



УДК 681.142

Методи врахування невизначеності вимірювання і семантичної невизначеності при класифікації стану об'єктів за показниками якості

Н. А. Яремчук, Є. Т. Володарський, О. Ю. Годя

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
пр. Перемоги, 37, 03056, Київ, Україна
yaremchukna@i.ua; vet-1@ukr.net; R_olia@i.ua

Анотація

У статті запропоновано методи врахування невизначеності вимірювання і семантичної невизначеності при послідовному використанні процедур вимірювання і класифікації при оцінюванні стану об'єктів за показниками їх якості. Методи врахування невизначеності розрізняються за двома підходами: перший ґрунтується на врахуванні складових невизначеності при побудові шкали класифікації, а другий – на представленні результату оцінювання показника якості у вигляді нечіткого числа, модальне значення якого відповідає значенню показника якості, а носій визначається за об'єднанням семантичної невизначеності та невизначеності вимірювання. На підставі цих методів стан об'єкта може бути класифіковано за однією або декількома категоріями шкали класифікації із зазначенням ступеня приналежності до цих категорій. Наведено рекомендації щодо застосування двох підходів до врахування невизначеності вимірювання і семантичної невизначеності при наступному проведенні класифікації. Застосування однієї або декількох нечітких шкал класифікації рекомендовано при оцінюванні стану об'єкта за одиничним або за декількома показниками якості, що об'єднуються в груповий показник після класифікації за допомогою операторів нечіткої логіки. Застосування чіткої шкали класифікації при представленні показника якості як нечіткого числа рекомендовано при класифікації стану об'єкта за комплексним показником якості, що пов'язаний з одиничними показниками якості певною залежністю або з урахуванням вагових коефіцієнтів окремих одиничних показників якості.

Ключові слова: невизначеність вимірювання; класифікація стану об'єкта; показники якості; семантична невизначеність.

Отримано: 24.04.2024

Відредаговано: 16.05.2024

Схвалено до друку: 21.05.2024

Вступ

При класифікації об'єктів за показниками якості використовуються дві послідовні процедури: вимірювання і класифікація [1, 2]. Особливість послідовного виконання цих двох процедур (а саме вимірювання показника якості та класифікації стану об'єкта на основі отриманого значення показника якості) полягає в тому, що для категорій шкали класифікації встановлюються як вербальні назви, що характеризують стан об'єкта, так і границі категорій. Тобто між категоріями шкали встановлюється відстань. Наявність вербальної назви категорії шкали і пов'язаної з нею характеристики стану об'єкта залежить від способу опису людиною цього стану або від способу його сприйняття. Як наслідок можуть бути роз-

біжності при встановленні границь категорій шкали класифікації. Такі розбіжності є причиною семантичної або лексичної невизначеності, що може супроводжувати процедуру класифікації або ординального вимірювання [3]. За [3] семантична або лексична невизначеність – це невизначеність, що виникає при моделюванні стану об'єкта або події з використанням вербальних описів.

Є ще одна особливість процедури класифікації стану об'єкта за шкалою категорій. Чітка класифікація заснована на чіткому відношенні еквівалентності: стан об'єкта або представлений певною категорією, або не може бути представлений нею. Але, якщо значення показника якості знаходиться безпосередньо біля границі, що розділяє дві категорії, то такий

однозначний висновок за чіткої класифікації не відповідає дійсності за наявності семантичної невизначеності. Існує пропозиція – використати нечітку шкалу класифікації, врахувавши семантичну невизначеність саме на границях категорій шкали класифікації [4]. Тоді результат класифікації подається за перерізом нечіткої шкали класифікації (що є рядом нечітких множин, які являють собою категорії шкали) і результатом вимірювання показника якості, поданим як *single-tone*. Тоді стан об'єкта може бути класифіковано за декількома категоріями шкали класифікації із зазначенням ступенів відповідності стану об'єкта до цих категорій.

Якщо класифікацію проводять за одиничними показниками якості, вимірюванню підлягає одна властивість об'єкта, і класифікацію виконують із використанням категоризованої шкали для вказаної властивості. У випадку групових показників якості вимірюванню підлягають декілька властивостей об'єкта, а результати об'єднують із використанням відповідних операторів для категоризованих даних. У випадку комплексних показників якості використовуються співвідношення, за якими формується комплексний показник і об'єднуються результати вимірювання декількох властивостей. Категоризації підлягає саме комплексний показник якості.

Через те що процедура вимірювання більшості властивостей, за якими будуються показники якості об'єктів, супроводжується значними похибками (10–30%), актуальним завданням є аналіз впливу невизначеності вимірювання на результати подальшої класифікації. Методи врахування невизначеності вимірювання разом із семантичною невизначеністю при наступній класифікації об'єктів за різними показниками якості можна розділити за двома підходами: перший ґрунтується на використанні нечіткої шкали класифікації; другий – на поданні результату вимірювання показника якості у вигляді одномодального симетричного нечіткого числа, мода якого відповідає значенню показника, а носієм є розширена невизначеність вимірювання.

$$\mu_{T_1}(NH_4^+) = \begin{cases} 1, & \text{для } 0 \leq x \leq 0,06 \\ (0,14 - x) / 0,08 & \text{для } 0,06 < x \leq 0,14 \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad \text{– “дуже чиста”};$$

$$\mu_{T_2}(NH_4^+) = \begin{cases} (x - 0,06) / 0,08, & \text{для } 0,06 < x \leq 0,14 \\ 1, & \text{для } 0,14 < x \leq 0,18 \\ (0,42 - x) / 0,24 & \text{для } 0,18 < x \leq 0,42 \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad \text{– “чиста”};$$

$$\mu_{T_3}(NH_4^+) = \begin{cases} (x - 0,18) / 0,24, & \text{для } 0,18 < x \leq 0,42 \\ 1, & \text{для } 0,42 < x \leq 0,6 \\ (1,4 - x) / 0,8 & \text{для } 0,6 < x \leq 1,4 \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad \text{– “забруднена”};$$

$$\mu_{T_4}(NH_4^+) = \begin{cases} (x - 0,06) / 0,8 & \text{для } 0,6 < x \leq 1,4 \\ 1, & \text{для } 1,4 < x \leq 3,5 \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad \text{– “брудна”}.$$

1. Врахування невизначеності вимірювання і семантичної невизначеності при класифікації стану об'єктів за одиничними і груповими показниками якості

При використанні одиничних і групових показників якості невизначеність вимірювання може бути враховано при побудові шкали класифікації, тобто при формуванні нечіткої шкали [5]. При цьому можуть бути враховані складові невизначеності вимірювання, що передують класифікації, та нечіткість експертної інформації, яка може застосовуватись при класифікації. Таким чином можуть бути враховані такі складові невизначеності:

- інструментальна невизначеність, що обумовлена невизначеністю вимірювання властивості, що відображається показником якості;
- семантична невизначеність, що виникає внаслідок розбіжності даних про границі категорій, які наведені в різних джерелах.

Якщо загальна невизначеність стає сумірною з відстанню між категоріями чіткої шкали класифікації, її враховують, використовуючи правила побудови нечіткої шкали [4]. Нечітку шкалу представляють як ряд нечітких множин, для функцій приналежності яких найчастіше використовують трапецієподібну або трикутну форму. Границя між двома сусідніми категоріями повинна відповідати перерізу функцій приналежності на рівні 0,5. Тобто якщо показник якості знаходиться між двома категоріями T_1 і T_2 , висновок нечіткої класифікації буде: $T_1 | 0,5$; $T_2 | 0,5$. Умова розбивки одиниці повинна виконуватись при перекритті функцій приналежності двох сусідніх категорій, або, що те ж саме, повинна виконуватись умова приведення функцій приналежності до одиниці.

Якщо взяти чітку шкалу класифікації якості води за вмістом шкідливих речовин, наприклад, за вмістом нітратів NH_4^+ в поверхневих водах у мг/дм³, то для неї встановлені такі категорії якості води за чіткою класифікацією [6]: T_1 – “I клас – дуже чиста” (менше 0,1), T_2 – “II клас – чиста” (0,11–0,30), T_3 – “III клас – забруднена” (0,31–1,0), T_4 – “IV клас – брудна” (1,01–2,50). З врахуванням невизначеності вимірювання концентрації шкідливих речовин формується нечітка шкала класифікації [3] (1):

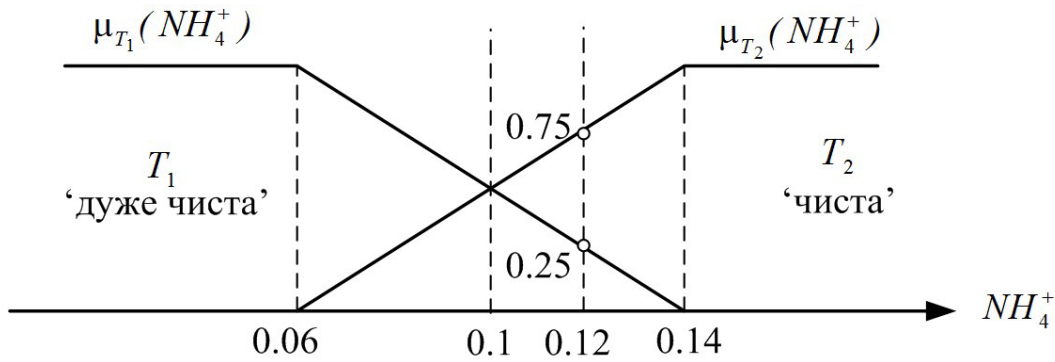


Рис. 1. Ілюстрація нечіткої класифікації стану об'єкта з використанням функцій приналежності категорій шкали

Відповідно до цих класів і категорій при застосуванні одиничних показників якості вирішується завдання віднесення якості води до відповідної вербальної категорії за одним компонентом, що впливає на якість води. Тоді нечіткий результат класифікації може бути отримано за перерізом нечіткої шкали (1) з результатом вимірювання, поданого як single-tone. Для одиничного показника якості результатом класифікації може бути або віднесення до однієї категорії якості, або до декількох із визначенням ступеня приналежності до цієї категорії. Тобто невизначеність вимірювання може призвести до відповідного розсіювання результату класифікації. Так, якщо концентрація NH_4^+ становить $0,12 \text{ мг/дм}^3$, нечіткий результат процедури класифікації визначається за перерізом із термами T_1 і T_2 , і відповідно становить $T_1 | 0,25$; $T_2 | 0,75$ (рис. 1).

Для оцінки впливу невизначеності вимірювання на результат класифікації може бути використано ординальну дисперсію [7, 8]:

$$D = \frac{4}{m-1} \sum_{k=1}^{m-1} F_k (1 - F_k),$$

де F_k – кумулятивна відносна частота для k -ї категорії, m – число задіяних категорій. Дисперсія досягає максимуму, що дорівнює 1, якщо розподіл ступенів приналежності полярний, тобто для $m=2$ це $T_1 | 0,5, T_2 | 0,5$.

При класифікації стану об'єктів за груповими показниками [9] об'єднуються результати нечіткої класифікації певних одиничних показників якості. Для об'єднання може бути використаний оператор нечіткого усереднення (arithmetic mean – AM):

$$\mu_{AM}(T_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu(T_i),$$

де n – кількість показників, $\mu(T_i)$ – ступінь приналежності до певної категорії T_i .

Крім AM, можуть бути використані оператори об'єднання, коли число доданків два:

- S-норма “алгебраїчна сума”, яка для двох показників A і B дорівнює

$$\mu_{A+B}(T_i) = \mu_A(T_i) + \mu_B(T_i) - \mu_A(T_i) \cdot \mu_B(T_i);$$

- Fuzzy – логічна сума, що для двох показників дорівнює

$$\mu_{F(A+B)}(T_i) = \mu_{A+B}(T_i) / (1 - \mu_A(T_i) \cdot \mu_B(T_i)).$$

Оператор усереднення може бути використаний для будь-якої кількості показників і зберігає властивість розділення одиниці [3], тому може бути рекомендований для групових показників як найбільш універсальний.

Оператори S-норма “алгебраїчна сума” і Fuzzy – логічна сума реалізуються попарно і після кожного застосування потребують нормалізації, тобто до виконання умови розділення одиниці.

На основі досліджень застосування наведених вище операторів для отримання групових показників якості [10] виявлено такі їхні властивості:

- найбільшу дисперсію і найбільшу чутливість до верхніх або нижніх категорій має оператор об'єднання S-норма “алгебраїчна сума”;
- найменшу дисперсію і найменшу чутливість до верхніх або нижніх категорій має оператор об'єднання Fuzzy – логічна сума;
- результати об'єднання за оператором усереднення знаходяться між S-нормою “алгебраїчна сума” і Fuzzy – логічна сума.

2. Урахування семантичної невизначеності та невизначеності вимірювання при класифікації стану об'єктів за комплексними показниками якості

При визначенні категорій якості за комплексними показниками результати вимірювання окремих властивостей об'єднуються за співвідношенням, встановленим до цього комплексного показника якості з об'єднанням відповідних невизначеностей. Якщо за співвідношенням, обраним для комплексного показника якості, об'єднуються уніфіковані середні значення одиничних показників якості (уніфікація показників – це перехід на одну уніфіковану шкалу), то семантична невизначеність виникає внаслідок розбіжностей уніфікованих середніх значень окремих показників від значення комплексного показника. Невизначеність вимі-

рювання комплексного показника отримують за комбінованою стандартною невизначеністю [9], що є об'єднанням стандартних невизначеностей вимірювання окремих одиничних показників якості. Отриманий результат вимірювання комплексного показника якості подають у вигляді нечіткого числа, мода якого відповідає значенню показника, а носієм є розширена невизначеність вимірювання комплексного показника якості. Через те що шкала класифікації за даним комплексним показником якості залишається чіткою, то кінцевий результат класифікації визначають за перерізом нечіткого числа зі шкалою класифікації. Кінцевий результат класифікації може бути отримано з віднесенням до однієї категорії шкали класифікації або з віднесенням до декількох категорій із зазначенням ступеня приналежності якості об'єкта до певної категорії.

Як приклад можна навести застосування комплексних індексів якості води, що використовуються при моніторингу стану води під впливом природних і антропогенних процесів. Комплексні індекси, на основі яких здійснюється класифікація, розраховуються за результатами вимірювань декількох одиничних показників якості води. Вони характеризують стан води в цілому, при цьому інформація про окремі показники губиться. Індекс забруднення води (ІЗВ) пов'язаний із шістьма одиничними показниками якості води (розчинний кисень, біохімічне споживання кисню (БСК), амоній іон, нітрати, нафтопродукти, феноли) і визначається за формулою [11] (2):

$$C(\text{ІЗВ}) = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \frac{C_i}{C_i(\text{ГДЗ})} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 C_{yi}, \quad (2)$$

де C_i – середнє арифметичне значення одиничного показника якості води, $C_i(\text{ГДЗ})$ – гранично допустиме значення одиничного показника якості, C_{yi} – уніфіковане значення одиничного показника якості.

Модифікований ІЗВ розраховують із ваговими коефіцієнтами окремих показників. Шкала класифікації якості води за оцінкою ІЗВ наступна [11]: “дуже чиста” – $\leq 0,30$; “чиста” – $0,31-1,00$; “помірно забруднена” – $1,01-2,50$; “забруднена” – $2,51-4,00$; “брудна” – $4,01-6,00$; “дуже брудна” – $6,01-10,0$; “надзвичайно брудна” – $\geq 10,0$.

Якщо за даними моніторингу якості води $C_{y1} = 0,55$; $C_{y2} = 1,23$; $C_{y3} = 1,00$; $C_{y4} = 0,96$; $C_{y5} = 0,64$; $C_{y6} = 0,50$, індекс забруднення води за формулою (2) $C(\text{ІЗВ}) = 0,81$, то без урахування невизначеності вимірювання якості води за наведеною шкалою може бути класифікована як “чиста”.

Середнє квадратичне відхилення, що характеризує семантичну невизначеність, визначається за відхиленнями уніфікованих

значень окремих одиничних показників якості від комплексного показника якості (3), тобто:

$$\sigma[C(\text{ІЗВ})] = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (C_{yi} - C(\text{ІЗВ}))^2}, \quad (3)$$

де n – кількість одиничних показників якості, для наведеного вище прикладу $n=6$. Для наведених вище даних моніторингу СКВ за (3) дорівнює $\sigma[C(\text{ІЗВ})] = 0,12$.

Комбінована стандартна невизначеність вимірювання за даними моніторингу знаходиться як (4):

$$u_c(\text{ІЗВ}) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (u(C_i) / C_i(\text{ГДЗ}))^2}, \quad (4)$$

де $u(C_i)$ – стандартна невизначеність вимірювання одиничного показника якості. За даними моніторингу [11] становить $u_c(\text{ІЗВ}) = 0,05$.

Загальнє середнє квадратичне відхилення оцінки комплексного показника якості за сумою семантичної невизначеності та невизначеності вимірювання (5):

$$\sigma_{\Sigma}(\text{ІЗВ}) = \sqrt{\sigma^2[C(\text{ІЗВ})] + u_c^2(\text{ІЗВ})}. \quad (5)$$

За (5) $\sigma_{\Sigma}(\text{ІЗВ}) = 0,13$.

Для урахування загальної невизначеності в роботі запропоновано представлення результату оцінювання комплексного показника якості у вигляді нечіткого числа. Для цього можуть бути використані трикутні функції приналежності (ФП) і гаусові ФП з обмеженим носієм. Для формування ФП достатньо трьох значень: x_{min} ; x_{mod} ; x_{max} , де x_{mod} – модальне значення (мода), $x_{max}-x_{min}$ – носій нечіткого числа. Модальне значення ФП зазвичай знаходиться в середині діапазону $x_{max}-x_{min}$ і відповідає найбільш характерному значенню для цього діапазону. Найпростішою для обчислення ступенів приналежності є трикутна форма нечіткого числа [3]. Але гаусівська форма найбільш близька до інтуїтивних ФП, тому що якісна оцінка, яку використовує людина, не змінюється стрибками.

Стан об'єкта може бути класифіковано за перерізом нечіткого числа [10], що є представленням комплексного показника якості, з чіткою шкалою класифікації (рис. 2). З використанням гаусівського нечіткого числа (рис. 2) і урахуванням розширеної невизначеності:

$$x_{min} = x_{mod} - 3\sigma_{\Sigma}(\text{ІЗВ});$$

$$x_{max} = x_{mod} + 3\sigma_{\Sigma}(\text{ІЗВ}),$$

а результат класифікації набуває вигляду: “чиста”|0,76; “помірно забруднена”|0,24.

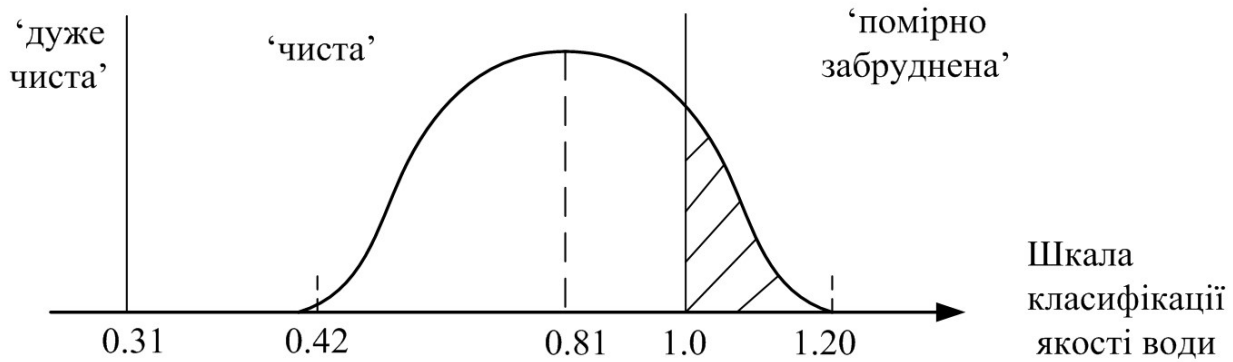


Рис. 2. Ілюстрація класифікації стану об'єкта з урахуванням невизначеності вимірювання комплексного показника якості

Приблизно такий же результат було отримано з використанням трикутної форми функції приналежності.

Отже, класифікацію може бути виконано за декількома категоріями шкали із зазначенням ступенів приналежності до цих категорій. Проведений аналіз важливий не тільки з точки зору подання результату класифікації з урахуванням семантичної невизначеності та невизначеності вимірювання. З нього випливає наступне: якщо формувати комплексний показник якості з об'єднанням одиничних показників якості, уніфіковані значення яких будуть мати велику розбіжність, то це призведе до збільшення семантичної невизначеності, й результат класифікації необхідно буде розподілити за декількома категоріями шкали класифікації.

Висновки

1. У роботі запропоновано методи врахування невизначеності вимірювання і семантичної невизначеності при послідовному виконанні процедури вимірювання показника якості та наступної процедури класифікації стану об'єкта за цим показником.

2. Методи врахування невизначеності зазначені на двох підходах: перший ґрунтується

на урахуванні невизначеності вимірювання і семантичної невизначеності при побудові шкали нечіткої класифікації, другий – на урахуванні невизначеності при представленні результату оцінювання показника якості у вигляді нечіткого числа, в якому значення показника якості відповідає модальному значенню, а носій визначається за розширеною невизначеністю.

3. Отримано результати використання двох підходів урахування невизначеності вимірювання і семантичної невизначеності при класифікації стану об'єктів за одиничними, груповими і комплексними показниками якості.

4. Показано, що при врахуванні невизначеності вимірювання стан об'єкта може бути класифікований з віднесенням як до однієї, так і до декількох категорій шкали класифікації із зазначенням ступеня приналежності до кожної категорії.

5. Із проведених досліджень випливає, що врахування семантичної невизначеності важливе не тільки при виконанні процедури класифікації, а і при формуванні комплексних показників якості, щоб запобігти подальшому розсіюванню результатів класифікації за декількома категоріями.

Methods of accounting for measurement uncertainty and semantic uncertainty in the classification of the state of objects according to quality indicators

N. Yaremchuk, E. Volodarsky, O. Hoda

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremohy Ave., 37, 03056, Kyiv, Ukraine
yaremchukna@i.ua; vet-1@ukr.net; R_olia@i.ua

Abstract

The paper proposes methods of accounting for measurement uncertainty and semantic uncertainty when consistently using measurement and classification procedures to classify the state of objects according to their quality indicators. Methods of accounting for uncertainty are distinguished by two approaches: the first one is based on accounting for measurement uncertainty when constructing a classification scale, and the second one is based on presenting the result of measuring a quality indicator as a fuzzy number, the carrier of which is the expanded measurement uncertainty. Using these methods, the state of the object can be classified according to one or more categories of the classification scale, indicating the degree of belonging to these categories.

Recommendations for the application of two approaches to account for measurement uncertainty in the subsequent classification are given. The use of one or more fuzzy classification scales is recommended when classifying the state of an object by a single quality indicator or by several quality indicators that are combined into a group indicator after classification using the fuzzy logic operators, such as arithmetic mean, as well as pairwise volume operators. When using single and group quality indicators, measurement uncertainty may be accounted for when constructing a classification scale, that is, when using a fuzzy scale. At the same time, the components of the measurement uncertainty preceding the classification and the vagueness of the expert information that may be used in the classification can be accounted for. In this way, the following components of the uncertainty can be defined: instrumental uncertainty and semantic uncertainty.

The use of a clear classification scale when presenting the measurement result as a fuzzy number is recommended when classifying the state of the object according to a complex quality indicator that is related to individual quality indicators by a certain dependence or by accounting for the weighting factors of individual quality indicators. It is shown that when accounting for the measurement uncertainty, the state of the object may be classified into one or several categories of the classification scale, indicating the degree of belonging to each category.

Keywords: measurement uncertainty; object state classification; quality indicators; fuzzy classification scale; semantic uncertainty.

Список літератури

1. Benoit E., Foulloy L. The role of fuzzy scales in measurement theory. *Measurement*, 2013, no. 46(8), pp. 2921–2926. doi: 10.1016/j.measurement.2013.04.043
2. Benoit E., Foulloy L. Building a class of fuzzy equivalence relations. *Fuzzy Sets and Systems*, 2006, vol. 157, pp. 1417–1437. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fss.2006.01.013>
3. Piegat A. *Fuzzy Modeling and Control*. Springer Science & Business Media, 2001. 728 p.
4. Benoit E. New scale classification within the representational theory of measurement. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, vol. 459, 012004. doi: 10.1088/1742-6596/459/1/012004
5. Semeniuk R., Yaremchuk N. The methods of obtaining and elaborating classified data in intellectual measurement systems. *Central European Researchers Journal*, 2020, vol. 6, issue 1, pp. 27–36.
6. МВВ № 081/12-0106-03. Поверхневі, підземні та зворотні води. Методика виконання вимірювань масової концентрації амоній-іонів фотоколориметричним методом з реактивом Неслера. Зі зміною № 1. Київ, 2003.
7. Gadrich T., Bashkansky E. ORDANOVA: Analysis of ordinal variation. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2012, vol. 142, issue 12, pp. 3174–3188. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2012.06.004>
8. Beair I., Lacy Mg. Statistics of ordinal variation. *Sociological Methods Research*, 2000, no. 28, pp. 251–280.
9. Яремчук Н.А., Семенюк Р.С. Способи врахування невизначеності при побудові лінгвістичних шкал. Доповіді XII Міжнародної науково-технічної конференції “Метрологія та вимірювальна техніка” (“Метрологія–2020”). *Український метрологічний журнал*. 2020. № 3А. С. 77–81.

10. Hoda O., Dovhaliuk R., Yaremchuk N. The methods of data processing according to the measurement/classification procedure for quality indicators of objects. *Ukrainian Metrological Journal*, 2022, no. 1, pp. 68–72. doi: 10.24027/2306-7039.1.2022.258827
11. Юрасов С.М., Сафранов Т.А., Чугай А.В. Оцінка якості природних вод: навчальний посібник. Одеса, 2012. 168 с.
1. Benoit E., Foulloy L. The role of fuzzy scales in measurement theory. *Measurement*, 2013, no. 46(8), pp. 2921–2926. doi: 10.1016/j.measurement.2013.04.043
2. Benoit E., Foulloy L. Building a class of fuzzy equivalence relations. *Fuzzy Sets and Systems*, 2006, vol. 157, pp. 1417–1437. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fss.2006.01.013>.
3. Piegat A. *Fuzzy Modeling and Control*. Springer Science & Business Media, 2001. 728 p.
4. Benoit E. New scale classification within the representational theory of measurement. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, vol. 459, 012004. doi: 10.1088/1742-6596/459/1/012004
5. Semeniuk R., Yaremchuk N. The methods of obtaining and elaborating classified data in intellectual measurement systems. *Central European Researchers Journal*, 2020, vol. 6, issue 1, pp. 27–36.
6. MVV 081/12-0106-03. Surface, underground and return waters. Methodology for measuring the mass concentration of ammonium ions by the photolorimetric method with Nesler's reagent. Kyiv, 2003 (in Ukrainian).
7. Gadrich T., Bashkansky E. ORDANOVA: Analysis of ordinal variation. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2012, vol. 142, issue 12, pp. 3174–3188. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2012.06.004>
8. Bear I., Lacy Mg. Statistics of ordinal variation. *Sociological Methods Research*, 2000, no. 28, pp. 251–280.
9. Yaremchuk N., Semeniuk R. Sposoby urakhuvannia nevyznachenosti pry pobudovi linhvistychnykh shkal [Methods of taking into account uncertainty in construction of linguistic scales]. Reports of the XII International Scientific and Technical Conference “Metrology and Measuring Techniques”. *Ukrainian Metrological Journal*, 2020, no. 3A, pp. 77–81 (in Ukrainian).
10. Hoda O., Dovhaliuk R., Yaremchuk N. The methods of data processing according to the measurement/classification procedure for quality indicators of objects. *Ukrainian Metrological Journal*, 2022, no. 1, pp. 68–72. doi: 10.24027/2306-7039.1.2022.258827
11. Yurasov S., Safranov T., Chuhai A. Otsinka yakosti pryrodnykh vod: navchalnyi posibnyk [Assessment of the quality of water: tutorial]. Odessa, 2012. 168 p. (in Ukrainian).