

УДК 911.3

Пендерецький О.В.

МЕТОД ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ҐРУНТУ З ВИКОРИСТАННЯМ FUZZY-ТЕХНОЛОГІЙ

Розроблений метод оцінки екологічного стану ґрунту на основі fuzzy-теорії за вимірними значеннями концентрацій важких металів. Метод апробований на фактичному матеріалі.

Ключові слова: екологічний стан, забруднення, методи, стандарти, fuzzy-теорії, ґрунт, шкала оцінки, концентрація, фон.

The method of estimation of ecological condition of the soil based on fuzzy-theory for the measured values of concentrations of heavy metals. The method was tested on the actual material.

Key words: ecological conditions, pollution, methods, standards, fuzzy-theory, soil, assessment scale, concentration, background.

Разработанный метод оценки экологического состояния почвы на основе fuzzy-теории по измеренным значениям концентраций тяжелых металлов. Метод апробирован на фактическом материале.

Ключевые слова: экологическое состояние, загрязнение, методы, стандарты, fuzzy-теории, ґрунт, шкала оценки, концентрация, фон.

Постановка проблеми. Використання земельних угідь в рекреаційних цілях, вирощування екологічно чистої сільськогосподарської продукції, добування мінеральної води та й саме проживання населення ставить вимоги про інформованість як соціальних служб так і громадськості про екологічний стан на даній території.

Розвиток нового напрямку в туристичній галузі – промислового туризму, який виник і почав активно розвиватись лише наприкінці минулого сторіччя, вимагає гарантувати як техногенну так і екологічну безпеку туристів на вибраних об'єктах. Тому дуже важливо ще на початковій стадії використання конкретної земельної території дослідити відповідність на ній вмісту забруднюючих хімічних елементів нормативним показникам.

Аналіз останніх публікацій та досліджень. Серед останніх публікацій та досліджень в галузі визначення вмісту хімічних елементів у ґрунтах слід назвати монографію Рудька Г.І. та Адаменка О.М. - Конструктивна геоєкологія, 2008р. де наведено результати оцінки екологічного стану ґрунту за ступенем забрудненості з використанням коефіцієнта забруднення та запропоновано ряд карт вмісту хімічних елементів у ґрунтах. Нові методи моделювання забруднення ґрунтів на

основі теорії нейромережі опубліковані Горбійчуком М.І. , а також ряд авторських досліджень визначають вміст елементів у будь якій точці території, що значно скорочує витрати на проведення аналізів і прискорює отримання результатів.

Проте слід зазначити, що нема універсального методу який би вирішував всі поставлені завдання і тому питання дослідження екологічної безпеки потребують подальших наукових розробок.

Визначення невирішених сторін проблеми. Оцінка поточної екологічної ситуації та екологічного стану довкілля здійснюється за екологічними показниками стану і структури геоекосистем, які необхідно порівняти з нормативними. Ця процедура виконується згідно міжнародних і державних стандартів серії ISO 14000 на рівні державних установ, підприємств, галузі і територій [1]. Процес оцінки екологічного стану довкілля здійснюється на основі комплексу комп'ютерних екологотехногеохімічних карт як за окремими компонентами довкілля і за окремими елементами-забруднювачами, так і за інтегральною картою. За допомогою таких карт визначаються зони екологічної небезпеки різного ступеня: сприятливі, задовільні, напружені, складні, незадовільні, передкризові, критичні катастрофічні. Очевидно, що така оцінка здійснюється досвідченими експертами і у значній мірі вона носить суб'єктивний характер.

Мета та завдання статті. Метою даної роботи є розробка науково обґрунтованого методу оцінки екологічного стану ґрунту на основі fuzzy-теорії.

Основний виклад матеріалу. Методи теорії нечітких множин і нечіткої логіки (fuzzy-теорії) [2] дають можливість описувати якісні, неточні поняття і наші знання про навколишній світ, а також оперувати цими знаннями з метою отримання нової інформації. Fuzzy-теорія більш природно описує характер людського мислення і хід його висновків, ніж традиційні логіко-формальні схеми. Тому використання математичних засобів для представлення нечіткої початкової інформації дає можливість отримувати моделі, які адекватно відтворюють різні аспекти невизначеності, які постійно присутні при оцінці екологічного стану довкілля.

Формалізація нечітких знань і процес здійснення нечітких висновків ґрунтується на правилі нечіткої продукції, під яким у загальному випадку розуміють вираз [3]:

$$(i) : Q; P; A \Rightarrow B; S; F; N ,$$

де (i) - ім'я нечіткої продукції;

Q - сфера застосування нечіткої продукції;

P - умова застосування ядра нечіткої продукції;

A - умова ядра (антецедент);

B - висновок ядра (консеквент);

\Rightarrow - знак логічної секвенції (висновку);

S - метод або спосіб визначення кількісного значення степені істинності висновку ядра;

F - коефіцієнт визначеності або упевненості нечіткої продукції;

N - післямова продукції.

Центральним компонентом нечіткої продукції є її ядро, яке записують у такій формі

$$\text{if } A \text{ then } B, \quad (1)$$

де A і B - деякі вирази нечіткої логіки, які подають у формі нечітких висловів.

Вираз нечіткої логіки A інтерпретується як нечітке лінгвістичне висловлювання типу:

$$b \text{ is } \nabla a, \quad (2)$$

де b - назва лінгвістичної змінної;

a - значення лінгвістичної змінної;

∇ - модифікатор змінної a , який відповідає таким словам як "малий", "середній", "великий" та ін.

Із висловів (2) утворюють складені вислови за допомогою логічних зв'язків "and", "or", "not".

Вирази A і B можна розглядати як дві нечіткі множини, які визначені на універсамах X і Y . При цьому нечітка множина A інтерпретується як умова нечіткого правила продукції, а нечітка множина B як висновок того ж правила. У такому випадку перше відношення визначається функцією належності [2] $\mu_A(x)$, а друге відношення – функцією належності $\mu_B(x)$. Тоді за певним правилом нечіткої продукції визначається бінарне нечітке відношення на декартовому добутку універсамів: $Q = \{ \langle x, y \rangle, \mu_Q \langle x, y \rangle \}$. Якщо додатково відома функція належності $\mu_A(x)$, то функція належності $\mu_B(y)$ другої множини може бути визначена як результат нечіткої композиції з використанням правила fuzzy modus ponens (FMS). У виразі (2) лінгвістичні змінні визначаються як кортеж

$$\langle \beta, T, X, G, M \rangle, \quad (3)$$

де β - назва лінгвістичної змінної;

T - базова терм-множина лінгвістичної змінної або множина її значень (термів), кожне із яких є назвою окремої нечіткої змінної a .

X - область визначення (універсам) нечітких змінних, які входять у визначення лінгвістичної змінної β ;

G - певна синтаксична процедура, яка описує процес генерування із множини T нових, осмислених у даному контексті, значень для даної лінгвістичної змінної;

M - семантична процедура, яка дає можливість поставити у відповідність кожному новому значенню даної лінгвістичної змінної, яка отримана за допомогою процедури G , деякий осмислений зміст через формування відповідної нечіткої множини.

Викладені процедури нечітких висновків дають можливість розробити метод оцінки екологічної ситуації для певної території, який розглянемо на прикладі оцінки стану ґрунтів. Поставимо наступну задачу. За вимірними значеннями концентрацій важких металів дати оцінку екологічного стану ґрунтів даної території. Для компактного викладення суті методу обмежимося трьома металами – мідь (Cu), свинець (Pb) і цинк (Zn).

Забруднення ґрунтів важкими металами оцінюють за сумарним показником забруднення Z_c , який визначають за такою формулою [4]:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{\phi i}}, \quad (4)$$

де $C_i, C_{\phi i}$ - концентрація i -го металу та його фонове значення;

n - кількість присутніх у ґрунті металів.

Фонові значення концентрацій визначають як середній вміст i -го елементу у ґрунтах для даного регіону. За значенням сумарного показника забруднення розроблена шкала [4], яка відображає небезпеку забруднення ґрунтів для здоров'я людини (табл. 1).

Формалізація вихідної лінгвістичної змінної "стан ґрунту" виконана за допомогою кортежу (3), де

▪ β - стан ґрунту;

▪ $T = \{ \text{"сприятливий стан"}, \text{"задовільний стан"}, \text{"помірно небезпечний стан"}, \text{"надзвичайний стан"}, \text{"дуже небезпечний стан"} \};$

▪ $S = [0;128];$

▪ $G = \emptyset;$

▪ M - процедура завдання на $S = [0;128]$ нечітких змінних $\alpha_i = T_i,$

де $\alpha_i \in U; T_i$ - елемент (терм) множини T .

Табл. 1. Шкала оцінки стану ґрунтів

Шкала	0 – 8	8 – 16	16 – 32	32 – 64	64 – 128
Терм-множина	сприятливий	задовільний	помірно небезпечний	надзвичайний	дуже небезпечний
Позначення термів	fv	st	md	ex	vd

Аналогічним способом формалізовані вхідні лінгвістичні змінні "концентрація важкого металу у ґрунті". Наприклад, для лінгвістичної змінної "концентрація свинцю (Pb)" будемо мати (табл. 2):

▪ β - концентрація Pb;

▪ $T = \{ \text{"фон малий"}, \text{"фон середній"}, \text{"фон великий"}, \text{"гранично допустима"}, \text{"аномально низка"}, \text{"аномально середня"}, \text{"аномально висока"} \}$;

▪ $X = \left[0; C_i^{(AB)} \right]$. Концентрації $C_i^{(AB)}$ вибрані як п'ять значень

кларків [5].

▪ $G = \emptyset$;

▪ M - процедура завдання на $S = \left[0; C_i^{(AB)} \right]$ нечітких змінних

$\alpha_i = T_i$, де $\alpha_i \in U$; T_i - елемент (терм) множини T .

Табл. 2. Завдання вхідних лінгвістичних змінних "концентрація металів у ґрунті"

Метал	Позначення	Концентрації, мг/кг						
		фон			BPC	аномальні		
		BS	BM	BB		AS	AM	AB
Мідь	Cu	<u>0</u>	<u>0,8</u>	<u>1,6</u>	<u>2,3</u>	<u>3,0</u>	<u>80,0</u>	<u>157,0</u>
		0,8	1,6	2,3	3,0	80,0	157,0	232,0
Свинець	Pb	<u>0</u>	<u>5,6</u>	<u>11,2</u>	<u>16,8</u>	<u>20,0</u>	<u>43,3</u>	<u>66,6</u>
		5,6	11,2	16,8	20,0	43,3	66,6	90,0
Цинк	Zn	<u>0</u>	<u>5,4</u>	<u>10,9</u>	<u>16,3</u>	<u>23,0</u>	<u>153,7</u>	<u>284,4</u>
		5,4	10,9	16,3	23,0	153,7	284,4	415,0

Значення Z_c обчислювались з використанням даних табл. 2. Для цього кожен із інтервалів розбиття ділися наполовину

$$C_i^{(c)} = \frac{C_i^{(n)} + C_i^{(k)}}{2},$$

де $C_i^{(n)}$, $C_i^{(k)}$ - початок і кінець інтервалу розбиття (у табл. 2 $C_i^{(n)}$

- чисельник, $C_i^{(k)}$ - знаменник).

Отримані значення $C_i^{(c)}$ служили вихідними даними для розрахунків показника сумарного забруднення для кожного із інтервалів розбиття. Фонові концентрації важких металів взяті для території Рогатинського району. Результати розрахунків зведені у таблицю. Табл. 3 є лише фрагментом такої таблиці. Значення Z_c для різної комбінації концентрацій важких металів у ґрунті є підставою до визначення стану ґрунту, який має п'ять градацій (табл. 1).

Кожний терм як вхідних, так і вихідної змінних характеризується своєю функцією належності $\mu_T(x)$. Як приклад, на рис. 1 наведені графіки лінгвістичних змінних "концентрація Pb у ґрунті" та "стан ґрунту".

Система нечіткого висновку про стан ґрунтів дає змогу на основі інформації про концентрацію важких металів у ґранті судити про степінь їх забруднення у відповідності з табл. 1. Для цього така система повинна вміщувати базу правил нечітких продукцій і реалізувати нечіткий вивід висновків на основі посилань і умов, які подані у формі нечітких лінгвістичних висловлювань.

Таким чином, основними етапами нечіткого висновку є [2, 3]:

- ✓ формування бази правил системи нечіткого висновку;
- ✓ фазифікація входних змінних;
- ✓ агрегування підумов у нечітких правилах продукцій;
- ✓ композиція підумов у нечітких правилах продукцій;
- ✓ акумулювання висновків нечітких правил продукцій.

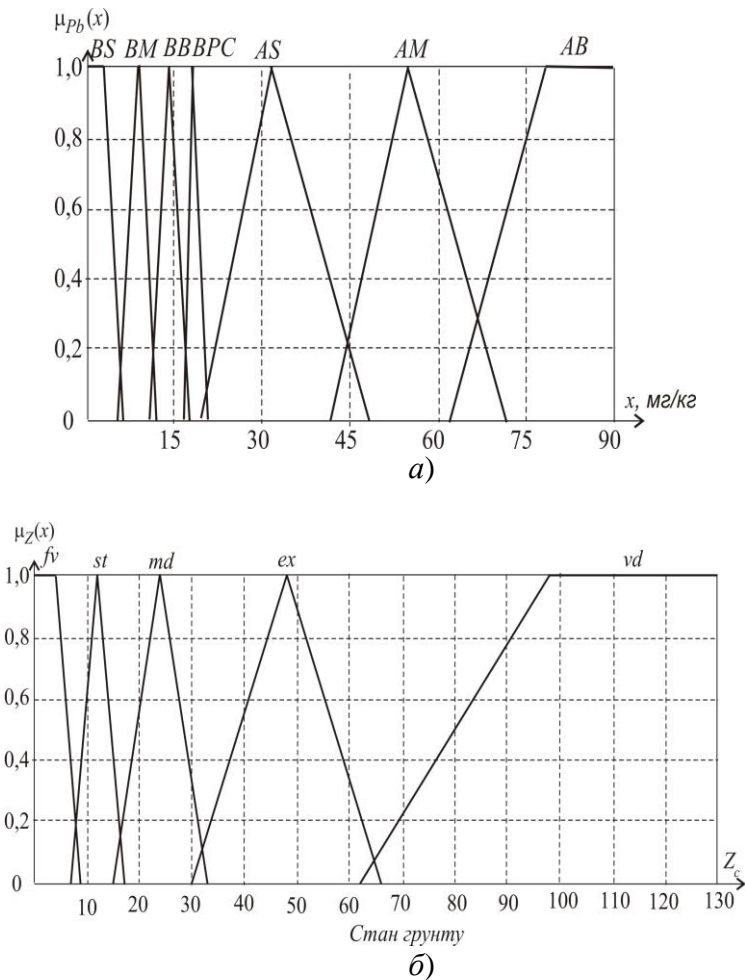


Рис.1. Графіки функцій належності для термів лінгвістичної змінної "Концентрація Pb" (а) та лінгвістичної змінної "Стан ґрунту" (б)

База правил системи нечіткого висновку сформована на основі можливих комбінацій концентрацій важких металів Cu, Pb і Zn у ґранті. При складанні бази правил виходили із наступних міркувань. У загальному випадку ґрунт може вміщувати k важких елементів, які будемо асоціювати із такою ж кількістю місць, на кожне із яких поміщаємо один із n термів. Тоді із n термів вибираємо один (довільний) і поміщаємо на перше місце,

потім із n термів знову вибираємо один і поміщаємо на друге місце і т. д. до k місця включно. Отже, на одне місце різними способами можна розмістити $n_i = C_n^1$, $i = \overline{1, k}$ термів. У відповідності з комбінаторним принципом множення загальне число таких комбінацій $N = (C_n^1)^k$. Враховуючи те, що $C_n^1 = n$, визначимо загальну кількість правил $N = n^k$, які утворюють базу правил. У випадку, що розглядається $k = 3$, $n = 7$ і $N = 7^3 = 343$. Для кожної комбінації обчислювались показник Z_c у відповідності з формулою (4). Результати розрахунків зведені у таблицю, яка формується автоматично у відповідності із розробленою програмою. Табл. 3 є фрагментом такої загальної таблиці. На основі таблиці концентрацій важких металів у ґрунті складена база нечітких продукцій у формі (1). Як приклад, наведемо частину з них, які відповідають табл. 3

1. if (Cu is BS) and (Pb is BS) and (Zn is PS) then (StateSoils is fv) (1)
2. if (Cu is BS) and (Pb is BM) and (Zn is BS) then (StateSoils is fv) (1)
3. if (Cu is BM) and (Pb is BS) and (Zn is BS) then (StateSoils is fv) (1)
4. if (Cu is BM) and (Pb is BM) and (Zn is BS) then (StateSoils is fv) (1)
5. if (Cu is BM) and (Pb is BS) and (Zn is BM) then (StateSoils is fv) (1)

У дужках після правил наведені значення вагових коефіцієнтів F_i , які можуть приймати значення із інтервалу $[0;1]$. У нашому випадку їх значення дорівнює одиниці, тобто всі правила мають однакову вагу.

Табл. 3. Фрагмент таблиці розподілу концентрацій важких металів у ґрунті

№ правила	Cu	Pb	Zn	Z_c	Оцінка стану	Позначення
1.	Фон малий	Фон малий	Фон середній	0,839966	Сприятливий	fv
2.	Фон малий	Фон середній	Фон малий	0,840171	Сприятливий	fv
3.	Фон середній	Фон малий	Фон малий	0,854663	Сприятливий	fv
4.	Фон середній	Фон середній	Фон малий	1,187997	Сприятливий	fv
5.	Фон середній	Фон малий	Фон середній	1,187792	Сприятливий	fv

Наступним етапом нечіткого висновку є фазифікація – знаходження значень функцій належності нечітких множин (термів) на основі детермінованих вхідних даних (концентрацій важких металів у ґрунті). Процедура фазифікації виконується наступним чином. На початок цього етапу повинні бути відомі значення концентрацій важких металів C_i у ґрунті. Потім розглядається кожне із підумов виду (2). При цьому $b = C_i$. Останнє використовується як аргумент функції належності і відповідно

знаходиться кількісне значення $b_i' = \mu(C_i')$. Це значення і є результатом фазифікації підумови (2). Етап фазифікації буде закінченим, якщо знайдені всі значення $b_i' = \mu(C_i')$ для кожного із підумов всіх правил, які входять в утворену базу правил системи нечіткого висновку. Значення b_i' утворюють множину $B = \{b_i'\}$.

Етап агрегування має за мету визначення істинності умов за кожним із правил системи нечіткого висновку. Для цього використовується множина значень $B = \{b_i'\}$, яка отримана на попередньому етапі. При цьому значення b_i' використовуються як аргументи логічної операції "and" (нечітка кон'юнкція [2]). У результаті виконання операції агрегування знаходиться множина значень $B' = \{b_i''\}$.

Активізація у системі нечіткого висновку є процедурою знаходження степені істинності кожної із підумов правил нечітких продукцій. На початок цього етапу відома множина значень $B' = \{b_i''\}$ і значення вагових коефіцієнтів F_i для кожного із правил нечітких продукцій. Тоді степінь істинності визначається як алгебраїчний добуток b'' на F_i . У результаті виконання етапу активізації знаходиться множина значень $C = \{c_i\}$. Після знаходження множини $C = \{c_i\}$ визначаються функції належності кожної із підумов для вихідної лінгвістичної змінної за правилом min-активізації:

$$\mu'(y) = \min(c_i, \mu(y)).$$

У результаті виконання етапу активізації будуть визначені функції належності нечітких для терм-множини вихідної величини системи нечіткого висновку.

На етапі акумуляції виконується об'єднання функцій належності $\mu'(y)$ з метою отримання функції належності вихідної величини.

Завершальним етапом нечіткого висновку є дефазифікація, яка на основі результатів акумуляції дає можливість визначити детерміноване значення вихідної величини (стан ґрунту) і за цим значенням судити про степінь його забруднення важкими металами. Для виконання числових розрахунків на етапі дефазифікації використаний метод центра ваги або центроїд [2].

Для північної околиці села Путятинці Рогатинського району були взяті проби ґрунту. Зразки відбирались на відкритій ділянці, що віддалена від дороги не менше ніж на 50 м по конверту 5x5 м і об'єднувались в одну пробу. У результаті отримали такі значення концентрацій важких металів в

ґрунті у мг/кг: $C_{Cu} = 3,2$; $C_{Pb} = 41,4$ і $C_{Zn} = 33,3$. За допомогою розробленої fuzzy-програми визначено, що стан ґрунту – md (помірно небезпечний).

Висновки. Розроблений метод дає можливість оцінювати екологічний стан ґрунтів за вимірними значеннями концентрацій важких металів. Ефективність і достовірність методу підтверджена результатами досліджень стану ґрунтів території Рогатинського району, на території якого ведуться промислові розробки мінеральної води «Роксолана», «Рогатинська» та ряду інших. Метод оцінки екологічного стану ґрунту на основі fuzzy-теорії дає можливість прийняти заключне рішення щодо місця видобування екологічно чистої води.

1. Шевчук В. Я., Саталкін Ю. М., Навроцький В. М. Екологічний аудит. Навчальний посібник. – К.: Вища школа, 1996. – 204 с.
2. Рутковская Д., Пилинський М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. Пер. с польск. – М.: Горячая линия, 2004. – 452 с.
3. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MatLab и fuzzyTech.
4. Білявський Г. О., Бутченко Л. І. Основи екології. Навчальний посібник. – К.: Лібра, 2006. – 368 с.
5. Виноградов А. П. Среднее содержание элементов в земной коре. // Геохимия. – 1962. - № 7. – С. 555-557.