM) - M(t))$$

Динаміка користувачів екосистемних послуг St моделюється за допомогою змін у стані екосистемних послуг, зовнішніх факторів та системі моніторингу, кожна з яких множиться на свій ваговий коефіцієнт ($g1_st$, $g2_st$ і $g3_st$ відповідно).

$$4. F(t + \Delta tF) = normal(a_f, F_t0) + t * b_f - c_f * (S(t + \Delta tS) - S(t))$$

Динаміка зовнішніх факторів F описується як нормальний розподіл з параметрами стандартного відхилення нормального розподілу - a_f та середнього значення нормального розподілу - зовнішнього фактору $F(t=0) = F_t0$ із змінами у часі $t * b_f$ та скоригований на різницю між поточним і передбачуваним станами системи управління ризиками.

$$5. \sigma(t + \Delta t\sigma) = (100/141.42) * sqrt((((100 - I(t)) + (100 - E(t)))/2)^2 + ((F(t) + St(t))/2)^2)$$

Невизначеність σ вимірюється за допомогою квадратного кореня з середнього квадрату відхилень від 100 для стану екосистемних послуг I і стану морської екосистеми E , а також середнього значення суми зовнішніх факторів F та користувачів екосистемних послуг St .

$$6. M(t + \Delta tM) = Econ * (h4_m * N/N_max + h5_m * P/P_max + h6_m * D/D_max) * 100$$

Рівень ефективності системи моніторингу M моделюється як доля економічної спроможності здійснити моніторинг та заходи для досягнення або підтримки доброго екологічного стану (ДЕС) від необхідної загальної суми - $Econ$ відповідно

до отриманої інформації від системи моніторингу, помножений на суму відносної кількості станцій моніторингу N , кількості параметрів P та максимальної дискретності вимірювань D , усе це множить на вагові коефіцієнти $h4_m, h5_m, h6_m$ відповідно.

$$7. S(t + \Delta tS) = S(t) + f1_s * (M(t + \Delta tM) - M(t)) - f2_s * (\sigma(t + \Delta t\sigma) - \sigma(t))$$

Ефективність системи управління ризиками S моделюється як різниця між поточним і передбачуваним станами системи моніторингу і різниця між поточним і передбачуваним станами невизначеності, кожна з яких множить на свій ваговий коефіцієнт ($f1_s$ і $f2_s$ відповідно).

В наведеній динамічній моделі управління екосистемними ризиками критично важливі взаємодії між різними компонентами. Стан морської екосистеми (E) у взаємодії з зовнішніми факторами (F), користувачами екосистемних послуг (St) і системою управління екосистемними ризиками (S) створює комплексну систему, яка відображає динаміку як внутрішніх, так і зовнішніх компонент.

Зовнішні фактори (F) в даній моделі відносяться до зовнішніх впливів на екосистему, які не залежать від безпосередньої взаємодії користувачів екосистемних послуг (St). Вони можуть включати:

1. **Кліматичні зміни:** Це включає зміни у шаблонах погоди, такі як температура, опади, рівень моря та екстремальні погодні явища. Кліматичні зміни можуть впливати на екосистему, змінюючи характеристики морського середовища і, як результат, впливаючи на здатність екосистеми виконувати її функції.
2. **Природні катастрофи:** Це може включати землетруси, повені, цунамі, пожежі та інші природні події, які можуть мати значний вплив на екосистему, змінюючи її структуру та функції.
3. **Біологічні інвазії:** Введення іноземних видів може значно вплинути на екосистему, змінюючи взаємозв'язки між видами та змінюючи функціонування екосистем.
4. **Геологічні зміни:** Це можуть бути зміни у ландшафті внаслідок ерозії, осідання або

інших геологічних процесів, які можуть впливати на екосистему.

Всі ці зовнішні фактори впливають на стан екосистеми (E), але вони відділені від дій користувачів екосистемних послуг (St), таких як рибалка, туризм або інші форми людської діяльності, які безпосередньо використовують та впливають на ресурси екосистеми.

Система управління екосистемними ризиками (S) є важливим елементом цієї моделі і відіграє центральну роль у взаємодії між різними компонентами. Вона покликана забезпечувати стійкість екосистеми, реагуючи на різні фактори і зміни у середовищі.

Управління ризиками відображає та контролює вплив різних зовнішніх факторів (F), регулюючи їх вплив на стан екосистеми (E). Зовнішні фактори можуть включати різні природні та антропогенні впливи, включаючи кліматичні зміни, забруднення, людську діяльність тощо. Система управління ризиками повинна бути достатньо гнучкою, щоб адаптуватися до цих змін і забезпечувати стійкість екосистеми.

Система управління ризиками також тісно пов'язана з користувачами екосистемних послуг (St). Користувачі є активними учасниками екосистеми, і їх дії та вплив можуть значною мірою впливати на стан екосистеми. Управління ризиками включає в себе контроль та оптимізацію впливу користувачів на екосистему, з метою забезпечення її стійкості.

Наостанок, система управління ризиками тісно взаємодіє з системою моніторингу (M). Моніторинг є ключовим елементом для ефективного управління ризиками, оскільки він дозволяє ідентифікувати та вчасно реагувати на потенційні загрози. Ефективність системи моніторингу впливає на швидкість і точність відгуку системи управління ризиками.

У сукупності, система управління ризиками відіграє важливу роль у взаємодії та балансуванні різних елементів екосистеми, враховуючи при цьому економічні фактори та зовнішні впливи.

Характеристика показників та Коефіцієнтів математичної моделі управління екосистемними ризиками для українських вод Чорного моря наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Характеристика показників та коефіцієнтів математичної моделі управління екосистемними ризиками для українських вод Чорного моря

Table 2 – Characteristics of indicators and coefficients of the mathematical model of ecosystem risk management for the Ukrainian waters of the Black Sea

Позначення	Опис	Діапазон значень	Початкове/ прийняте значення	Одиниці виміру
$E(t)$	Стан екосистеми в момент часу $t=0$	Від 0 до 100	74,3	Відносна шкала (0-100)
$F(t)$	Вплив зовнішніх факторів в момент часу $t=0$	Від 0 до 100	43,8	Відносна шкала (0-100)
$St(t)$	Користувачі екосистемних послуг в момент часу $t=0$	Від 0 до 100	37,6	Відносна шкала (0-100)
$S(t)$	Система управління екосистемними ризиками в момент часу $t=0$	Від 0 до 100	20,0	Відносна шкала (0-100)
$\sigma(t)$	Невизначеність в системі в момент часу $t=0$	Від 0 до 100	35,0	Відносна шкала (0-100)
$I(t)$	Стан екосистемних послуг в момент часу $t=0$	Від 0 до 100	53,9	Відносна шкала (0-100)
$M(t)$	Рівень ефективності системи моніторингу в момент часу $t=0$	Від 0 до 100	10	Відносна шкала (0-100)
Δt	Проміжок часу, протягом якого відбувається зміна	Від 0 до $+\infty$	1	Рік
K	Коефіцієнт самовідтворення екосистеми	Від 1 до 2	1	Безрозмірний
a_e	Коефіцієнт впливу зовнішніх факторів на стан екосистеми	Від 0 до 1	0,4	Безрозмірний
b_e	Коефіцієнт впливу користувачів послуг на стан екосистеми	Від 0 до 1	0,4	Безрозмірний
c_e	Коефіцієнт впливу системи управління на стан екосистеми	Від 0 до 1	0,2	Безрозмірний
a_f	Середньоквадратичне відхилення функції нормального розподілу значень зовнішнього фактору F	Від 0 до 20	4	Відносна шкала
b_f	Коефіцієнт часового впливу на зміни зовнішнього фактору F	Від 0 до 10	0	Безрозмірний
c_f	Коефіцієнт впливу системи управління на значення зовнішнього фактору	Від 0 до 1	0	Безрозмірний
$d1$	Коефіцієнт, що характеризує вклад зовнішніх факторів у невизначеність	Від 0 до 1	1	Безрозмірний
$d2$	Коефіцієнт, що характеризує вклад користувачів послуг у невизначеність	Від 0 до 1	1	Безрозмірний
$d3$	Коефіцієнт, що характеризує вклад системи управління у невизначеність	Від 0 до 1	1	Безрозмірний
$d4$	Коефіцієнт впливу різниці кількості користувачів екосистемних послуг на невизначеність σ	Від 0 до 1	1	Безрозмірний
e_1	Коефіцієнт впливу змін у стані екосистеми на стан екосистемних послуг	Від 0 до 1	0,1	Безрозмірний
f_1	Коефіцієнт впливу змін у системі управління ризиками на стан екосистемних послуг	Від 0 до 1	0,1	Безрозмірний
e_g	Коефіцієнт впливу змін у зовнішніх факторах на стан екосистемних послуг	Від 0 до 1	0,1	Безрозмірний
fl_s	Коефіцієнт впливу стану екосистемного моніторингу та ефективності досягнення ДЕС на систему управління	Від 0 до 1	0,7	Безрозмірний

Таблиця 2 – Продовження
Table 2 - Continued

Позначення	Опис	Діапазон значень	Початкове/ прийняте значення	Одиниці виміру
<i>f2_s</i>	Коефіцієнт впливу невизначеності на систему управління	Від 0 до 1	0,4	Безрозмірний
<i>g1_st</i>	Коефіцієнт впливу стану екосистемних послуг на користувачів послуг	Від 0 до 1	0,1	Безрозмірний
<i>g2_st</i>	Коефіцієнт впливу зовнішніх факторів на кількість користувачів послуг	Від 0 до 1	0,1	Безрозмірний
<i>g3_st</i>	Коефіцієнт впливу рівня моніторингу на користувачів послуг	Від 0 до 1	0,1	Безрозмірний
<i>Econ</i>	доля економічної спроможності здійснити моніторинг та заходи для досягнення або підтримки доброго екологічного стану (ДЕС) від необхідної загальної суми - відповідно до отриманої інформації від системи моніторингу	Від 0 до 1	0,1	Безрозмірний
<i>h4</i>	Коефіцієнт впливу кількості виконаних станцій моніторингу N на рівень моніторингу	Від 0 до 1	0,3	Безрозмірний
<i>h5</i>	Коефіцієнт впливу кількості вимірюваних параметрів P на рівень моніторингу	Від 0 до 1	0,3	Безрозмірний
<i>h6</i>	Коефіцієнт впливу дискретності вимірювань D на рівень моніторингу	Від 0 до 1	0,3	Безрозмірний

Відносна шкала

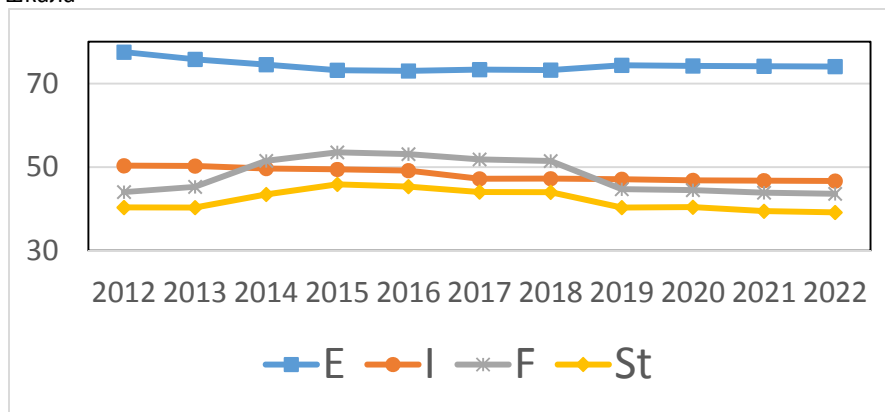


Рис. 1 - Міжрічна динаміка складових системи управління екосистемними ризиками для морських вод України (відносна шкала) відповідно до даних Ocean Health Index (<https://oceanhealthindex.org/>) [8]

Fig. 1 - Interannual dynamics of the components of the ecosystem risk management system for the sea waters of Ukraine (relative scale) according to the Ocean Health Index (<https://oceanhealthindex.org/>) [8]

Початкові значення показників моделі та базові значення коефіцієнтів визначені на базі даних, представлених на сайті Ocean Health Index (<https://oceanhealthindex.org/>) [8]. Для всіх коефіцієнтів у першому наближенні прийнято рівноважність впливів факторів на відповідні змінні по даним для України, які зображено на рис. 1.

Для порівняння показників для чорноморських вод України нами використані

показники для південного океану, а саме океанських вод поблизу Острова Маккуорі (див. рис. 2).

Острів Маккуорі - це океанічний острів у Південному океані, що лежить за 1500 км на південний схід від Тасманії та приблизно на півдорозі між Австралією та Антарктичним континентом. Острів є видимою вершиною підводного хребта Маккуорі, піднятої до свого теперішнього положення, де зустрічаються

тектонічні плити Індо-Австралійська та Тихоокеанська.

Острів Маккуорі є регіональною частиною Океанії та політично належить до Тасманії, Австралії, з 1900 року. В 1978 році він став державним заповідником Тасманії, а у 1997 році був занесений до списку Всесвітньої спадщини ЮНЕСКО.

Загальний бал ОНІ для острова Маккуорі

становить 91 з 100, що вище за середній глобальний бал 69. Це означає, що острів Маккуорі має найвищий рівень здоров'я океану порівняно з іншими регіонами.

На рис. 3 наведена часова динаміка значення ОНІ для України (нижня блакитна лінія) у порівнянні з іншими регіонами.

Відносна шкала

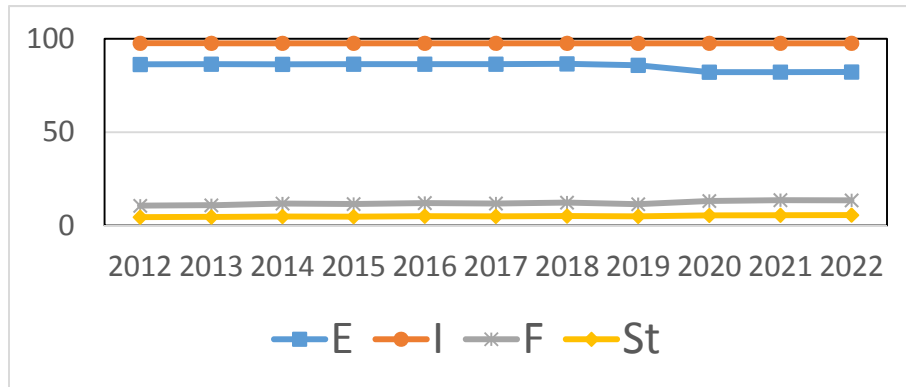


Рис. 2 – Міжрічна динаміка складових системи управління екосистемними ризиками для морських вод Острова Маккуорі відповідно до даних Ocean Health Index (<https://oceanhealthindex.org/>) [8]

Fig. 2 - Interannual dynamics of the components of the ecosystem risk management system for the marine waters of Macquarie Island according to the Ocean Health Index (<https://oceanhealthindex.org/>) [8]

Відносна шкала

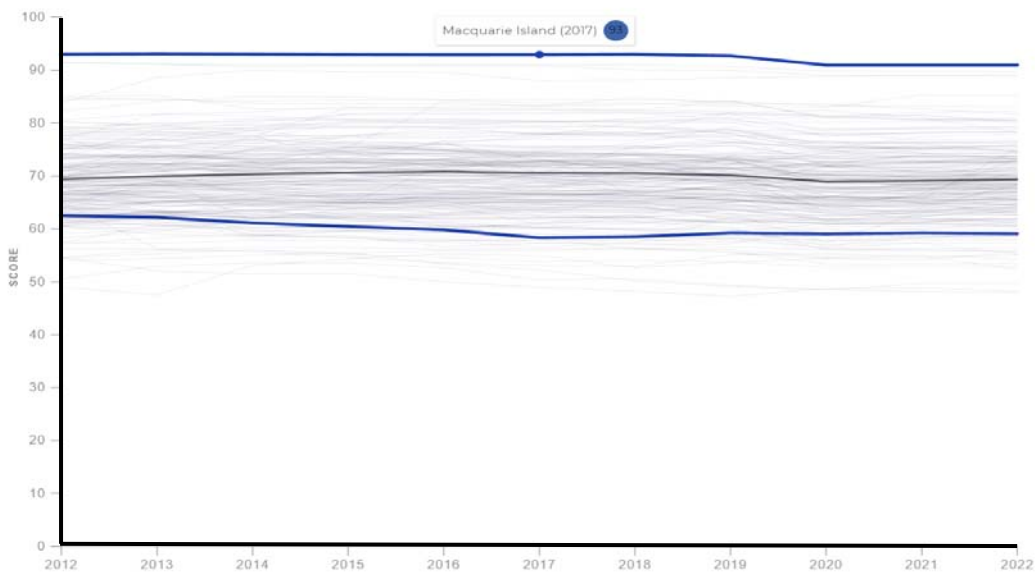


Рис. 3 - Часова динаміка інтегрального значення ОНІ для України (нижня блакитна лінія) у порівнянні з іншими регіонами, товста лінія сірого кольору визначає середнє значення для Землі (Ukraine | OHI (oceanhealthindex.org) - <https://oceanhealthindex.org/regions/ukraine/>) [8].

Fig. 3 - The time dynamics of the integral value of OHI for Ukraine (lower blue line) in comparison with other regions, thick gray line determines the average value for the Earth (Ukraine | OHI (oceanhealthindex.org) - <https://oceanhealthindex.org/regions/ukraine/>) [8].

3 ЧИСЕЛЬНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ

3.1 Прогностичні сценарії

Для прогнозування стану морської екосистеми під дією природних та антропогенних факторів з урахуванням системи управління екосистемними ризиками можна виділити наступні прогностичні сценарії:

1. **Базовий сценарій:** сценарій передбачає продовження поточних тенденцій без будь-яких додаткових втручань. Це включає поточний рівень антропогенного впливу, поточні кліматичні тенденції та поточні політики управління.
2. **Оптимістичний сценарій:** сценарій включає максимально можливі втручання для поліпшення ситуації, включаючи суттєві зміни в політиці управління та широкомасштабні заходи з адаптації до зміни клімату. В нашому випадку зменшення значень коефіцієнтів, що характеризують позитивні складові рівняння для зовнішніх факторів впливу (a_f , b_f) і збільшення коефіцієнту E_{con} , що характеризує економічну спроможність здійснення екосистемного моніторингу та заходів по досягненню ДЕС на базі даних моніторингу та коефіцієнту c_f , що показує на скільки система управління впливає на зовнішні фактори.
3. **Песимістичний сценарій:** у сценарії розглядаються найгірші можливі наслідки, якщо ніякі втручання не будуть здійснені, та

антропогенний вплив та зміна клімату збільшують значення коефіцієнтів, що характеризують позитивні складові рівняння для зовнішніх факторів впливу (a_f , b_f). При цьому коефіцієнт E_{con} залишається невинуватим малим.

Кожний з цих сценаріїв дає важливу інформацію, яка може допомогти при виборі оптимальної стратегії управління ризиками. Порівняння результатів цих сценаріїв може допомогти визначити, які стратегії є найефективнішими та найбільш вартими впровадження.

Були проведені чисельні експерименти для розрахунку поведінки системи для морських вод України та для південного океану на 120 років уперед із змінами у значеннях коефіцієнтів a_f , b_f , c_f , E_{con} .

3.2 Результати чисельних експериментів для морських вод України

Результати чисельних експериментів для морських вод України: отримані максимальні значення невизначеності σ та середні значення для E , I , F , ST , S , M наведені у табл. 3.

Результати розрахунків для морських вод України: невизначеності (а), стану морської екосистеми E (б) та зовнішніх факторів впливу F (в), екосистемних послуг I (г) та користувачів екосистемних послуг St (д) наведено на рис. 4.

Таблиця 3 – Результати чисельних експериментів для морських вод України: отримані максимальні значення невизначеності σ та середні значення для E , I , F , ST , S , M

Table 3 – Results of numerical experiments for sea waters of Ukraine: obtained maximal values of σ uncertainty and average values for E , I , F , ST , S , M

№	Сценарій	σ_{\max}	E середнє	I середнє	F середнє	ST середнє	S середнє	M середнє
1	Варіація 1 - Базовий сценарій	40,0	74,3	54,0	43,7	37,7	21,1	10,0
2	Варіація 2	43,0	71,8	53,1	49,8	37,0	20,3	10,0
3	Варіація 3	58,4	61,8	49,3	74,3	34,2	16,8	10,0
4	Варіація 4	59,0	61,5	49,3	74,2	34,2	16,8	10,0
5	Варіація 5	39,7	76,8	55,0	37,5	38,4	22,0	10,0
6	Варіація 6	38,9	81,7	56,8	25,5	39,8	23,6	10,0
7	Варіація 7	38,2	79,9	57,4	43,7	38,5	49,7	49,7
8	Варіація 8	36,3	86,6	61,6	43,7	39,4	84,9	98,9
9	Варіація 9	41,2	77,4	56,5	49,8	37,7	48,8	49,7
10	Варіація 10	39,3	84,4	60,7	49,8	38,7	84,3	99,3
11	Варіація 11	37,8	82,4	58,4	37,5	39,2	50,5	49,7
12	Варіація 12	38,3	79,8	57,4	43,6	38,5	49,7	49,7

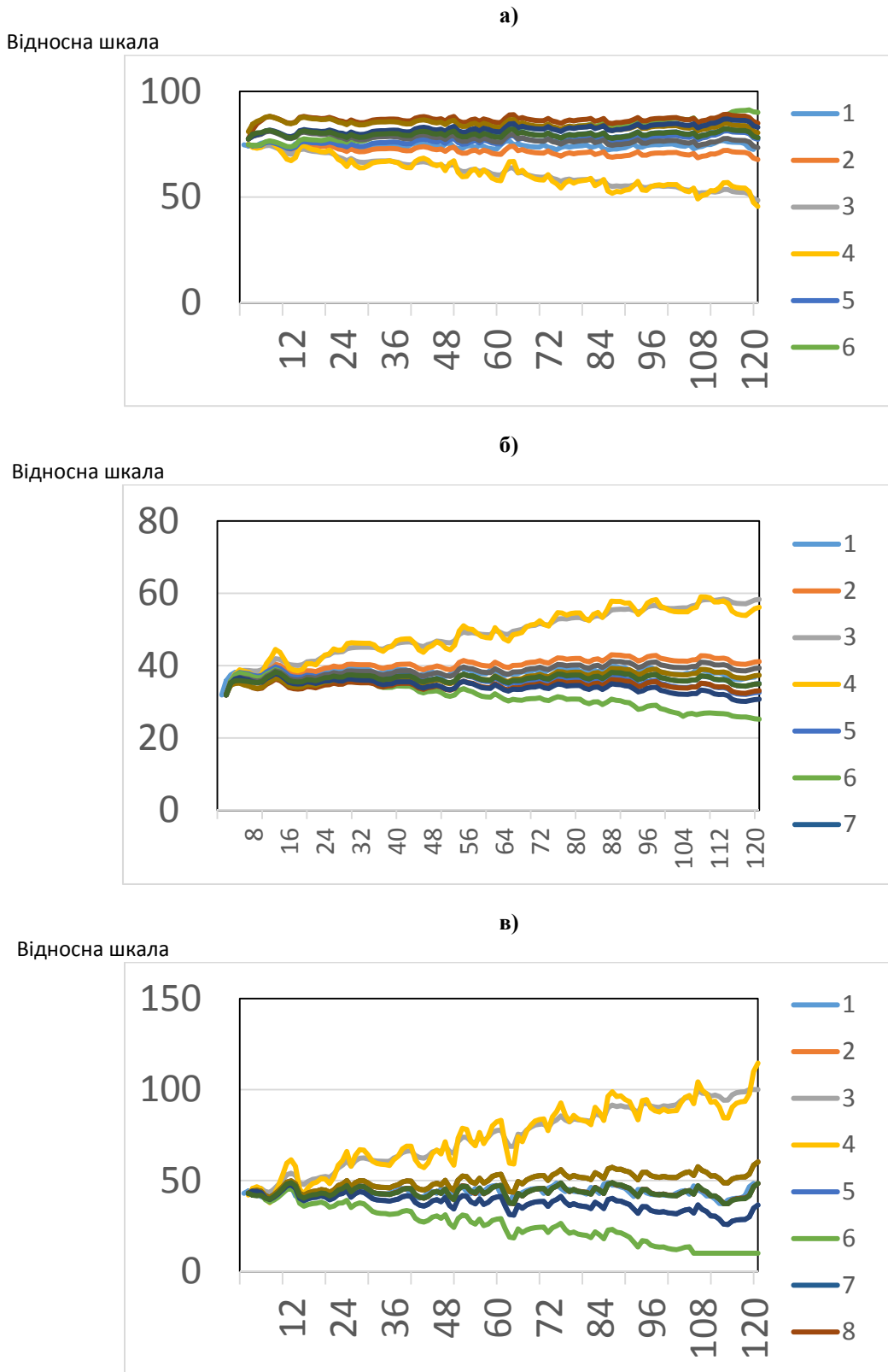


Рис. 4 - Результати розрахунків для морських вод України: невизначеності (а), стану морської екосистеми Е (б) та зовнішніх факторів впливу F (в), екосистемних послуг I(г) та користувачів екосистемних послуг St (д)

Fig. 4 - Results of calculations for the sea waters of Ukraine: uncertainty (a), the state of the marine ecosystem E (b) and external factors of influence F (c), ecosystem services I (d) and users of ecosystem services St (e)

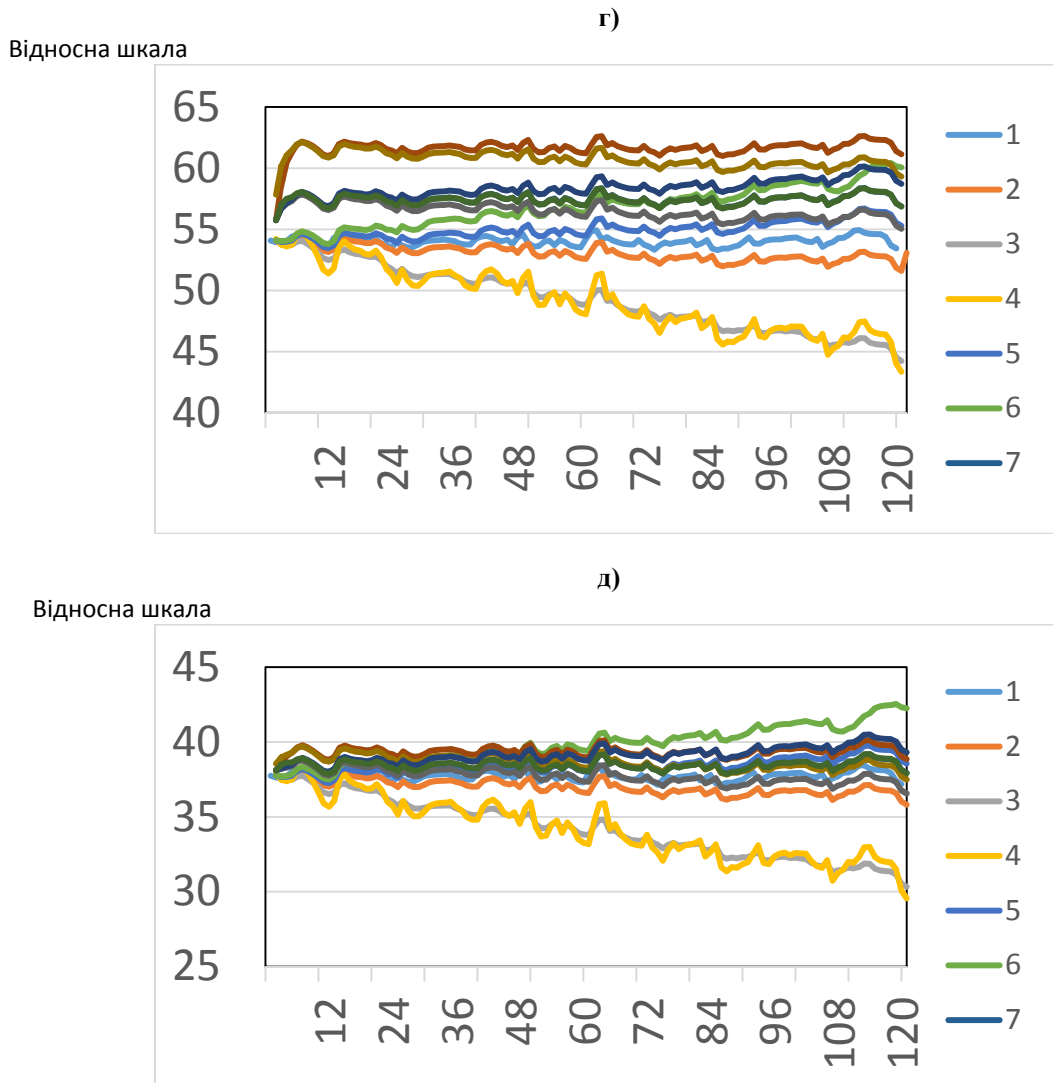


Рис. 4 – Продовження
Fig. 4 - Continued

Наші експерименти виконані з різними значеннями параметрів a_f , b_f , c_f та E_{con} . Розглянемо вплив кожного з цих параметрів на різні аспекти системи управління екосистемними ризиками.

Параметр a_f відповідає за середнє відхилення зовнішніх факторів. Зміна цього параметра з 4 до 10 в сценаріях 3 та 4 призводить до збільшення невизначеності (σ) та зменшення середніх значень E , I та St . Це можна пояснити тим, що велике відхилення зовнішніх факторів може призвести до порушення стійкості екосистеми.

Параметр b_f відповідає за зміну зовнішніх факторів у часі. При зростанні цього параметра від 0 до 0,5 (сценарії 2 та 3) ми бачимо збільшення невизначеності та зниження середніх значень E , I та St . Це може вказувати на те, що зростання зовнішніх факторів може вплинути на

стійкість екосистеми. Однак, зменшення b_f до -0,1 або -0,3 (сценарії 5 та 6) призводить до зменшення невизначеності та покращення середніх значень E , I та St , що вказує на збільшення стійкості екосистеми при зменшенні впливу зовнішніх факторів.

Параметр c_f , який відображає різницю між поточним і передбачуваним станами системи управління ризиками, має базове значення 0 у всіх сценаріях, крім сценарію 12, де він дорівнює 0,5. Проте, в даному наборі даних ми не бачимо змін цього параметра, що не дозволяє нам аналізувати його вплив.

E_{con} - економічна спроможність здійснити моніторинг. Цей параметр збільшується від 0,1 до 1 в сценаріях 7-12. При зростанні цього параметра ми бачимо збільшення середніх значень E , I , St , S та M . Це може свідчити про те, що збільшення економічних ресурсів на

моніторинг може покращити стан екосистеми та ефективність системи управління ризиками.

Загалом, дані демонструють важливість збалансованого управління екосистемами. Потрібно враховувати зовнішні фактори та забезпечити достатню економічну спроможність для проведення моніторингу, щоб підтримувати стійкість екосистеми і ефективність системи управління ризиками.

Математично цільова функція представляє собою вираз, який потрібно максимізувати або мінімізувати, з урахуванням певних обмежень. В залежності від задачі це може бути простий вираз або більш складний.

Нами використана наступна цільова функція для багатоцільової оптимізації:

$$GF(x) = w1E(x) + w2 I(x) + w3S(x) - w4ST(x) - w5F(x),$$

де:

- x є вектором рішень;
- $E(x)$ є функцією, яка вимірює стан морської екосистеми;
- $I(x)$ є функцією, яка вимірює стан екосистемних послуг;
- $S(x)$ є функцією, яка вимірює ефективність системи управління екосистемними

ризиками;

- $w1, w2$ та $w3$ - ваги, які вказують на важливість кожної цільової функції (сума ваг обов'язково повинна дорівнювати 1).

Значення ваг $w1, w2$ та $w3$ відображують важливість кожного компоненту системи.

Завдання складається із необхідності знайти вектор рішень x , який мінімізує функцію невизначеності σ і максимізує функцію загального блага GF .

Це можна виразити як дві окремі задачі оптимізації:

1. Мінімізувати $\sigma(x)$.
2. Максимізувати: $GF(x)$

Ці дві задачі представляють собою багатоцільову оптимізацію, де треба знайти компроміс між мінімізацією невизначеності і максимізацією загального блага. Рішення цієї задачі буде складатися з вектору рішень x , який найкраще задовольняє обидві цілі.

Прийняті коефіцієнти для розрахунку $GF(x)$ для кожної із зазначених цілей наведені у табл. 4.

Результати розрахунку $GF(x)$ для кожної із цілей відповідно до розрахованих раніше сценаріїв наведені у табл. 5.

Таблиця 4 - Прийняті коефіцієнти для розрахунку $GF(x)$ для кожної із зазначених цілей
Table 4 – Adopted coefficients for calculation of $GF(x)$ for each of the specified purposes

Ціль	Завдання	$w1$	$w2$	$w3$	$w4$	$w5$
Збереження біорізноманіття морських екосистем (GF1(x))	Для досягнення цієї цілі, слід максимізувати позитивний вплив управління ризиками на стан екосистеми, мінімізувати вплив зовнішніх факторів та вплив користувачів на екосистему	0,3	0,05	0,3	0,05	0,3
Запобігання негативному впливу на морські екосистеми(GF2(x))	Щоб запобігти негативному впливу на морські екосистеми, треба змаксимізувати вплив управління ризиками на зовнішні фактори і мінімізувати вплив зовнішніх факторів та вплив користувачів на стан екосистеми	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3
Збереження екосистемних послуг морських екосистем(GF3(x))	Для збереження екосистемних послуг слід максимізувати вплив стану екосистеми на послуги і вплив послуг на користувачів, мінімізуючи вплив зовнішніх факторів на послуги	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1

Таблиця 4 – Продовження
Table 4 - Continued

Ціль	Завдання	w1	w2	w3	w4	w5
Підтримка сталого використання ресурсів морських екосистем (GF4(x))	Включає максимізацію впливу стану екосистеми на послуги, вплив послуг на користувачів та вплив моніторингу на управління ризиками. Також слід мінімізувати вплив зовнішніх факторів на стан екосистеми та вплив зовнішніх факторів на користувачів	0,1	0,3	0,2	0,3	0,1
Захист здоров'я та благополуччя людини (GF5(x))	Для досягнення цілі потрібно максимізувати вплив послуг на користувачів та вплив моніторингу на управління ризиками, мінімізуючи вплив зовнішніх факторів на користувачів та вплив невизначеності на управління ризиками	0,05	0,3	0,3	0,3	0,05

Таблиця 5 - Результати розрахунку GF(x) для кожної із цілей
Table 5 – Calculation results of GF (x) for each purpose

№	Сценарій	σ_{max}	GF1(x)	GF2(x)	GF3(x)	GF4(x)	GF5(x)
1	Варіація 1 - Базовий сценарій	40,0	48.08	45.37	47.82	40.78	44.06
2	Варіація 2	43,0	45.94	43.57	47.12	40.52	43.06
3	Варіація 3	58,4	37.67	39.57	41.38	34.98	35.94
4	Варіація 4	59,0	37.48	39.42	41.23	34.88	35.82
5	Варіація 5	39,7	51.05	46.96	49.61	41.92	45.72
6	Варіація 6	38,9	55.21	47.67	52.28	42.86	47.86
7	Варіація 7	38,2	73.33	60.37	74.45	56.65	59.52
8	Варіація 8	36,3	98.64	72.79	99.56	70.27	73.34
9	Варіація 9	41,2	72.22	60.34	73.43	56.30	59.44
10	Варіація 10	39,3	98.61	73.19	99.54	70.09	73.52
11	Варіація 11	37,8	74.27	59.97	75.50	57.00	60.00
12	Варіація 12	38,3	73.33	60.28	74.45	56.52	59.44

4 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Усі розглянуті сценарії мають свої сильні та слабкі сторони в контексті різних цілей (див. табл. 3 та рис. 4). Наприклад, деякі сценарії найкраще підходять для досягнення цілі збереження біорізноманіття, інші - для підтримки сталого використання ресурсів морських екосистем, і т.д.

Зокрема, сценарій 3 та сценарій 4 виявилися найефективнішими для запобігання негативного впливу на морські екосистеми (див. рис. 4(б)). Це може бути важливим, якщо основна пріоритетна ціль - мінімізувати негативний вплив на морське середовище.

Іншим ключовим висновком є те, що сценарії 7, 8, 9, 10, 11 та 12 є найкращими для досягнення

цілі збереження екосистемних послуг морських екосистем (див. рис. 4(г)). Це підкреслює їх потенційну важливість в контексті збереження екосистем і їхніх послуг для людства.

Щодо забезпечення здоров'я та благополуччя людини, найкращим варіантом є сценарій 6 (див. рис. 4(д)). Цей сценарій може бути особливо корисним в ситуаціях, коли головною пріоритетною ціллю є збереження здоров'я та благополуччя людини.

В кінцевому підсумку, оптимальний сценарій залежить від пріоритетних цілей. Кожен сценарій може бути найкращим варіантом для певних цілей, але може бути менш ефективним для інших. Таким чином, при виборі сценарію слід враховувати різноманітність цілей та їх пріоритети (див. табл. 5).

1. **Мінімізація невизначеності (σ_{max}):** У цьому контексті найкращими варіантами є Варіація 8 і Варіація 10, оскільки обидва сценарії мають найнижчі значення невизначеності (σ_{max}). Це означає, що вони є найбільш стійкими, і їхні результати будуть більш передбачуваними.
2. **Максимізація $GF(x)$ за всіма цілями:** Якщо важливо оптимізувати всі цілі одночасно, то Варіація 8 і Варіація 10 знову виходять на передній план. Вони максимізують $GF(x)$ за всіма цілями і є найкращим вибором для загальної оптимізації.
3. **Окремі цілі:** Якщо керувати окремими цілями, то кілька сценаріїв виходять на передній план. Наприклад, Варіація 7 і Варіація 9 є найкращими для першої, третьої та п'ятої цілей, хоча їхні загальні результати менш вражаючі за інші сценарії.
4. **Сценарії з нижчими показниками:** Сценарії 2, 5, 6, 11 і 12 не є оптимальними з точки зору жодної з цілей і мають більшу невизначеність. Це означає, що результати цих сценаріїв менш передбачувані.

Таким чином, при виборі стратегії управління морською екосистемою, яка би оптимізувала всі цілі та мінімізувала невизначеність, варто вибирати Варіацію 8 або Варіацію 10. Необхідно зазначити, що у зазначених сценаріях доля економічної спроможності здійснити моніторинг та заходи для досягнення або підтримки доброго екологічного стану (ДЕС) дорівнювала максимально можливого значення.

5 ВИСНОВКИ

У даному дослідженні було розроблено та верифіковано математичну модель управління екосистемними ризиками морських акваторій. Модель враховує складні взаємозв'язки між природними та антропогенними факторами, станом морських екосистем, їхньою вразливістю та екосистемними послугами. Основними методами моделювання стали диференціальні рівняння, статистичні аналізи, імітаційне моделювання та мережевий аналіз, що дозволило створити детальну та науково обґрунтовану модель.

Диференціальні рівняння використовувалися для опису динамічних процесів у морських екосистемах, таких як зміни популяцій морських організмів, розповсюдження забруднюючих речовин та інші екологічні процеси. Статистичні методи допомогли аналізувати наявні дані, виявляти тенденції та встановлювати кореляції

між різними показниками, сприяючи ідентифікації ключових факторів впливу на екосистему.

Імітаційне моделювання дало можливість проводити чисельні експерименти, симулюючи різні сценарії впливу на екосистему та оцінюючи результати впровадження різних стратегій управління ризиками. Це дозволило прогнозувати наслідки управлінських рішень та оптимізувати стратегії для мінімізації екосистемних ризиків. Мережевий аналіз використовувався для вивчення взаємозв'язків між компонентами екосистеми, включаючи харчові ланцюги, потоки енергії та речовин, що дозволило виявити ключові вузли та зв'язки, які є критичними для стабільності та функціонування екосистеми.

Проведені чисельні експерименти з використанням даних про морські екосистеми України підтвердили здатність моделі точно прогнозувати зміни стану екосистем під впливом різних факторів. Наприклад, сценарії 3 та 4 виявилися найефективнішими для запобігання негативного впливу на морські екосистеми. Це підтверджується максимальними значеннями невизначеності (σ_{max}) та середніми значеннями для стану екосистеми (E) та екосистемних послуг (I).

Іншим ключовим висновком є те, що сценарії 7, 8, 9, 10, 11 та 12 є найкращими для досягнення цілі збереження екосистемних послуг морських екосистем. Це підкреслює їх потенційну важливість у контексті збереження екосистем та їхніх послуг для людства. Щодо забезпечення здоров'я та благополуччя людини, найкращим варіантом є сценарій 6, що показує найвищі значення відповідної цільової функції.

Це дозволяє використовувати модель як ефективний інструмент для оптимізації стратегій управління екосистемними ризиками. Використання моделі дозволяє мінімізувати негативні наслідки антропогенного впливу та природних змін, сприяючи стійкості морських екосистем.

Практичні рекомендації, розроблені на основі результатів дослідження, включають стратегії попередження, мінімізації та адаптації до потенційних загроз, враховуючи специфіку кожного регіону та екосистеми. Запропонована модель допомагає оптимізувати управлінські рішення, знижуючи ризики та покращуючи стан морських екосистем в умовах антропогенного впливу та змін клімату.

Таким чином, математична модель управління екосистемними ризиками морських

акваторій є надійним інструментом для забезпечення стійкості та збереження морських екосистем. Вона може бути використана для оптимізації управлінських стратегій, мінімізації екосистемних ризиків та покращення стану морських екосистем, що є надзвичайно важливим в умовах сучасних викликів, пов'язаних з антропогенним впливом та змінами клімату.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. National Pilot Monitoring Studies and Joint Open Sea Surveys in Georgia, Russian Federation and Ukraine, 2016: Final Scientific Report / J. Slobodnik, B. Alexandrov, V. Komorin, A. Mikaelyan, A. Guchmanidze, M. Arabidze, A. Korshenko, S. Moncheva. Dnipro: Seredniak T.K. 2020a. URL: https://emblasproject.org/wp-content/uploads/2022/03/EMBLAS-II_NPMS_JOSS_2016_ScReport_ISBN-978-617-7953-60-8-2.pdf
2. 12-Months National Pilot Monitoring Studies in Georgia, Russian Federation and Ukraine, 2016-2017: Final Scientific Report / J. Slobodnik, V. Medinets, B. Alexandrov, V. Komorin, A. Mikaelyan, A. Guchmanidze, M. Arabidze, A. Korshenko. Dnipro: Seredniak T.K., 2020b. URL: https://emblasproject.org/wp-content/uploads/2022/03/EMBLAS-II_NPMS_12_months-2016_2017_ISBN-978-617-7953-58-5.pdf
3. National Pilot Monitoring Studies and Joint Open Sea Surveys in Georgia, Russian Federation and Ukraine, 2017: Final Scientific Report / J. Slobodnik, B. Alexandrov, V. Komorin, A. Mikaelyan, A. Guchmanidze, M. Arabidze, A. Korshenko. Dnipro: Seredniak T.K., 2020c. URL: https://emblasproject.org/wp-content/uploads/2022/03/EMBLAS-II_NPMS_JOSS_2017_ScReport_ISBN-978-617-7953-62-2.pdf
4. Komorin V. Assessment of the Black sea shelf ecosystem sustainability with mathematical simulation method. *Geographia Technica*. 2021. Vol. 16(2). Pp. 19–28. https://doi.org/10.21163/GT_2021.162.02
5. Komorin V. M. Theoretical and methodological aspects of managing ecosystem risks in the sea. "Український гідрометеорологічний журнал". 2023. №31. С. 3-54. <https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.03>
6. Коморін В. М., Попов Ю. І., Український В. В. Оцінка мінливості гідродинамічних характеристик ПЗЧМ.

- Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2008. Вип.5. С. 188-201.
7. Halpern B.S., et al. An index to assess the health and benefits of the global ocean." *Nature*, 488, 2012, 615-620.
 8. Ocean Health Index. URL: <https://oceanhealthindex.org/> (Accessed 22/05/2024)

REFERENCES

1. Slobodnik, J. et al. (2020a). *National Pilot Monitoring Studies and Joint Open Sea Surveys in Georgia, Russian Federation and Ukraine, 2016*: Final Scientific Report. Dnipro: Seredniak T.K. Available at: https://emblasproject.org/wp-content/uploads/2022/03/EMBLAS-II_NPMS_JOSS_2016_ScReport_ISBN-978-617-7953-60-8-2.pdf
2. Slobodnik, J. et al. (2020b). *12-Months National Pilot Monitoring Studies in Georgia, Russian Federation and Ukraine, 2016-2017*: Final Scientific Report. Dnipro: Seredniak T.K. Available at: https://emblasproject.org/wp-content/uploads/2022/03/EMBLAS-II_NPMS_12_months-2016_2017_ISBN-978-617-7953-58-5.pdf
3. Slobodnik, J. et al. (2020c). *National Pilot Monitoring Studies and Joint Open Sea Surveys in Georgia, Russian Federation and Ukraine, 2017*: Final Scientific Report. Dnipro: Seredniak T.K. Available at: https://emblasproject.org/wp-content/uploads/2022/03/EMBLAS-II_NPMS_JOSS_2017_ScReport_ISBN-978-617-7953-62-2.pdf
4. Komorin, V. (2021). Assessment of the Black sea shelf ecosystem sustainability with mathematical simulation method. *Geographia Technica*, 16(2), pp. 19–28. https://doi.org/10.21163/GT_2021.162.02
5. Komorin, V.M. (2023). Theoretical and methodological aspects of managing ecosystem risks in the sea. *Ukrains'kij gidrometeorologičnij žurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 2023, 31, pp. 33-54. <https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.03>
6. Komorin, V.M., Popov, Y.I. & Ukrainskii, V.V. (2008). [Evaluation of the variability of the hydrodynamic characteristics of the SWBS]. *Visnik Odes'kogo deržavnogo ekologičnogo universitetu [Bulletin of Odessa state environmental university]*, вип.5, pp. 188-201 (in Ukr)
7. Halpern, B.S. et al (2012). An index to assess the health and benefits of the global ocean. *Nature*, 488, pp. 615-620.
8. Ocean Health Index. Available at: <https://oceanhealthindex.org/> (Accessed 22/05/2024)

MATHEMATICAL MODEL FOR MANAGING MARINE ECOSYSTEM RISKS

V. M. Komorin

SRO "Ukrainian Scientific Center of Ecology of the sea"
 French Boulevard, 89, 65009, Odesa, Ukraine, vkomorin@gmail.com
 ORCID, <https://orcid.org/0000-0002-4847-0496>

The article presents the results of the research aimed at developing and verifying a

mathematical model for managing the ecosystem risks of marine areas. The main purpose of the research is to create an effective tool for assessing and managing the risks arising from anthropogenic influence, climate change and other natural factors. The proposed model is based on the existing theory of sea ecosystem risks management and takes into account the relationship between natural and anthropogenic factors, condition of marine ecosystems, their vulnerability and ecosystem services.

The model uses mathematical methods, in particular, differential equations, statistical analyses, simulation modeling and network analysis, allowing creation of detailed models that reflect marine ecosystems' dynamics and their response to external influence. Numerous experiments were conducted in order to verify the model. They demonstrate its ability to predict changes in the condition of marine ecosystems under influence of various factors. The results of the research show that the proposed model can be an effective tool for optimizing management strategies, minimizing ecosystem risks and improving sustainability of marine ecosystems.

Practical recommendations developed on the basis of the results of the research include strategies for preventing, minimizing and adapting to potential threats, taking into consideration each region's and ecosystem's specifics. The proposed model helps to optimize management decisions, reducing risks and improving the condition of marine ecosystems affected by anthropogenic impact and climate change. It is a reliable tool for ensuring sustainability and preservation of marine ecosystems. This approach allows for evidence-based risk management that increases sustainability of marine ecosystems and their preservation for future generations.

The model also considers key factors influencing marine ecosystems, including biological diversity, water quality, industrial fisheries, tourism and recreation, and allows evaluation of effectiveness of various management decisions in the context of such factors. The application of this model in ecosystem management practices allows making more informed decisions regarding protection and preservation of marine resources. It contributes to their sustainable development and provision of ecosystem services having critical importance for society.

Keywords: ecosystem risks; risk management; marine areas; environmental socio-economic systems; sustainability of marine ecosystems; mathematical model; management strategies

*Подання до редакції : 10. 04. 2024
Надходження остаточної версії : 15. 04. 2024
Публікація статті : 25. 04. 2024*