

УДК 519.87

DOI [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2025.47\(2\).224-230](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2025.47(2).224-230)**І. І. Половко¹, М. М. Шаркаді²**

¹ ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,
аспірант кафедри кібернетики і прикладної математики
polovko.ivan@uzhnu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7128-4846>

² 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 МОДЕЛЕЙ НЕЧІТКОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ В ЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

У статті розглянуто застосування методів нечіткої класифікації для оцінювання якості водних ресурсів. Запропоновано використання S- та Z-лінійних функцій належності для моделювання екологічних показників. Продемонстровано побудову нечіткого класифікатора та його ефективність для діагностики стану поверхневих вод. Отримані результати підтверджують, що нечітка логіка дозволяє інтегрувати фізико-хімічні, гідробіологічні та токсикологічні показники у єдину систему.

Ключові слова: нечітка класифікація, екологічні дослідження, якість води, функції належності, S-лінійна функція, Z-лінійна функція.

1. Вступ. Екологічні проблеми сьогодні стають дедалі гострішими та актуальнішими. Глобальні зміни клімату, зростання інтенсивності забруднення навколишнього середовища, деградація ґрунтів, виснаження водних і біологічних ресурсів вимагають комплексного підходу до моніторингу, оцінки та прогнозування стану довкілля. Серед інструментів, що забезпечують системне вивчення цих процесів, важливе місце займає математичне моделювання, яке дозволяє описувати складні природні й антропогенні взаємодії, прогнозувати їхню динаміку та оцінювати наслідки різних сценаріїв впливу.

Математичні моделі дають змогу встановлювати приховані залежності між чинниками забруднення, оцінювати потенційні ризики та обґрунтовувати управлінські рішення як на локальному, так і на регіональному чи глобальному рівнях. Розвиток цифрових технологій, зростання обчислювальної потужності та доступ до великих масивів відкритих екологічних даних зробили моделювання гнучким і доступним методом наукового дослідження.

На сучасному етапі розвитку важко уявити функціонування інформаційних систем у різних сферах людської діяльності (науці, техніці, економіці, медицині, промисловості тощо) без застосування інтелектуальних технологій. Інформаційні системи орієнтовані на використання та акумуляцію знань, що формуються фахівцями відповідних галузей і подаються у вигляді професійних термінів та лінгвістичних конструкцій. Як правило, такі знання мають характер тверджень із нечітко окресленими межами або висловлювань, які допускають багатозначність у шкалі значень істинності. У зв'язку з цим сучасні методологічні підходи до моделювання станів складних систем за умов неповної визначеності вхідних

даних ґрунтуються на використанні апарату теорії нечітких множин та концепції лінгвістичних змінних[1].

2. Математична постановка задачі. Діагностика екологічного стану навколишнього середовища може бути сформульована як задача класифікації. Така задача може бути розв'язана шляхом знаходження відповідного класифікатора, тобто математичної функції F , яка ставить у відповідність множині ознак $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} = \{x_i, i = \overline{1, n}\}$ певну мітку класу k_j :

$$F(X) : X \rightarrow k_j.$$

Пропонується у вигляді класифікатора використати підхід нечіткого моделювання, який базується на даних спостереження. Такий підхід дозволяє дотриматись компромісу між точністю класифікації та інтерпретацією отриманого результату.

Задача класифікації полягає в передбаченні класу об'єкта за його вектором значень ознак.

Нехай задана множина ознак $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} = \{x_i, i = \overline{1, n}\}$ і множина класів $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\} = \{k_j, j = \overline{1, m}\}$.

Нечіткий класифікатор представляється у вигляді функції, яка присвоює точці із простору вхідних ознак мітку класу з обчисленим ступенем упевненості:

$$F(X) : X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow [0, 1]^n.$$

Основою нечіткого класифікатора являється продукційне правило наступного вигляду:

$$R_{pj} : \text{Якщо } x_1 = A_{1j} \ \& \ x_2 = A_{2j} \ \& \ \dots \ \& \ x_{nj} = A_{nj} \ \text{Тоді } class = k_j,$$

де A_{ij} — лінгвістичний терм, який характеризує i -у ознаку в j -у правилі та визначений своєю функцією належності $\mu_{A_{ij}}(x_i)$ в точці x_i , $p = \overline{1, P}$, P — число правил.

Клас визначається правилом, для якого *Якщо*-частина максимально відповідає описанню, заданому вхідному вектору X :

$$class = k_{j^*}, \quad j^* = \arg \max_{1 \leq j \leq m} \prod_{i=1}^n \mu_{A_{ij}}(x_i).$$

Побудова нечітких класифікаторів потребує вирішення наступних завдань: відбір інформативних ознак, формалізації знань, формулювання бази нечітких правил, оптимізація параметрів функції належності.

3. Огляд літератури. У сучасних наукових підходах до оцінки якості водних ресурсів широко застосовуються стандартизовані методики класифікації екологічного стану [2]. В Україні основним нормативним документом є Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України від 14.01.2019 № 5 “Про затвердження Методики віднесення масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного та хімічного станів масиву поверхневих вод” [3], який встановлює п'ять класів якості вод — від “відмінного” до “поганого” — на основі гідрохімічних, гідробіологічних та гідроморфологічних показників. У міжнародній науковій практиці, зокрема у дослідженні Vitecek, Johnson та Poikane

(2021) “Assessing the Ecological Status of European Rivers and Lakes Using Benthic Invertebrate Communities: A Practical Catalogue of Metrics and Methods” [4], описано різноманітні методи оцінки екологічного стану водних об’єктів із застосуванням біологічних, хімічних та гідроморфологічних характеристик. Дослідження Пономаренка (2022) “Оцінка екологічного стану поверхневих водних об’єктів” [5] демонструє, що національні підходи узгоджуються з міжнародними стандартами, проте відрізняються більш деталізованими критеріями для біогенних і фізико-хімічних показників.

4. Методи і матеріали. Проблема відбору інформативних ознак полягає у пошуці таких входних атрибутів із набору даних, які найбільш реально відображають екологічний стан середовища. Це можуть бути як статистичні, так і теоретико-інформаційні та метаевристичні методи.

Особливу увагу сучасні дослідники приділяють якості водних ресурсів, які відіграють фундаментальну роль у збереженні екосистем і забезпеченні потреб населення. Оцінка якості води ґрунтується на системі фізико-хімічних, гідробіологічних та токсикологічних показників, серед яких ключовими є:

- **кисневий режим** (розчинений кисень, біохімічне та хімічне споживання кисню – БСК₅, ХСК);
- **вміст біогенних елементів** (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-}), які впливають на евтрофікаційні процеси;
- **концентрація завислих речовин і органічного забруднення** (каламутність, зважені частинки, органічний вуглець);
- **наявність токсичних речовин** (важкі метали, пестициди, нафтопродукти)

Екологічна класифікація якості вод за біологічними критеріями включає такі групи показників:

а) гідробіологічні:

- структурні показники окремих угруповань — чисельність, біомаса, число видів, індекс Шенона, структурні індекси та ін.,
- показники трофності — біомаса фітопланктону, концентрація хлорофілу “а”, первинна продукція;
- біоіндикаційні оцінки — індекси сапробності за системами Пантле–Букка і Гуднайта–Уітлея, біотичні індекси;

б) біохімічні — індекс A/R (самоочищення / самозабруднення), потенційна здатність вод до самоочищення, активність позаклітинних оксидоредуктаз у донних відкладах;

в) бактеріологічні — загальна чисельність бактеріопланктону, кількість сапрофітних бактерій та бактерій групи кишкових паличок (індекс БГКП).

г) біотестові — біотести на ракоподібних, біотест Кнеппа.

Кожен показник порівнюється з гранично допустимими концентраціями (ГДК) або екологічними нормативами, а сукупна оцінка дозволяє віднести водойму до певного класу якості (від I — «дуже чиста» до V — «дуже забруднена»).

Метою математичного моделювання є не лише кількісний опис стану водних екосистем, але й прогнозування змін під впливом природних і антропогенних

факторів. Результати моделювання застосовуються для оцінки екологічних ризиків, визначення пріоритетних заходів охорони вод, а також для обґрунтування управлінських рішень у сфері екологічної політики. У таблиці 1 наведено граничні значення основних показників якості води відповідності до класів.

Таблиця 1

№ п/п	Показник	Клас I	Клас II	Клас III	Клас IV	Клас V
1	Розчинений кисень, мг O_2 /дм ³	>8.0	7.6–8.0	7.1–7.5	6.1–7.0	<6.0
2	% насичення	96–105	91–96	81–90	71–80	<70
3	Завислі речовини, мг/дм ³	<5	5–10	11–20	21–30	>30
4	Прозорість, м	>1.50	1.00–1.50	0.65–0.95	0.50–0.60	<0.50
5	pH	6.9–7.5	7.6–7.9	8.0–8.1	8.2–8.3	>8.3
6	Азот амонійний, мг N/дм ³	<0.10	0.10–0.20	0.21–0.30	0.31–0.50	>0.50
7	Азот нітритний, мг N/дм ³	<0.002	0.002–0.005	0.006–0.010	0.011–0.020	>0.020
8	Азот нітратний, мг N/дм ³	<0.20	0.20–0.30	0.31–0.50	0.51–0.70	>0.70
9	Загальний N, мг N/дм ³	<1.0	1.1–1.5	1.6–2.0	2.1–4.0	>4.0
10	Фосфор фосфатів, мг P/дм ³	<0.015	0.015–0.030	0.031–0.050	0.051–0.100	>0.100
11	Фосфор загальний, мг P/дм ³	<0.015	0.015–0.030	0.031–0.060	0.061–0.120	>0.120
12	БСК ₅ , мг O_2 /дм ³	<1.0	1.0–1.6	1.7–2.1	2.2–4.0	>4.0
13	ХСК (біхроматна окислюваність), мг O_2 /дм ³	<9	9–15	16–25	26–30	>30

Дана класифікація відображає комплексний підхід до оцінки якості поверхневих вод. Основними критеріями є показники кисневого режиму (розчинений кисень і ступінь насичення), гідрофізичні параметри (завислі речовини, прозорість), кислотно-лужний баланс (pH), вміст біогенних елементів (азот і фосфор у різних формах), а також індикатори органічного забруднення (БСК₅, ХСК). У наведеній таблиці класифікація якості води відповідає категоріям, прийнятим у національних методиках екологічної оцінки стану поверхневих вод [1]:

- **I клас — відмінні:** вода характеризується природним станом, без ознак антропогенного впливу.
- **II клас — добрі:** вода майже не змінена, незначний антропогенний вплив.
- **III клас — задовільні:** спостерігаються помірні зміни якості води, вплив антропогенних факторів відчутний.
- **IV клас — погані:** істотне погіршення якості води, потрібне очищення перед використанням.
- **V клас — дуже погані:** вода непридатна для використання без глибокого очищення, небезпечна для біоти.

Така деталізація дозволяє не лише класифікувати водойми за ступенем забруднення, а й створювати моделі нечіткого виведення, де кожен показник матиме свою функцію належності до класу якості.

Ця класифікація може бути основою для побудови моделей екологічного моніторингу, визначення інтегральних індексів якості води (ІЗВ) та для подальшого застосування методів нечіткої логіки для оцінки ступеня забруднення.

Формалізація знань являється проблемою, вирішення якої полягає у побудові моделі, яка адекватно відображає інформацію предметної області.

Виходячи із аналізу даних наведених у таблиці 1 показники доцільно промодельовати за допомогою апарату нечітких множин, тобто деякі S-лінійною функцією належності та деякі Z-лінійною функцією належності.

$$\mu = \begin{cases} 0, & x \leq a_{\min}, \\ \frac{x - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}}, & a_{\min} \leq x \leq a_{\max}, \\ 1, & x \geq a_{\max}. \end{cases}$$

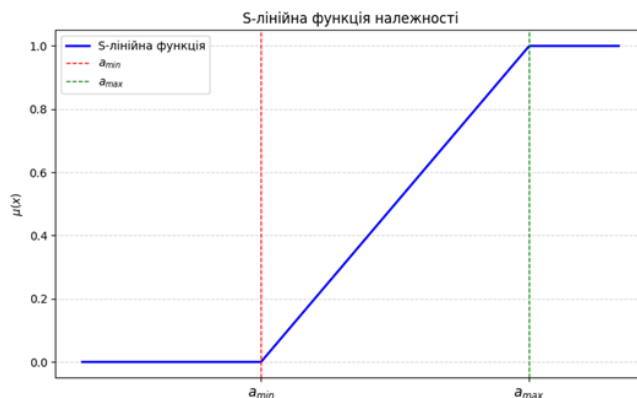


Рис. 1. S-лінійна функція належності.

$$\mu = \begin{cases} 0, & x \geq a_{\max}, \\ \frac{a_{\max} - x}{a_{\max} - a_{\min}}, & a_{\min} \leq x \leq a_{\max}, \\ 1, & x \leq a_{\min}. \end{cases}$$



Рис. 2. Z-лінійна функція належності.

Якщо аналізувати показники з таблиці 1, то можемо зробити висновок, що для показників, де покращення означає зростання значення — краще вибрати S-лінійну функцію належності (рис. 1), зокрема для показників № 1, 2, 4. А для всіх інших, де покращення означає зменшення значення — краще використати Z-лінійну функцію належності (рис. 2).

5. Результати досліджень. Якщо взяти значення для одного класу з першого показника, то графік буде такий (рис. 3).

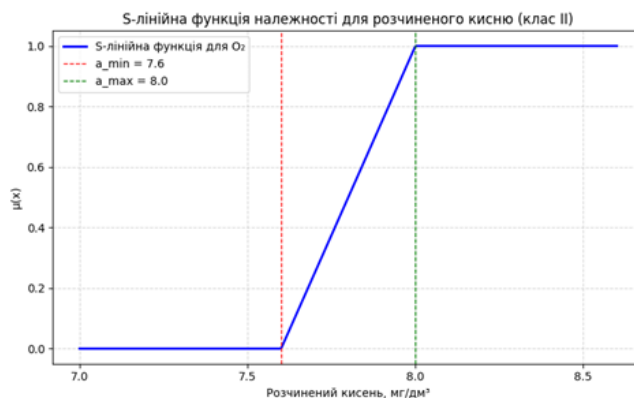


Рис. 3. Функція належності для розчиненого кисню O_2 (клас II).

Якщо взяти всі класи для показника 2, то вийде такий графік (рис. 4), з комбінацією функцій належності.

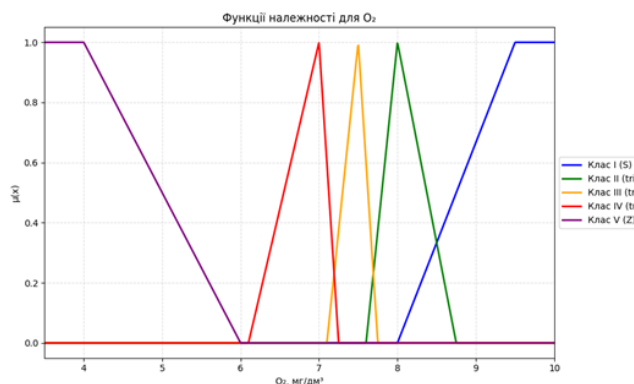


Рис. 4. Функція належності для розчиненого кисню O_2 для всіх класів.

6. Висновки. Математичне моделювання з використанням методів нечіткої класифікації виступає дієвим інструментом для оцінювання екологічного стану водних екосистем, оскільки дає змогу інтегрувати фізико-хімічні, гідробіологічні та токсикологічні показники у єдину систему комплексної оцінки. Застосування апарату нечітких множин і функцій належності забезпечує урахування невизначеності та природної мінливості даних, що сприяє формуванню більш адаптивної та адекватної класифікації водойм за рівнем забруднення. Суттєвою перевагою нечіткої логіки є її здатність поєднувати різнорідні й не завжди чітко визначені результати спостережень у цілісну математичну модель, яка відображає логічне судження про стан досліджуваної системи.

Аналіз показників якості води (кисневий режим, вміст біогенних елементів, органічне та токсичне забруднення) демонструє, що застосування S- та Z-лінійних функцій належності дає змогу коректно моделювати залежність між станом води та її класом якості. Це дозволяє не лише класифікувати водойми за традиційними категоріями від I до V класу, а й формувати інтегральні ін-

декси якості води для екологічного моніторингу та прогнозування змін стану екосистем.

Використання моделей нечіткої класифікації створює нові можливості для ефективного управління водними ресурсами, оцінювання екологічних ризиків і розроблення науково обґрунтованих управлінських стратегій. Подальший поступ у цій сфері може бути пов'язаний з інтеграцією цифрових двійників екосистем, аналізом великих масивів даних, застосуванням технологій Інтернету речей (ІоТ) та сучасних обчислювальних платформ, що забезпечить більш точний і своєчасний моніторинг стану довкілля. Концепція м'якого комп'ютіngu розглядається як сучасний підхід до розв'язання складних задач, у випадках коли традиційні методи та алгоритми виявляються недостатньо ефективними через багатовимірність і складність досліджуваних систем. Цей підхід охоплює низку алгоритмічних методів, серед яких провідне місце належить нечіткій логіці [6].

Таким чином, нечітке моделювання є важливим інструментом у сучасній екології, що дозволяє системно оцінювати стан водних екосистем, прогнозувати наслідки антропогенних і природних впливів та формувати науково обґрунтовану екологічну політику, спрямовану на раціональне використання природних ресурсів і збереження довкілля.

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

Список використаної літератури

1. Zadeh, L. A. (1999). Fuzzy sets as a basis for theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems 100 Supplements*, 9–34.
2. Vasenko, O. G., Rybalo, O. V., Artemiev, S. R., & at al. (2015). *Integral and comprehensive assessments of the state of the natural environment: Monograph*. Kharkiv: NUGZU [in Ukrainian].
3. Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine No. 5 of January 14, 2019, “On Approval of the Methodology for Classifying Surface Water Bodies into One of the Classes of Ecological and Chemical Status of Surface Water Bodies.” Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z0127-19> [in Ukrainian].
4. Vitecek, S., Johnson, R. K. & Poikane, S. (2021). Assessing the Ecological Status of European Rivers and Lakes Using Benthic Invertebrate Communities: A Practical Catalogue of Metrics and Methods. *Water*, 13(3), 346.
5. Ponomarenko, E. (2022). Assessment of the ecological status of surface water bodies. *Bulletin of Kremenchuk National University named after M. Ostrogradsky*, 4(4), 65–72 [in Ukrainian].
6. Dogan I. (2016). An Overview of Soft Computing. *Procedia Computer Science*, 102, 34–38. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.366>

Polovko I. I., Sharkadi M. M. Application of fuzzy classification models in ecological research.

The article discusses the application of fuzzy classification methods for assessing the quality of water resources. The use of S- and Z-linear membership functions for modeling environmental indicators is proposed. The construction of a fuzzy classifier and its effectiveness for diagnosing the state of surface waters is demonstrated. The results confirm that fuzzy logic allows the integration of physicochemical, hydrobiological, and toxicological indicators into a single system.

Keywords: fuzzy classification, environmental research, water quality, membership functions, S-linear function, Z-linear function.

Одержано 01.09.2025