

УДК 556.5+627.13+518.9+682.964

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406-04>

# НАУКОВІ ПРОБЛЕМИ ПОБУДОВИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОДНОЇ БЕЗПЕКИ ЗА МЕТОДОМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ЕКОСИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Івашенко Т. Г., Машков О. А., Присяжний В. І.,  
Фінін Г. С., Оводенко Т. С.

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління,  
вул. Митрополита Василя Липківського 35, корпус 2, м. Київ, 03035

*t1313@ukr.net*

*mashkov\_oleg\_52@ukr.net*

За результатами аналізу сучасного стану науково-технічних досягнень з питань побудови та застосування системи забезпечення водної безпеки за методом забезпечення функціональної стійкості екосистем з використанням системи штучного інтелекту визначено шляхи вирішення науково-прикладної проблеми розроблення теоретичних основ, інструментального базису та технології штучного інтелекту для підтримки прийняття рішень при забезпеченні водної безпеки в умовах змін клімату та надзвичайних ситуацій природного характеру. Вирішення цієї проблеми потребує створення відповідних математичних моделей: модель інтелектуальної системи управління водними ресурсами; модель динаміки екологічних процесів в інтелектуальній системі управління водними ресурсами. Із застосуванням цих моделей доцільно відпрацьовувати метод забезпечення функціональної стійкості водних ресурсів з використанням інтелектуальних систем. Застосування такого методу забезпечення функціональної стійкості дозволяє виконувати просторово-розподілену інтелектуальну оцінку ризику за фізико-хімічними показниками, що є необхідною для діагностики поточної ситуації в екологічній системі. Модель динаміки екологічних процесів в інтелектуальній системі управління водни-

ми ресурсами дозволяє здійснювати підтримку прийняття управлінських екологічних рішень. Це впливає на можливість надавати оцінку та здійснювати прогнозування небезпеки водних ресурсів, прогнозувати компоненти екологічного ризику та формувати технологію забезпечення наявності та раціонального використання водних ресурсів і санітарії для всіх з використанням системи штучного інтелекту. Розроблення системи управління водною безпекою передбачає формування структури комплексу інформаційних процесів в інтелектуальній системі управління водними ресурсами. Структура комплексу визначає архітектуру програмного продукту, склад і формат вхідних та вихідних даних.

**Ключові слова:** водна безпека, нечітка логіка, прийняття рішень, система підтримки прийняття рішень, система штучного інтелекту, функціональна стійкість.

**Scientific challenges in developing a water security system using artificial intelligence for ecosystem stability.** *Ivashchenko T., Mashkov O., Prysyzhnyi V., Finin H., Ovaidenko T.*

This study explores the development of a water security system based on artificial intelligence (AI) to

ensure ecosystem stability amid climate change and natural disasters. The key challenge lies in creating theoretical foundations, an instrumental framework, and AI-driven decision-making technology for effective water resource management.

To address this, the authors propose two essential models: An intelligent water resource management system and A model of ecological process dynamics.

These models enable spatially distributed risk assessment based on physicochemical indicators, essential for diagnosing ecological conditions and supporting environmental decision-making. They also facilitate hazard forecasting, ecological risk prediction, and the optimization of water resource use and sanitation through AI.

Developing this system requires structuring an integrated information processing framework, defining software architecture, and standardizing input/output data formats.

**Keywords:** water security, decision-making, AI systems, functional stability.

### Постановка проблеми

З погляду сучасних системних уявлень завдання контролю та управління станом навколишнього середовища відноситься до завдань управління складними системами, що не піддаються точному аналітичному опису. Це робить малоприсадибним і малоефективним традиційний математичний апарат, який успішно застосовується в різних науково-технічних додатках. З іншого боку, накопичено величезний досвід у вирішенні погано формалізованих завдань з використанням методології штучного інтелекту, що реалізується експертними системами та системами підтримки прийняття управлінських рішень (СППР) [1, 2].

Україна належить до найменш забезпечених власними водними ресурсами європейських держав. Основною їх складовою є річковий стік. В середній за водністю рік його загальний обсяг складає 87,1 км<sup>3</sup>, що, порівняно з Бразилією (9900 км<sup>3</sup>), є досить скромним. Причому абсолютна більшість річкового стоку припадає на Південно-Західний економічний регіон (70%), а на Донецько-Придніпровській та Південний, де мешкає 60% населення, ли-

ше 30%. Але саме тут знаходиться найбільша кількість водомістких виробництв. Значні водні ресурси зосереджені в озерах України, що розташовані по всій її території. За приблизною оцінкою, об'єм води в прісних озерах сягає 2,3 км<sup>3</sup>, в солоних озерах та лиманах – 8,6 км<sup>3</sup>. У болотах зосереджено близько 30 км<sup>3</sup> води, що належить до категорії зв'язаних вікових запасів. В Україні щорічно для потреби водопостачання населення і галузей економіки використовується близько 9 км<sup>3</sup> води, зокрема, 6 км<sup>3</sup> – з поверхневих джерел, 2 км<sup>3</sup> – з підземних джерел, до 1 км<sup>3</sup> – морської води.

Такий об'єм водозабору сформувався в останні 2-3 роки та складає 32% від рівня максимального водозабору (для порівняння, 35 км<sup>3</sup> в 1990 р.). Доступні для використання запаси поверхневих вод дуже нерівномірно розподілені по території країни. Більше половини водних ресурсів зосереджено в басейні р. Дунаю, де потреба у воді не перевищує п'ять відсотків. Водозабезпеченість місцевими водними ресурсами по окремих областях країни, відрізняється майже в 60 разів: від 0,14 км<sup>3</sup>/рік у Херсонській області до 7,92 км<sup>3</sup>/рік – у Закарпатській [2, 3].

Останніми роками відбувається зменшення атмосферних опадів та стійке підвищення температурного режиму на водозборах малих і середніх річок в межах території України. Це спричинено змінами клімату, що не дає змоги акумулювати необхідну кількість водних ресурсів у водосховищах не лише для забезпечення екологічних, але й санітарних пусків, а й суттєво впливає на формування річкового стоку. В середньому, стік малих та середніх річок зменшився на 10–20%. Дослідженнями зафіксовано зменшення стоку малих і середніх річок: на півночі – на 10–20%, а на півдні – від 20 до 50%.

Прогнозні ресурси прісних підземних вод складають загалом 20,9 км<sup>3</sup> на рік, експлуатаційні ресурси – 5,7 км<sup>3</sup>. Балансові запаси підземних вод, що гідравлічно не зв'язані з поверхневим стоком і є додатковими водними ресурсами місцевого формування, становлять близько 7 км<sup>3</sup>. Найбільші величини підземних вод залягають у басейнах рр. Дніпро (61%), Сіверського Донця (12%) та Дністра (9%). Крім прісних водних ресурсів у галузях економіки використовується близько 1 км<sup>3</sup> морської води [2, 3].

Серед найбільш важливих екологічних проблем природних вод на території України визначені наступні:

- надмірне антропогенне навантаження на водні об'єкти внаслідок інтенсивного способу ведення водного господарства, що призвело до кризового зменшення самовідтворюючих можливостей річок та виснаження водоресурсного потенціалу;
- значне забруднення водних об'єктів внаслідок невпорядкованого відведення стічних вод від населених пунктів, господарських об'єктів і сільськогосподарських угідь;
- широкомасштабне радіаційне забруднення басейнів багатьох річок внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС;
- погіршення якості питної води внаслідок незадовільного екологічного стану джерел питного водопостачання;
- недосконалість економічного механізму фінансування і реалізації водоохоронних заходів;
- відсутність автоматизованої, постійно діючої мережі моніторингу в системі водокористування тощо.

Вищезгадані проблеми актуальні для всіх екосистем України.

Стан водних ресурсів і водозабезпечення населення та галузей економіки України залишається однією з головних та актуальних загроз національній безпеці країни. Ця гострота обумовлена тим, що Україна належить до найменш забезпечених власними водними ресурсами країн Європи. За визначенням Європейської економічної комісії ООН, держава, водні ресурси якої не перевищують 1,7 тис. м<sup>3</sup> на одну людину, вважається незабезпеченою водою. В Україні, питома величина місцевого стоку в маловодний рік у розрахунку на одного мешканця дорівнює 0,52 тис. м<sup>3</sup>, а з урахуванням транзитного стоку – 1,2 тис. м<sup>3</sup> (у Франції – 3,5 тис. м<sup>3</sup>, Великій Британії – 5 тис. м<sup>3</sup>, Польщі – 1,4 тис. м<sup>3</sup>). Тому, досягнення належного (прийняттого) рівня водної безпеки України є головною метою національної водної політики. Головним інструментом досягнення водної безпеки має стати інтегроване управління водними ресурсами за басейновим принципом, шляхом впровадження заходів обґрунтованих у планах управління річковими басейнами [4, 5].



Забезпечення функціональної стійкості водної безпеки передбачає гарантований доступ до необхідної кількості та належної якості води: для людини, економіки та природи. Відтак «водна безпека» – це спроможність людей підтримувати стійкий доступ до достатньої кількості прийнятної якості води для:

- забезпечення засобів до існування людини та соціально-економічного розвитку;
- гарантування захисту від забруднення і пов'язаних з водою стихійних лих;
- збереження екосистем в умовах миру та політичної стабільності.

Водна безпека людини та суспільства полягає у забезпеченні рівного права на питну воду та санітарію для кожної людини на рівні громади.

Теорія побудови та застосування системи забезпечення водної безпеки натеper розробляється інтенсивно з використанням деяких нових уявлень про природу водного середовища.

Наразі визначається, що процеси у водній екосистемі є імовірнісним процесом і тому адекватний математичний апарат для його опису та аналізу – теорія випадкових процесів та теорія стохастичних диференціальних рівнянь.

Однак, дотепер відсутня детальна методика, яка дозволяє будувати інженерні розробки на ос-

нові тези про випадкової оцінки природі водного середовища. Відсутність методики пов'язано з тим, що є розбіжності між потребами практики та ступеня розроблення імовірнісної теорії регулювання водного середовища. Причина такого розриву, по-перше, труднощі побудови такої теорії, а по-друге, те, що можливість її практичного застосування, з'явилася тільки з появою та використанням апаратних та програмних засобів.

Побудова імовірнісної теорії забезпечення водної безпеки та відповідних розрахункових прийомів можливо двома шляхами. Перший – аналітичний шлях полягає у тому, що за узагальненими імовірнісними характеристиками процесів у водній екосистемі, а саме за функціями переходу, які керують цим процесом, та визначеними правилами регулювання, будуються узагальнені імовірнісні характеристики водних екосистем. Будь-які окремі реалізації випадкових процесів при цьому, не розглядаються. Другий – статистичний шлях, який полягає в отриманні узагальнених імовірнісних характеристик (вихідних змінних) за результатом процесу їх змін (вхідних змінних).

Дотепер імовірнісні розробки в галузі забезпечення водної безпеки розвивалися, здебільшого, першим шляхом. Застосування методу Монте-Карло, методів штучного інтелекту в цій галузі розглядалося у нечисленній кількості робіт, переважно закордонних, присвячених окремим питанням водної безпеки. У протилежність цим роботам, автори надають системне дослідження розроблення методології побудови та застосування системи забезпечення водної безпеки за методом забезпечення функціональної стійкості екосистем з використанням системи штучного інтелекту [6, 7].

Актуальність дослідження визначається наступними обґрунтуваннями. Недоліки існуючих методів забезпечення водної безпеки пов'язані як з великою обчислювальною складністю так й великими площами (масштабом країни), які потребують відповідні статистичні оцінки. При цьому, слід враховувати характеристики саме предметної сфери: необхідність прийняття рішень у умовах ліміту часу, швидкоплинність процесів у екосистемах потребує оперативної реакції особи, яка приймає рішення. Ці обставини формують вимоги до систем підтримки прийняття управ-

лінських екологічних рішень у реальному часі: прийнятна обчислювальна складність, деталізація в масштабі регіону, динамічна оцінка екологічних ризиків з урахуванням впливу надзвичайних ситуацій та дій особи, яка приймає рішення.

Отож, виникають наступні основні наукові протиріччя: потреба знизити обчислювальну складність без зменшення точності та достовірності (ефективності) і відсутності методів, які забезпечують достатню деталізацію та описують ризик в динаміці як процес.

Саме ці протиріччя обумовлюють необхідність розроблення наукових та методологічних основ побудови й застосування системи забезпечення водної безпеки.

### **Зв'язок авторського доробку із науковими та практичними завданнями**

За результатами розгляду матеріалів аудиту і комплексу питань, пов'язаних із викликами та загрозами національній безпеці України у сфері забезпечення водної безпеки держави, Рада національної безпеки і оборони України прийняла рішення від 30.07.2021 «Про стан водних ресурсів України», яке введено в дію Указом Президента України від 13.08.2021 № 357/2021. На виконання цього Указу Постановою Кабінету Міністрів України від 03 листопада 2021 року була № 1211 утворена Міжвідомча координаційна рада з питань водних ресурсів України. Досягнення доброго стану водної безпеки України до 2030 року стане можливим у разі виконання наступних завдань: забезпечити загальний і рівноправний доступ до безпечної та економічно доступної питної води для всіх; забезпечити загальний і рівноправний доступ до належних санітарно-гігієнічних засобів, приділяючи особливу увагу вразливим верствам населення; підвищити якість природних вод шляхом зменшення забруднення, ліквідації скидання відходів і мінімізації викидів небезпечних хімічних речовин і матеріалів, скорочення вдвічі частки неочищених стічних вод і значного збільшення масштабів рециркуляції та безпечної повторного використання стічних вод; істотно підвищити ефективність водокористування в усіх секторах і забезпечити збалансованість забору та подачі

прісної води для вирішення проблеми її нестачі та значного скорочення кількості осіб, які страждають від нестачі води; забезпечити інтегроване управління водними ресурсами на всіх рівнях, залучати за необхідності, транскордонне співробітництво; забезпечити охорону і відновлення екосистем, пов'язаних з водою, зокрема гір, лісів, водно-болотних угідь, річок, водоносних горизонтів, озер; забезпечити істотне зменшення ризиків паводків та інших проявів шкідливої дії вод; розширити міжнародне співробітництво та підтримку зміцнення потенціалу України щодо здійснення діяльності та виконання програм у галузі водопостачання і санітарії.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

У роботах [1-5] показано, що при вирішенні завдань оцінки стану та управління складними соціотехнічними системами, до яких належить досліджуваний клас систем, хороших результатів вдається досягти при об'єднанні методологій класичної теорії розпізнавання образів, теорії нечіткої логіки прийняття рішень Л. Заде, теорії впевненості Є. Шортліфа та пошукового аналізу із синтезу гібридних моделей прийняття рішень у гетерогенному просторі ознак. Такий тип моделей є основою побудови бази знань інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень фахівців екологів. Ця система є ядром інтелектуальної системи, до складу якої входять: підсистема збирання та попереднього оброблення даних, що складається з рухомих та стаціонарних станцій, система передачі даних та інтелектуальна СППР [6, 7]. Інтелектуальна СППР вирішує завдання вибору раціональних схем розміщення стаціонарних станцій спостереження та раціональних маршрутів пересування мобільних лабораторій стану довкілля, оцінки ризику розвитку несприятливих екологічних ситуацій, оцінки ризику виникнення, розвитку та рецидивів загострення захворювань людини та тварин, що викликаються шкідливим впливом екологічних факторів, формування раціональних схем управління екологічною безпекою.

Науково-прикладна проблема полягає в необхідності підвищення ефективності існуючих технологій забезпечення водної безпеки та забез-

печенні своєчасного та обґрунтованого прийняття ефективних управлінських рішень в умовах змін клімату.

Метою дослідження є створення методологічних основ побудови та використання інтелектуальної системи забезпечення водної безпеки, що заснована на використанні штучного інтелекту.

### **Результати досліджень**

Сучасне розуміння водної безпеки не може бути сформоване без участі та спільного усвідомлення всіма основними водокористувачами та водоспоживачами, іншими заінтересованими сторонами, що в Україні вода є обмеженим ресурсом через нерівномірний природний розподіл водних (поверхневих та підземних) ресурсів по території країни та у часі, так і через обмеженість доступу до води через неналежне управління цим ресурсом.

Існуюча система управління водними ресурсами є неефективною через невирішеність та неврегульованість цілого ряду питань, а саме через відсутність:

- цілісної державної водної політики та єдиного уповноваженого органу відповідального за її формування та реалізацію;
- розмежування функцій управління водними ресурсами та надання послуг екосистемного водокористування);
- повноважень існуючих басейнових рад щодо здійснення ними інтегрованого управління водними ресурсами;
- повноцінного залучення водокористувачів до управління водними.

### **Структура системи та її математичне забезпечення**

Сучасні біотехнічні технології, орієнтовані на екологічні програми дозволяють контролювати стан навколишнього середовища за допомогою інтелектуальних датчиків, що реєструють різні показники, що характеризують ступінь забруднення води, повітря та ґрунту. Ці датчики розміщуються на стаціонарних постах та працюють у мобільних лабораторіях. «Інтелектуальні» ме-



Рисунок 2. Структурна схема інтелектуальної системи підтримки ухвалення екологічних рішень для забезпечення водної безпеки

ханізми датчиків забезпечують їхню адаптацію до різних умов вимірювань, дозволяють дати користувачу попередню інформацію про стан навколишнього середовища в найбільш зрозумілій фахівцям екологічній формі, проводять автоматичне калібрування вимірювальної частини, парують різні типи навантажень і пошкоджень, готують інформацію для передачі в системі вищого рівня.

Структурна схема пропонованої системи інтелектуальної системи підтримки ухвалення екологічних рішень для забезпечення водної безпеки має вигляд, наведений на рисунку 2.

Інтелектуальним ядром системи є база знань, побудована на основі гібридних нечітких моделей, основу якої складають функції впевненості (приналежності) до досліджуваних класів станів навколишнього середовища, які агрегуються в проміжні та фінальні правила прийняття рішень з урахуванням структури даних, що характеризують екологічну обстановку.

Пропонується завдання синтезу гібридних вирішальних правил розглядати як завдання нечіткого поділу багатовимірних образів, що характеризують різні класи екологічного стану середовища та стан здоров'я людей, що контактують з цим середовищем.

У такій інтерпретації функції впевненості (приналежності)  $\mu(x_i)$  з базовими змінними по координатах простору ознак  $x_i$ , що описують стан досліджуваних образів за допомогою операції логічного множення, описують в багатовимірному просторі ознак нечіткий гіперпаралелепіпед, в який «вписаний» клас.

У такий спосіб впевненість  $U$  у класифікації  $\omega$  визначається виразом:

$$U = \min [\mu_1(x), \mu_2(x) \dots \mu_n(x)], \quad (1)$$

де  $n$ -розмірність простору ознак.

Для складних структур класів точність опису кожного з класів за допомогою цього виразу

(апроксимація одним нечітким гіперпаралелепіпедом) може виявитися недостатньою з точки зору класифікації. Більш точної апроксимації структур досліджуваних класів станів можна досягти, представляючи кожен із класів безліччю нечітких гіперпаралелепіпедів  $U[k]$ , де  $k=1, \dots, K$ . У такому варіанті впевненість у віднесенні об'єкта до класу визначається виразом:

$$U = \max [U(1), U(2), \dots, U(K)], \quad (2)$$

де кожна складова  $U[k]$  визначається виразом (1).

### Математична формалізація поняття функціональної стійкості водної екологічної системи

Для забезпечення безпеки водної екологічної системи пропонується розглядати позаштатні стани системи, викликані техногенними аваріями та природними катаклізмами, як допустимі, і для них формувати адекватне (функціонально стійке) управління, спрямоване на парирування наслідків несприятливих ситуацій та підтримку виконання функцій екологічної системи. За рахунок цього, управління забезпечується перерозподіл ресурсів екологічної системи задля досягнення головної мети, навіть за умов нештатних ситуацій.

Вперше поняття «функціональна стійкість», його визначення та принципові основи забезпечення функціональної стійкості були наведені у публікаціях, присвячених вирішенню конкретних завдань управління складними автономними об'єктами [6, 7]. Було встановлено, що важливою умовою забезпечення цієї якості є можливість перерозподілу наявних ресурсів усередині системи.

Дослідження, результати яких наведені в літературі [6, 7], показали, що технологічною основою забезпечення функціональної стійкості стало створення інформаційно-керуючих комплексів, які дозволили комплексувати ресурси системи (інформаційні, обчислювальні, енергетичні) та здійснювати їх перерозподіл. Тільки комплексування всіх ресурсів систем управління в єдиний інформаційно-керуючий комплекс, де інформаційно-вимірювальна підсистема включатиме всі

джерела інформації, пристрої перекодування та сполучення, обчислювальна система – усі обчислювачі, а енергетична підсистема – усі виконавчі механізми та джерела енергії дозволить забезпечити її функціональну стійкість.

Під функціональною стійкістю водної екологічної системи розумітимемо її властивість зберігати протягом заданого часу виконання своїх основних функцій у межах, встановлених нормативними вимогами, в умовах антропогенного фактору, техногенних аварій, а також розвитку природних процесів.

Розглянемо математичну формалізацію поняття «функціонально стійке управління» для водної екологічної системи в режимі стабілізації екологічних процесів, де водна екологічна система описується рівнянням у формі Ланжевена:

$$\dot{X}(t) = A(t) \cdot X(t) + \delta(t) + \xi(t) + \gamma(t); \quad (3)$$

інформаційно-вимірювальна підсистема (підсистема спостереження) – рівнянням спостережень:

$$Y(t) = H(t) \cdot X(t) + \eta(t) + \gamma(t), \quad (4)$$

де  $\tilde{O}(t)$ - $n$ -мірний вектор стану системи;  $U(t)$ - $m$ -мірний вектор управління;  $Y(t)$ - $l$ -мірний вектор спостережень;  $A(t)$  – динамічна матриця системи розмірністю  $n \times n$ ;  $H(t)$  – матриця спостережень системи розмірністю  $l \times n$ ;  $\gamma(t)$ - $n$ -мірний випадковий вектор, значення якого кількісно характеризує дію нештатної ситуації на систему,  $\gamma_0(t)$  – значення вектору, що відповідає нормальному режиму функціонування,  $\gamma_i(t)$  – відповідне  $i$ -ої позаштатної ситуації;  $\xi(t)$  – випадковий вектор гауссівських обурень стану системи з нульовим вектором середніх та кореляційних матриць:

$$\xi(t) \in \Omega_{\xi} : M[\xi(t)] = 0; \quad M[\xi(t) \cdot \xi^T(t')] = Q(t)\delta(t-t'), \quad (5)$$

$\eta(t)$  – випадковий  $l$ -мірний вектор гауссівських перешкод вимірювань із нульовим вектором середніх та кореляційною матрицею:

$$\eta(t) \in \Omega_{\eta} : M[\eta(t)] = 0; \quad M[\eta(t) \cdot \eta^T(t')] = R(t)\delta(t-t'); \quad (6)$$

обчислювальна та енергетична підсистеми відповідно до рівнянь:

$$U(t) = u(Y, t); \quad (7)$$

$$\delta(t) = B(t)U(t) + \gamma(t); \quad (8)$$

$B(t)$  – перехідна матриця управління розмірністю  $n \times m$ .

Розглядається випадок класичного квадратичного критерію якості, без термінальної складової:

$$I(X(t), U(t) / \gamma(t)) = M \left( \int_{t_0}^{t_k} X^T(t) \cdot \beta \cdot X(t) dt + \int_{t_0}^{t_k} U^T(t) \cdot C^{-1} \cdot U(t) dt \right). \quad (9)$$

У цих умовах управління  $U^*(t)$ , що забезпечує мінімум математичного очікування квадратичного критерію якості (7) для обраної моделі відмов  $\gamma(t) \in \Omega_\gamma$  з урахуванням обмежень на область допустимих станів  $X(t) \in \Omega_X$  та керувань  $U(t) \in \Omega_U$ , буде функціонально стійким при виконанні умов:

$$|I(X(t_0), U(t_0) / H_0(t_0)) - I(X(t_0), U(t_0) / H_i(t_0))| < \varepsilon \quad (10)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |I(X(t), U(t) / H_0(t)) - I(X(t), U(t) / H_i(t))| < \delta(\varepsilon) \quad (11)$$

Нерівності (10) та (11) формалізують умову функціональної стійкості управління комплексу (3–8). Якщо у початковий момент часу  $t_0$  відмова призводить до погіршення якості стабілізації не більше деякого позитивного значення  $\varepsilon$ , то функціонально-стійке управління має забезпечити зміну якості стабілізації не більше певного значення  $\delta$ , що залежить від  $\varepsilon$ .

Отже, забезпечення функціональної стійкості систем виходять за рамки традиційних для класичної теорії автоматичного регулювання задач оптимізації «у малому» (на заданій програмній траєкторії управління визначається з умови оптимізації перехідних процесів за тими чи іншими критеріями), оскільки передбачає неповну апріорну інформацію про об'єкт, оперативне формування програмної траєкторії для поточної обстановки та оптимальне використання всіх наявних ресурсів. Тому завдання забезпечення функціональної стійкості можна розглядати як вид завдань адаптивного оптимального управління «у великому», що передбачають оптимальне використання на кожному етапі або режимі функціонування системи всіх наявних ресурсів (енергетичних, інформаційних, обчислювальних), для досягнення головної для цього етапу мети при дотриманні безлічі обмежень.

Особливість методу синтезу функціонально-стійких водних екологічних систем полягає в тому, що при цьому не розглядаються процеси, що призвели до позаштатних екологічних ситуацій. Для формування спеціального управління, що відновлює процес нормального функціонування екосистеми, важливий сам факт порушення її функціонування.

Складність перевірки навіть достатніх умов керованості та спостерігальності модернізованої системи за відомими ранговими критеріями змусила шукати інші критерії функціональної стійкості. Особливе значення даного алгоритму полягає в тому, що він дозволив розділити загальне завдання синтезу функціонально стійких систем на приватні завдання: синтезу алгоритму виявлення виникнення нештатної ситуації та синтезу алгоритму парування її наслідків.

Пропонується розглядати екологічну систему як розподілену інформаційно-керуючу систему, яка є містить розосереджені на деякій території екологічного управління засоби автоматизованої обробки екологічної інформації для вирішення завдань накопичення, обробки, збереження та пересилання інформації. Така система складається з вузлів комутації та каналів (ліній) зв'язку між окремими елементами системи управління екологічною безпекою. Головною функцією системи є забезпечення елементів системи потенційною можливістю доступу до загальних інформаційних ресурсів. У сучасних умовах на розподілені інформаційно-керуючі системи негативно впливають як внутрішні (відмови, пошкодження, помилки персоналу), так і зовнішні (активний чи пасивний вплив довкілля) чинники.

### **Формалізація наукових проблем побудови та застосування системи забезпечення водної безпеки за методом забезпечення функціональної стійкості екосистем з використанням системи штучного інтелекту**

Наукові проблеми побудови та застосування системи забезпечення водної безпеки за методом забезпечення функціональної стійкості екосистем з використанням системи штучного інтелекту можливо формалізувати наступним чином.

**Перша проблема** пов'язана з необхідністю аналізу проблеми забезпечення водної безпеки за методом забезпечення функціональної стійкості екосистем в умовах змін клімату. Вирішення цієї проблеми передбачає системологічний огляд інструментів та методів оцінки стану водної безпеки, а також визначення особливості управління водними ресурсами за методом забезпечення функціональної стійкості екосистем з використанням штучного інтелекту. Також потрібно здійснити системний аналіз впливу змін клімату на стан водозабезпеченості територій України та шляхи підвищення ефективності управління водними ресурсами. В результаті будуть обґрунтовані особливості формування та впровадження інтегрованого управління водними ресурсами в Україні, що надає шляхи вирішення проблеми забезпечення водної безпеки за методом забезпечення функціональної стійкості екосистем з застосуванням інтелектуальних систем захисту водних ресурсів як складової інтелектуальної системи захисту навколишнього середовища.

**Друга проблема** передбачає необхідність розроблення концептуально-методичних основ забезпечення функціональної стійкості водних ресурсів з використанням інтелектуальних систем. Вирішення цієї проблеми передбачає визначення структури проблемної сфери та формалізацію концепції забезпечення функціональної стійкості водних ресурсів. Результатом вирішення цієї проблеми буде обґрунтована методика оцінки стану вод в басейнах річок України за фізико-хімічними показниками відповідно до стандартів ЄС з використанням інтелектуальних систем. На основі цієї методики доцільна побудова системи підтримки прийняття управлінських рішень при забезпеченні водної безпеки з використанням інтелектуальних систем.

**Третя проблема** пов'язана з розробленням моделі інтелектуальної системи управління водними ресурсами в умовах змін клімату. Вирішення цієї проблеми передбачає визначення джерел процесів в екосистемах для застосування в інтелектуальній системі управління водними ресурсами в умовах змін клімату та створення як моделей просторової складової процесів в системі управління водними ресурсами, так й моделей екологічних ризиків та загроз і ризиків в системі управління водними ресурсами. В цих моделях

бажано передбачити багаторівневі правдоподібні деревовидні мережі екопроцесів в інтелектуальній системі управління водними ресурсами.

**Четверта проблема** передбачає необхідність розроблення моделі динаміки екопроцесів в інтелектуальній системі управління водними ресурсами в умовах змін клімату середовища. Ця модель передбачає відпрацювання методики забезпечення національної водної безпеки з застосуванням систем штучного інтелекту, а також технології управління посухами в Україні з застосуванням систем штучного інтелекту в умовах змін клімату. Побудова інтелектуальної системи підтримки прийняття управлінських рішень дозволить забезпечити водну безпеку в умовах змін клімату.

**П'ята проблема** пов'язана з процедурами діагностики та прогнозування ситуацій в інтелектуальній системі підтримки прийняття управлінських рішень при забезпеченні водної безпеки. Вирішення цієї проблеми передбачає здійснення якісної оцінки та прогнозування небезпеки водних ресурсів, оцінки та прогнозування компонентів екологічного ризику і загроз. При цьому, діагностика та прогнозування ситуації у водних ресурсах на основі аналізу екологічного ризику здійснюється за допомогою технології забезпечення наявності та раціонального використання водних ресурсів і санітарії для всіх з використанням системи штучного інтелекту

**Шоста проблема** визначає необхідність оцінки ефективності застосування інтелектуальної системи управління водними ресурсами в умовах змін клімату середовища. Вирішення цієї проблеми передбачає формування структури комплексу інформаційних процесів в інтелектуальній системі управління водними ресурсами в умовах змін клімату середовища та обґрунтування функціонального і експлуатаційного призначення інтелектуальної системи управління водними ресурсами в умовах змін клімату середовища. В результаті буде сформовано архітектуру програмного продукту, а також склад і формат вхідних і вихідних даних. Обґрунтовані рекомендації щодо районування території України з використанням системи штучного інтелекту, а також концептуальні основи формування економічної вартості водних ресурсів дозволять удосконалити критерії та індикатори стану національної та секторальних водних безпек, орга-

нізації та ведення моніторингу для ефективного управління водними ресурсами.

На думку авторів вирішення зазначених проблем доцільно здійснювати шляхом застосування інструментального базису та технології штучного інтелекту та розробити дві моделі штучного інтелекту.

*Перша модель* – модель інтелектуальної системи управління водними ресурсами в умовах змін клімату. Така модель застосовує джерело процесів в екосистемах для застосування в інтелектуальній системі управління водними ресурсами в умовах змін клімату, яка, на відміну від існуючих моделей, дозволяє відображати різнобічну екологічну інформацію в інтелектуальній системі підтримки прийняття рішень в умовах неповної та неточної інформації.

*Друга модель* – модель динаміки екопроцесів в інтелектуальній системі управління водними ресурсами в умовах змін клімату середовища, яка на відміну від існуючих моделей, дозволяє забезпечити національну водну безпеку в умовах змін клімату з застосуванням систем штучного інтелекту а також дозволяє знизити обчислювальну складність та описувати події, що характеризуються неповними та недостовірними параметрами.

З застосуванням цих моделей доцільно відпрацьовувати метод забезпечення функціональної стійкості водних ресурсів з використанням інтелектуальних систем, що передбачає застосування множини зон з розмитими межами, які розташовані навколо контуру екологічного процесу і представляють собою водні ресурси з різним ступенем екологічної загрози. Застосування методу забезпечення функціональної стійкості дозволяє виконувати просторово-розподілену інтелектуальну оцінку ризику за фізико-хімічними показниками відповідно до стандартів ЄС, що є необхідною для діагностики поточної ситуації в умовах змін клімату.

Модель динаміки екопроцесів в інтелектуальній системі управління водними ресурсами доцільно застосовувати для відпрацьовування методу діагностики та прогнозування ситуацій в інтелектуальній системі підтримки прийняття управлінських рішень при забезпеченні водної безпеки. Це надає можливість надавати якісну оцінку та здійснювати прогнозування небезпе-

ки водних ресурсів, прогнозувати компоненти екологічного ризику та формувати технологію забезпечення наявності та раціонального використання водних ресурсів і санітарії для всіх з використанням системи штучного інтелекту та стимулює прийняття більш обґрунтованих рішень в умовах змін клімату.

Розроблення системи управління водною безпекою передбачає формування структури комплексу інформаційних процесів в інтелектуальній системі управління водними ресурсами, яка дозволяє визначити функціональне і експлуатаційне призначення інтелектуальної системи управління водними ресурсами в умовах змін клімату середовища. Структура комплексу визначає архітектуру програмного продукту, склад і формат вхідних і вихідних даних.

Застосування системи управління водною безпекою дозволяє отримувати організаційні управлінські рішення; удосконалювати критерії та індикатори стану національної та секторальних водних безпек, організації та ведення моніторингу для ефективного управління водними ресурсами; розробляти рекомендації щодо районування території України з використанням системи штучного інтелекту.

## Висновки

За результатами проведених наукових досліджень та розв'язання поставлених завдань авторами зроблені наступні висновки:

1. За результатами аналізу сучасного стану науково-технічних досягнень з питань побудови та застосування системи забезпечення водної безпеки за методом забезпечення функціональної стійкості екосистем з використанням системи штучного інтелекту визначено шляхи вирішення науково-прикладної проблеми розроблення теоретичних основ, інструментального базису та технології штучного інтелекту для підтримки прийняття рішень при забезпеченні водної безпеки в умовах змін клімату та надзвичайних ситуацій природного характеру.

2. Вирішення цієї проблеми потребує створення відповідних математичних моделей:

- модель інтелектуальної системи управління водними ресурсами в умовах змін клімату, що застосовує джерело процесів в екосисте-

мах для застосування в інтелектуальній системі управління водними ресурсами в умовах змін клімату, яка, на відміну від існуючих моделей, дозволяє відображати різномірну екологічну інформацію в інтелектуальній системі підтримки прийняття рішень в умовах неповної та неточної інформації;

- модель динаміки екологічних процесів в інтелектуальній системі управління водними ресурсами, яка на відміну від існуючих моделей, дозволяє забезпечити національну водну безпеку в умовах змін клімату з застосуванням систем штучного інтелекту а також дозволяє знизити обчислювальну складність та описувати процеси, що характеризуються неповними та недостовірними параметрами.

3. Із застосуванням цих моделей доцільно відпрацьовувати метод забезпечення функціональної стійкості водних ресурсів з використанням інтелектуальних систем, що передбачає застосування множини зон з розмитими межами, які розташовані навколо контуру екологічного процесу і представляють собою водні ресурси з різним ступенем екологічної загрози. Застосування методу забезпечення функціональної стійкості дозволяє виконувати просторово-розподілену інтелектуальну оцінку ризику за фізико-хімічними показниками відповідно до стандартів ЄС, що є необхідною для діагностики поточної ситуації в умовах змін клімату.

4. Модель динаміки екологічних процесів в інтелектуальній системі управління водними ресурсами дозволяє відпрацьовувати метод діагностики та прогнозування ситуацій в інтелектуальній системі підтримки прийняття управлінських рішень при забезпеченні водної безпеки. Це відповідно, надає можливість надавати якісну оцінку та здійснювати прогнозування небезпеки водних ресурсів, прогнозувати компоненти екологічного ризику та формувати технологію забезпечення наявності та раціонального використання водних ресурсів і санітарії для всіх з використанням системи штучного інтелекту, а також стимулює прийняття більш обґрунтованих рішень в умовах змін клімату.

5. Розроблення системи управління водною безпекою передбачає формування структури комплексу інформаційних процесів в інтелектуальній системі управління водними ресурсами, яка дозволяє визначити функціональне і експлу-

атаційне призначення інтелектуальної системи управління водними ресурсами в умовах змін клімату середовища. Структура комплексу визначає архітектуру програмного продукту, склад і формат вхідних і вихідних даних.

6. Застосування системи управління водною безпекою дозволяє: отримувати організаційні управлінські рішення, а також оцінювати недоотримані користі різним галузями економіки в умовах водонезабезпеченості регіонів та створювати економічні основи формування водної безпеки в Україні; удосконалювати критерії та індикатори стану національної та секторальних водних безпек, організації та ведення моніторингу для ефективного управління водними ресурсами; розробляти рекомендації щодо районування території України з використанням системи штучного інтелекту.

### Список використаних джерел

1. Барабаш О., Козелков С., Машков О. Понятійний апарат функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем. Збірник наукових праць НЦ ВПС ЗС України. 2005. Вип. №7. С. 87–95.

2. Парадигма обробки інформації в інтелектуальній інформаційній системі для підтримки прийняття рішень в галузі екологічної безпеки / О. Бондар та ін. Екологічні науки: науково-практичний журнал. 2023. Вип. 4 (49). С. 144–152.

3. Концепція створення інтелектуальної інформаційної системи для підтримки прийняття рішень у галузі екологічної безпеки / О. Бондар та ін. Екологічні науки: науково-практичний журнал. 2023. Вип. 3 (48). С. 7-16.

4. Nils J. Nilsson. The Quest for Artificial Intelligence. Cambridge University Press. 2019. 578 s. (ISBN 978-0521116398).

5. Stuart J. Russell, Peter Norvig . Artificial Intelligence: A Modern Approach. 2015. 300 s. (ISBN 978-9332543515).

6. Машков О., Машков В. Забезпечення відмовостійкості складних систем на основі їх самодіагностування за принципом блукаючого ядра. Кібернетика та обчислювальна техніка. 1998. Вип. 116. С. 103–111.

7. Машков О., Машков В. Принципи функціональної стійкості складних систем. Наука і оборона. 1995. вип. 2. С. 37–44.