

УДК 519.87

DOI [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2026.48\(1\).186-195](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2026.48(1).186-195)**М. М. Маляр¹, І. І. Половко², М. М. Шаркаді³**

¹ ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,
професор кафедри кібернетики і прикладної математики,
доктор технічних наук

mykola.malyar@uzhnu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2544-1959>

² ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,
аспірант кафедри кібернетики і прикладної математики
polovko.ivan@uzhnu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7128-4846>

³ ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,
доцент кафедри кібернетики і прикладної математики,
кандидат економічних наук

marianna.sharkadi@uzhnu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1850-996X>

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ В ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНИХ СИСТЕМАХ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Використання інтелектуальних інформаційних систем широко розповсюджене в різних галузях, включаючи бізнес, медицину, фінанси, науку, екологію та багато інших сфер. Дослідження та розробки управлінських інтелектуальних систем будуть і надалі використовувати нові технологічні рішення та отримувати вигоду з прогресу у створенні великих баз даних, штучного інтелекту, взаємодії людини з комп'ютером, моделювання та оптимізації, розробки програмного забезпечення, телекомунікацій. Охарактеризовано розроблений авторами математичний апарат, який дає змогу формалізувати невизначеності та багаторівневі взаємозв'язки, забезпечуючи ефективне розв'язання задач оптимізації. Отримані результати створюють підґрунтя для подальших досліджень у напрямі розширення сфер застосування, вдосконалення моделей та інтеграції з сучасними цифровими платформами. У роботі запропоновано використання апарату нечіткої математики, що дозволяє в більшій мірі врахувати той факт, що складові іміджу регіону є слабкоформалізованими якісними змінними.

Ключові слова: інформаційно-аналітична система, якість водних ресурсів, нечітка логіка, теорія нечітких множин, екологічна оцінка, функції належності, база знань, прийняття рішень.

1. Вступ. Сучасні тенденції розвитку методів штучного інтелекту (ШІ) сприяють активній інтеграції інформаційних технологій у всі сфери людської діяльності. Швидкий розвиток інформаційних технологій різко збільшує обсяги даних, які накопичуються дослідниками в різних галузях людської діяльності.

Створення більш точних моделей процесів, що протікають у складних соціоорієнтованих системах, під впливом сукупності різного роду факторів зовнішнього та внутрішнього оточення, є використання технологій ШІ, ключовою особливістю якого є здатність навчатися, накопичувати знання та їх застосовувати.

2. Постановка задачі. Пропонується структура інформаційно-аналітичної системи для визначення рівня якості водних ресурсів на основі теорії нечітких множин.

3. Методи і матеріали. Для вирішення важливих питань аналізу даних та подання знань в умовах невизначеності, а саме виявлення прихованих правил і залежностей; добування, подання та обробка недовизначених знань, які отримують за допомогою експертів, або знань, одержаних у результаті обробки експериментальних даних доцільно створювати і використовувати інформаційно-аналітичні системи (ІАС). ІАС — це сукупність інтелектуальних інформаційних застосувань та інструментальних засобів, які використовуються для маніпулювання даними, їхнього аналізу і надання результатів такого аналізу кінцевому користувачеві. Методологічною основою та потужним інструментом при проведенні аналітичної роботи є системний аналіз.

Функціонування ІАС розділяється на два рівні:

- інформаційний рівень, що полягає в пошуку, збиранні, зберіганні, поширенні інформації;
- аналітичний рівень, що полягає в узагальненні, класифікації інформації, її аналізі і перетворенні, розробці висновків, пропозицій, рекомендацій і прогнозів.

Як правило, дані які отримують за допомогою експертів містять різні види невизначеностей і відповідно знання, що є результатом обробки експериментальних даних, містять значну кількість шумів. Для роботи з такою інформацією пропонується використати апарат нечіткої математики [1], що є найбільш пристосованим для відображення і обробки таких даних.

Завдяки апарату нечіткої математики є можливість представляти знання у вигляді правил у нечітких базах знань, що дозволяє будувати нечіткі логічні системи якісного відображення предметної області на основі методів нечіткого моделювання.

Виходячи із системного підходу основними компонентами ІАС, як правило, можуть вважатись наступні елементи: база показників для оцінки суб'єкта дослідження предметної області [2]; база нормативно-методичних матеріалів [3]; база моделей відображення даних [4]; база методів обробки даних [5]; база знань.

Зазначимо, що оцінювання є головною складовою діагностики стану якості водних ресурсів. Оцінювання — це процес, який включає: визначення ключових ознак, характеристик, параметрів (показників, індикаторів), властивостей; вибір методів (сукупності методів) оцінювання і, як результат, одержання оцінок (якісних і кількісних, локальних та інтегральних).

4. Опис проблеми. Екологічний контекст якості поверхневих вод.

Якість води є фундаментальною характеристикою, що визначає ступінь відповідності її властивостей потребам людини та технологічним вимогам, а також, що найважливіше, її здатність підтримувати здорові водні екосистеми. Ця характеристика не є статичною; вона є результатом складної взаємодії природних процесів та антропогенного впливу. Хоча природний хімічний склад води визначається геологічними та кліматичними умовами, основною загрозою для водних ресурсів, особливо в промислово розвинених країнах, як-от Україна, є антропогенне забруднення.

Забруднювачі, що потрапляють у поверхневі води, можна систематизувати за їхньою природою на хімічні (неорганічні та органічні сполуки), фізичні (теплове, радіаційне забруднення) та біологічні (патогенні мікроорганізми, віруси).

Джерела цих забруднень в Україні є різноманітними та системними, що створює комплексні виклики для моніторингу та управління водними ресурсами.

Основні джерела забруднення поверхневих вод в Україні

Комунально-побутові стічні води. Це одне з найпотужніших джерел забруднення. Побутові стоки містять значну кількість органічних речовин, біогенних елементів (сполуки азоту та фосфору), а також синтетичних поверхнево-активних речовин (СПАР) від мийних засобів. Надходження цих речовин, особливо фосфатів, у водойми провокує процес евтрофікації — бурхливого розвитку синьо-зелених водоростей («цвітіння» води), що призводить до дефіциту кисню, замору риби та загальної деградації екосистеми. Парадоксально, але найбільшими точковими забруднювачами часто є самі водоканали. Їхні очисні споруди, спроектовані десятиліття тому, не розраховані на сучасні обсяги та хімічний склад стоків, що призводить до скидання недостатньо очищеної води безпосередньо у річки, зокрема у Дніпро. Це свідчить не про поодинокі збої, а про системну невідповідність застарілої інфраструктури сучасним соціально-економічним реаліям. Отже, проблема полягає не лише в очищенні, а й у необхідності зменшення обсягів та токсичності стоків біля їхнього джерела.

Аграрний сектор. Дифузне (площинне) забруднення від сільськогосподарської діяльності є ще одним значним фактором. Інтенсивне використання мінеральних добрив (що містять нітрати та фосфати) та пестицидів призводить до їх змиву з полів дощовими та талими водами. Ці речовини потрапляють у ґрунтові води, а звідти — у річки, спричиняючи хімічне забруднення на великих територіях. Неналежне поводження з відходами тваринництва також додає до цього навантаження, збагачуючи води органічними речовинами та патогенами.

Промислові скиди. Промислові центри, розташовані вздовж великих річок, таких як Дніпро, є джерелами високотоксичних забруднень. Підприємства металургії, хімічної та нафтопереробної промисловості скидають у водойми важкі метали (мідь, цинк, свинець, ртуть), нафтопродукти, феноли та інші специфічні токсичні сполуки. Ці речовини здатні накопичуватися в донних відкладеннях та живих організмах, спричиняючи довготривалі негативні наслідки для екосистем.

Інші джерела. Додатковий внесок у забруднення роблять теплове забруднення від скиду охолоджувальних вод ТЕС та АЕС, що змінює термічний режим водойм; атмосферне перенесення забруднювачів з подальшим випадінням у вигляді кислотних дощів; а також несанкціоноване скидання твердих побутових та будівельних відходів у річки та їхні заплави.

Традиційний поділ на точкові (труба заводу) та дифузні (стік з поля) джерела забруднення ускладнюється сучасною практикою. Наприклад, незаконні врізки автомийок чи інших підприємств у системи дощової каналізації перетворюють розподілене забруднення на мережу неконтрольованих точкових скидів токсичних речовин. Це вимагає розробки інформаційних систем, здатних виявляти не лише явні, а й приховані джерела впливу шляхом аналізу поступових змін якості води вздовж течії річки.

Нормативна база даних: основа для оцінки

Для створення об'єктивної інформаційної системи оцінки якості води необхідна чітко структурована нормативна база. Ця база є еталоном, з яким порівнюються фактичні вимірювання, і слугує основою для подальшого аналізу.

Вона формалізує екологічні стандарти у вигляді конкретних числових меж для кожного класу якості.

На основі «Методики екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями» [6], зокрема таблиць 2.7 та 2.8 з наданих матеріалів, було сформовано базу даних з 13 найбільш впливових показників. Вибір цих індикаторів обґрунтований їхньою екологічною значущістю та здатністю характеризувати різні аспекти стану водної екосистеми:

4.1. Кисневий режим та органічне забруднення.

Ці показники є фундаментальними, оскільки кисень необхідний для дихання більшості водних організмів, а його вміст безпосередньо пов'язаний з рівнем органічного забруднення.

- **Розчинений кисень, мг $O_2/дм^3$.** Найважливіший показник здоров'я водойми. Низький вміст кисню (гіпоксія) призводить до загибелі риби та інших організмів.
- **БСК₅ (Біохімічне споживання кисню), мг $O_2/дм^3$.** Класичний індикатор забруднення органічними речовинами (наприклад, стічними водами). Він показує, скільки кисню споживають мікроорганізми для розкладання цієї органіки. Високе значення БСК₅ веде до швидкого виснаження запасів кисню.
- **Біхроматна окислюваність (ХСК), мг $O_2/дм^3$.** Подібно до БСК₅, цей показник вимірює органічне забруднення, але включає також важкоокислювані речовини промислового походження. Дає більш повну картину забруднення органікою.

4.2. Біогенне забруднення (Евтрофікація).

Азот і фосфор є ключовими біогенними елементами. Їх надлишок, зазвичай через стічні води та змив добрив з полів, викликає "цвітіння" води — бурхливий розвиток водоростей, що призводить до кисневого виснаження та деградації екосистеми.

- **Азот амонійний, мгN/дм³.** Вказує на свіже забруднення, переважно господарськими або тваринницькими стоками. У високих концентраціях є токсичним для риб.
- **Азот нітратний, мгN/дм³.** Характеризує більш старе забруднення або надходження з сільськогосподарських угідь. Є основним "добривом" для водоростей.
- **Фосфор фосфатів, мгP/дм³.** Часто є лімітуючим фактором для росту водоростей у прісних водоймах. Навіть незначне збільшення концентрації фосфатів може спровокувати інтенсивне "цвітіння" води.

4.3. Загальні фізико-хімічні показники.

Ці параметри описують базові властивості водного середовища.

- **pH.** Рівень кислотності чи лужності води. Відхилення від нейтральних значень (6.5–8.5) є згубним для більшості організмів і може свідчити про промислове забруднення.
- **Завислі речовини, мг/дм³.** Впливають на прозорість води, обмежуючи фотосинтез. Можуть забивати зябра риб і свідчити про ерозію ґрунтів або скидання неочищених стоків.

4.4. Специфічні токсичні забруднювачі.

Ця група включає речовини, які є вкрай токсичними навіть у мікроскопічних концентраціях і вказують на промислове, транспортне або комунальне забруднення.

- **Нафтопродукти, мкг/дм³.** Поширений забруднювач, що потрапляє у воду з промисловими стоками, змивами з доріг. Утворює плівку на поверхні води, порушуючи газообмін, і є токсичним.
- **Свинець, мкг/дм³.** Високотоксичний важкий метал, що має здатність до накопичення в живих організмах. Джерела: промисловість, старі трубопроводи, викиди транспорту.
- **Ртуть, мкг/дм³.** Один з найнебезпечніших забруднювачів через свою надзвичайну токсичність і здатність до біоаккумуляції в харчових ланцюгах.
- **Феноли, мкг/дм³.** Вказують на забруднення стоками хімічних, коксохімічних та деревообробних підприємств. Є токсичними для водних організмів.

СПАР (Синтетичні поверхнево-активні речовини), мкг/дм³. Потрапляють у водойми з мийними засобами. Порушують природні властивості води та є токсичними для гідробіонтів.

Моделювання екологічної невизначеності: побудова нечітких функцій належності

Традиційні системи оцінки, що базуються на жорстких порогових значеннях, не враховують невизначеність та неоднозначність, притаманні екологічним даним. Вода не є просто «чистою» або «брудною»; вона може бути «трохи забрудненою» або «майже чистою». Нечітка логіка надає математичний апарат для роботи з такими лінгвістичними поняттями, моделюючи плавні переходи між станами. Основою цього підходу є процес фазифікації — перетворення точного числового вимірювання (наприклад, концентрації забруднювача) у набір ступенів належності до визначених лінгвістичних термів.

Цей процес реалізується за допомогою функцій належності (membership functions, MF). Функція належності, що позначається як $\mu(x)$, є кривою, яка відображає кожне значення з універсуму міркувань (наприклад, діапазону можливих концентрацій) у число від 0 до 1. Це число, ступінь належності, показує, наскільки істинним є твердження, що дане значення належить до певної нечіткої множини (лінгвістичного терміну).

Для прикладу, взявши значення показника «Розчинений кисень», можемо побудувати функцію належності для всіх класів даного показника. Вона буде мати вигляд S-лінійної функції, де значення функції належності μ яке буде йти до 0 буде найгіршим і буде відповідати класу 5, а значення яке буде приближатись до 1, буде найкращим і буде відповідати класу 1.

Принцип оцінки та формування бази знань

При класичній (або "жорсткій") оцінці якості поверхневих вод за нормативними таблицями (як-от Таблиця 2.7) [6], аналіз проводиться на основі *принципу граничного фактору*. Це означає, що загальний клас якості водного об'єкта визначається за *найгіршим показником* серед усіх виміряних параметрів.

Наприклад, якщо за результатами аналізу 12 з 13 показників відповідають "Класу I" (дуже добра якість), але один показник (наприклад, БСК₅) потрапляє

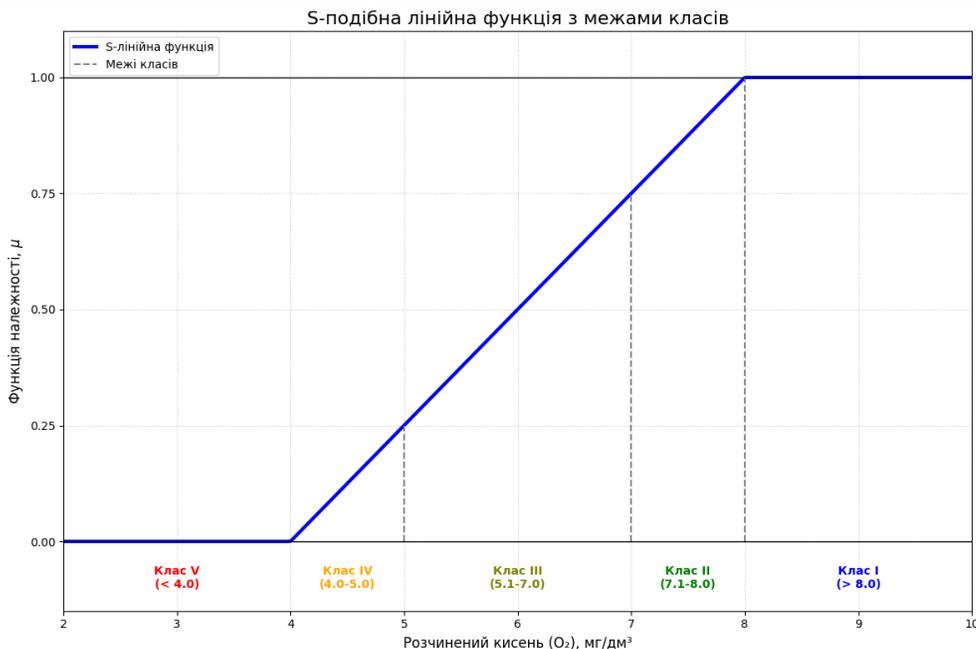


Рис. 1. Функція належності для розчинного кисню.

у "Клас II" (добра якість), то загальний висновок для всього водного ресурсу буде "Клас II". Якщо хоча б один показник потрапить у "Клас V" вся водойма буде віднесена до "Класу V" незалежно від того, наскільки чистими є інші 12 параметрів.

Цей підхід є простим, але дуже консервативним. Для більш гнучкої та комплексної оцінки, яка враховує взаємний вплив показників, часто застосовують системи нечіткого виведення (СНВ) або експертні системи. Основою такої системи є база знань (БЗ), яка складається з набору логічних правил формату "ЯКЩО ... ТО ...".

Ці правила імітують процес прийняття рішень експертом-гідрохіміком, дозволяючи враховувати не лише екстремальні, але й проміжні стани екосистеми. Нижче наведено приклад бази знань, побудованої на основі ключових показників якості води.

Для правил використовуються лінгвістичні оцінки для вхідних показників, які відповідають класам з Таблиці 2.7 [6]:

- *Дуже добрий* (Відповідає Класу I);
- *Добрий* (Відповідає Класу II);
- *Задовільний* (Відповідає Класу III);
- *Поганий* (Відповідає Класу IV);
- *Дуже поганий* (Відповідає Класу V).

Визначення категорії якості води

Також, окрім класів, існують категорії, а саме 7 категорій [6]:

- *Відмінні.*
- *Дуже добрі.*
- *Добрі.*
- *Задовільні.*

Таблиця 1.

Профіль бази знань

№ Правила	Опис логічного правила	Назва правила
1	ЯКЩО Розчинений кисень = Дуже добрий ТА БСК ₅ = Дуже добрий ТА Азот амонійний = Дуже добрий ТО Якість води = Клас I	Rule 1
2	ЯКЩО Розчинений кисень = Дуже поганий АБО рН = Дуже низький (V) АБО рН = Дуже високий (V) ТО Якість води = Клас V	Rule 2
3	ЯКЩО Розчинений кисень = Добрий ТА БСК ₅ = Добрий ТА Фосфати = Добрий ТО Якість води = Клас II	Rule 3
4	ЯКЩО Азот амонійний = Поганий АБО Фосфати = Поганий ТО Якість води = Клас IV	Rule 4
5	ЯКЩО БСК ₅ = Задовільний ТА ХСК = Задовільний ТА Розчинений кисень = Задовільний ТО Якість води = Клас III	Rule 5
6	ЯКЩО Свинець = Високий (IV-V) АБО Ртуть = Висока (IV-V) ТО Якість води = Клас V	Rule 6
7	ЯКЩО Нафтопродукти = Поганий АБО Феноли = Поганий ТО Якість води = Клас IV	Rule 7
8	ЯКЩО БСК ₅ = Дуже поганий ТА Азот амонійний = Дуже поганий ТО Якість води = Клас V	Rule 8
9	ЯКЩО Завислі речовини = Задовільний ТА Фосфати = Задовільний ТО Якість води = Клас III	Rule 9
10	ЯКЩО Розчинений кисень = Добрий ТА БСК ₅ = Задовільний ТА Азот амонійний = Добрий ТО Якість води = Клас II	Rule 10

- *Посередні.*
- *Погані.*
- *Дуже погані.*

Вони безпосередньо пересікаються з 5-ма класами, які були вказані раніше. Тобто, в 1 клас входить 1-ша категорія, в 2 клас — 2 і 3, в 3 клас — 4 і 5, в 4 клас — 6, і в 5 клас — 7.

Таблиця 2

Клас якості вод	I		II		III		IV	V
Категорія якості води	1	2	3	4	5	6	7	
Назва класів і категорій якості вод за їх станом	Відмінні	Добрі		Задовільні		Погані	Дуже погані	
	Відмінні	Дуже добрі	Добрі	Задовільні	Посередні	Погані	Дуже погані	

На основі наведеної інформації запропонована модель функції належності для визначення відповідної категорії (рис. 2).

Для прикладу, якщо взяти значення розчиненого кисню 6.5, то бачимо, що він попадає в 3 клас і до 4 категорії відповідно.

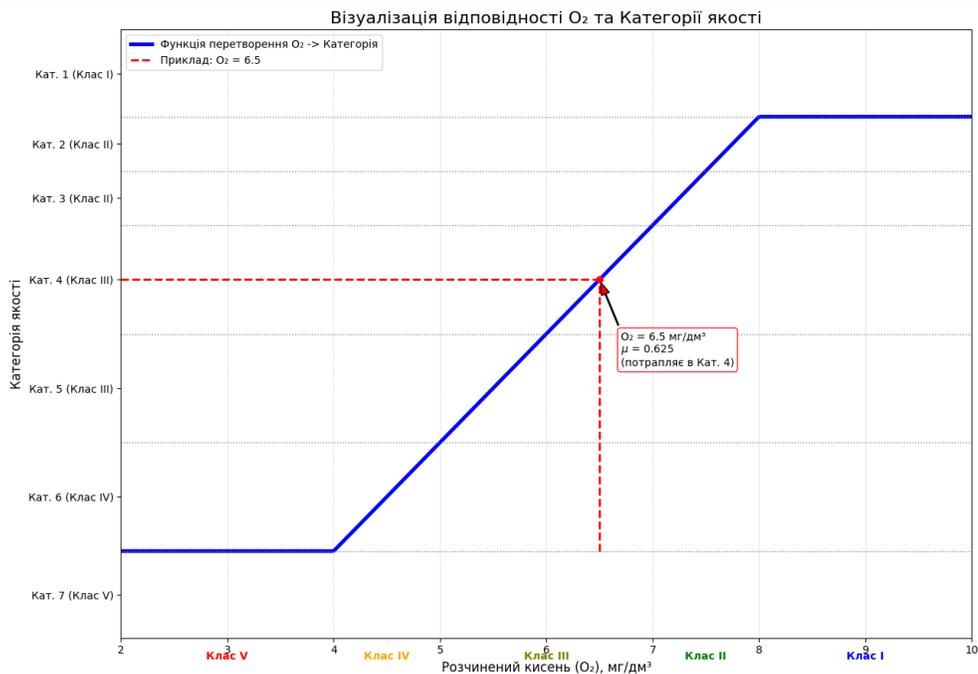


Рис. 2. Функція належності з категоріями.

Даний підхід дає можливість доповнення інформаційної моделі новими факторами, а нечітких баз знань — новими правилами, що надає моделі властивостей гнучкості та адаптивності до динамічних змін.

5. Висновки. Загалом, інтелектуальні інформаційні системи відіграють ключову роль у сучасному світі, допомагаючи організаціям та індивідуумам ефективно використовувати доступні дані для досягнення своїх цілей і вирішення складних завдань. Вони є невід’ємною складовою частиною цифрової епохи, в якій ми живемо, і відіграють ключову роль у подальшому розвитку технологій та суспільства.

Моделювання оцінювання якості водних ресурсів успішно виконується з використанням доступної експертно-лінгвістичної інформації у вигляді правил “ЯКЩО –ТО”, які пов’язують логічні терми вхідних і вихідних змінних. У результаті отримано аналітичні моделі функцій належності експертних нечітких баз знань, які впливають на оцінювання і прогнозування якості водних ресурсів. Запропонована методика служить комплексним інструментом для експерта проекту щодо оцінювання та прогнозування якості водних ресурсів та дає змогу отримати незалежні управлінські рішення з урахуванням кількісних та якісних збурювальних факторів, що впливають на якість водних ресурсів. Отримані результати створюють підґрунтя для подальших досліджень у напрямі розширення сфер застосування, вдосконалення моделей та інтеграції з сучасними цифровими платформами.

Конфлікт інтересів

Маляр Микола Миколайович, головний редактор та Шаркаді Маріанна Миколаївна, членкиня редакційної колегії, є авторами цієї статті та не брали участі

в редакційному розгляді й ухваленні рішення щодо рукопису. Опрацювання рукопису здійснювалося незалежним редактором. Інші редактори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування

Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної теми Ужгородського національного університету “Методи обчислювального інтелекту для обробки і аналізу даних” (номер державної реєстрації 0121U109279).

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті рукопису.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні даної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Внесок авторів

Маляр М. М.: адміністрація проекту, постановка проблеми, супервізія; Половко І. І.: реалізація етапів дослідження, інформаційне наповнення моделей, реалізація моделі та методів логічного висновку, інтерпретація отриманих результатів та підготовка публікації до друку; Шаркаді М. М.: концептуалізація проблеми, розробка підходу до моделювання проблеми, розробка нечіткої моделі та методу дослідження, рецензування та редагування і підготовка публікації до друку.

Авторські права ©



(2026). Маляр М. М., Половко І. І., Шаркаді М. М. Ця робота ліцензується відповідно до Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Список використаної літератури

1. Zimmermann, H. J. (2001). *Fuzzy set theory—and its applications*. Springer Science & Business Media, 141–182.
2. Klymenko, M. O., Pryshchepa, A. M., & Voznyuk, N. M. (2006). *Environmental monitoring: Textbook*. Kyiv: Akademiia [in Ukrainian].
3. Mokin, V. B., Poplavsky, A. V., Yashcholt, A. R., & Botsula, M. P. (2015). *Technologies for processing and modeling environmental and economic information — Electronic textbook*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
4. Shipulin, V. D. (2010). *Basic principles of geographic information systems: textbook*. Kharkiv National Academy of Municipal Economy. Kharkiv: KNAME [in Ukrainian].
5. Bidyuk, P. I., & Korshevnyuk, L. O. (2010). *Designing computer information systems for decision support: Textbook*. Kyiv: NNK “IPSA” NTUU “KPI” [in Ukrainian].

6. Vasenko, O. G., Rybalova, O. V., Artemiev, S. R., Gorbany, N. S., Korobkova, G. V., Polozentseva, V. O., Kozlovska, O. V., Matsak, A. O., & Savichev, A. A. (2015). *Integral and comprehensive assessments of the state of the natural environment: monograph*. Kharkiv: NUGZU, 76–101.

Malyar M. M., Polovko I. I., Sharkadi M. M. Application of fuzzy logic in information and analytical systems of environmental monitoring.

The use of intelligent information systems is widespread in various fields, including business, medicine, finance, science, ecology, and many other areas. Research and development of intelligent management systems will continue to use new technological solutions and benefit from advances in the creation of large databases, artificial intelligence, human-computer interaction, modeling and optimization, software development, and telecommunications. The authors describe a mathematical apparatus that allows for the formalization of uncertainties and multi-level interrelationships, ensuring the effective solution of optimization problems. The results obtained lay the foundation for further research in the direction of expanding the scope of application, improving models, and integrating with modern digital platforms. The paper proposes the use of fuzzy mathematics, which allows for greater consideration of the fact that the components of a region's image are weakly formalized qualitative variables.

Keywords: information and analytical system, water resource quality, fuzzy logic, fuzzy set theory, environmental assessment, membership functions, knowledge base, decision making.

Отримано: 27.11.2025

Прийнято: 17.12.2025

Опубліковано: 29.01.2026