

УДК 504.4.06

М.Ю. Лосєв

*Харківський національний економічний університет ім. Семена Кузнеця, Харків*

## НЕЧІТКО-МНОЖИННИЙ АНАЛІЗ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД В ХАРКІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

*В роботі пропонується аналіз результатів моніторингу якості поверхневих вод на базі методики нечітко-множинної оцінки стану складних систем, які описуються множиною параметрів. Методика дозволяє визначити імовірнісні характеристики показників різної природи, це дає можливість уникнути обмежень і неоднозначності, що виникає при згортку приватних критеріїв у деякий глобальний критерій якості.*

**Ключові слова:** нечітка множина, багатокритеріальна оцінка, складна система, функція приналежності, стан системи, лінгвістична змінна, показник якості, невизначеність, поверхневі води, забруднююча речовина, екологічна система, клас небезпеки, гранично допустима концентрація.

### Вступ

Зміст будь-якого виду оцінки передбачає наявність об'єкта оцінки (якісне і кількісне стан поверхневих вод), суб'єкта оцінки (позицій з яких вона ведеться) і критеріїв оцінки. Для оцінки водних об'єктів їх класифікують за різними ознаками, характеристиками, категоріями, що відображають природні особливості водного об'єкта, що враховуються при його комплексному використанні і охороні, що визначаються якісними (порівняльними) і кількісними показниками.

До теперішнього часу розроблена велика кількість методів оцінки якості води. Принципи оцінки, покладені в основу методів, також різні. Ряд запропонованих методів створений з метою врахування часового та просторового поширення забруднення. Деякі методи розраховані на певну якість води окремих проб [1]. Якість вод різних водних об'єктів оцінюється за схожими параметрами і, в залежності від цільового призначення, відрізняються нормативними вимогами та гранично допустимою концентрацією (ГДК) цих параметрів.

В даний час, практично у всіх країнах є нормативні документи та методичні рекомендації для оцінки господарського якості води: для питного водокористування, господарських цілей, зрошення [1]. Оцінка якості води при цьому проводиться за встановленими параметрами: хімічними, гідробіологічними та мікробіологічними показниками. У той же час, нормативних документів з оцінки екологічної якості немає. Під екологічною оцінкою розуміється визначення стану середовища життя або ступеня впливу на неї якихось факторів [2].

Це означає, що показники складу і властивостей води, які визначають її природні якості, розглядаються як індикатори структурно-функціонального

стану екосистем. Більшість цих показників характеризує не тільки якість води, але одночасно і тропність водних екосистем. Однак слід зазначити, що, незважаючи на позитивні сторони цієї класифікації, вона громіздка, включає велику кількість гідрфізичних, гідрохімічних, гідробіологічних та бактеріологічних показників, для визначення яких необхідно проводити спеціальні комплексні дослідження.

Таким чином, з вищесказаного стає очевидним, що проблема оцінки стану екосистем водних об'єктів за різними ознаками складна. І хоча є певні науково-практичні обґрунтування до її вирішення, однак остаточно ця проблема не вирішена і потребує подальших рішень, особливо для регіонів, де водні ресурси мають комплексне призначення, як природно-ландшафтне, так і народногосподарське.

### Основний матеріал

Основні особливості постановки задачі оцінювання стану екологічної системи характеризуються великою кількістю критеріїв, антагоністичністю і нерівнозначністю приватних критеріїв, важливістю обліку критеріїв, заснованих на суб'єктивних оцінках, необхідністю одночасного обліку невизначеностей різної природи.

Базовою проблемою математичної формалізації оцінки стану систем з безліччю параметрів і приватних критеріїв є подання різних невизначених характеристик в єдиній універсальній формі. В даний час більшість дослідників [3] схильні розглядати нечіткість і випадковість як два якісно різних види невизначеності. З одного боку, нечіткість стосується величин і відносин, межі яких неточно визначені, тобто коли їх не можна адекватно визначити (описати), використовуючи поняття звичайної множини, оскільки перехід від приналежності до неналежності безлічі вже не має стрибкоподібного характеру. З

іншого боку, випадковість стосується ситуацій, в яких подія точно визначена, а невизначеним є ймовірність його настання.

Однак, легко уявити собі, що в щоденному житті зустрічається багато ситуацій, в яких нечіткість і випадковість виступають разом. Наприклад, якщо ми запитуємо, яка ймовірність того, що завтра буде гарна погода, або про те, яка ймовірність того, що в майбутньому році буде висока інфляція, то в обох випадках маємо неточно визначені (нечіткі) події, відповідно добру погоду і високу інфляцію. Очевидно, що для того, щоб можна було формально визначити ймовірності таких неточно визначених подій, необхідно ввести поняття нечіткого події та ймовірності нечіткого події.

Стан параметра можна характеризувати належністю відповідному нечіткій множині. Згідно [4], аналізуючи досліджуваний параметр, можна зробити висновок про ймовірність його приналежності якій-небудь нечіткій множині. При цьому, якщо параметр (змінна)  $X$  визначено на інтервалі  $[x_0, x_k]$  і кожне з можливих чітких його значень може належати двом станам  $M_1$  і  $M_2$  з функціями належності  $\mu_1(x)$  і  $\mu_2(x)$  відповідно, то ймовірності приналежності таких станів визначаються за формулами [4]:

$$P_{M_1}(x \in [x_0, x_k]) = \frac{1}{x_0 - x_k} \int_{x_0}^{x_k} \mu_1(x) dx; \quad (1)$$

$$P_{M_2}(x \in [x_0, x_k]) = \frac{1}{x_0 - x_k} \int_{x_0}^{x_k} \mu_2(x) dx,$$

де  $P_{M_1}$ ,  $P_{M_2}$  – чіткі ймовірності приналежності параметра  $x = x_i$  нечітким множинам  $M_1$  і  $M_2$ ;

$x_i$  – початкове значення параметра на інтервалі  $[x_0, x_k]$ ;

$x_k$  – кінцеве значення параметра на інтервалі  $[x_0, x_k]$ ;

$\mu_i(x)$  – функція приналежності параметра відповідного нечіткій множині.

Обчислення ймовірності атомарного висловлювання базується на виразі (1) і ймовірності приналежності кожного параметра значенням відповідної нечіткої безлічі. Використовуючи аксіоматику незалежних подій теорії ймовірностей, отримаємо ймовірність  $i$ -го атомарного висловлювання:

$$P_i = \sum_{k=1}^K \prod_{j=1}^N p(I_j = \Omega_r), i = 1 \dots Z, \quad (2)$$

де  $K$  – кількість сум в вираженні, яке визначається логікою висловлювання;  $I_j$  –  $j$ -й параметр (критерій);  $\Omega_r$  –  $r$ -та нечітка множина  $r=1 \dots Z_r$ .

Для того, щоб втілити методику, необхідно виконати декілька етапів [5]:

побудувати набір окремих показників  $X = \{x_i\}$  загальним числом  $N$ , які, впливають на оцінку ризику забруднення ресурсів;

вести базові множини і підмножини станів, описані природною мовою;

визначити для кожного показника  $x_i$  рівень його значущості;

сформулювати правила, за якими приймається рішення про екологічний стан поверхневих вод.

На основі нечітко-множинної методики [4] виконаємо оцінку рівня забруднення річки Сіверський Донець в районі міста Ізюм. Ретроспективний аналіз складу стічної води у р. Сіверський Донець показав, що діапазон коливання вмісту фосфатів за останні роки від 4,0 до 11,3 мг/л суттєво перевищує встановлений допустимий рівень вмісту для питної води ( $\leq 3,5$  мг/л) [2], що створює значні проблеми для станцій підготовки питної води, технологія яких не дозволяє довести їх вміст до нормативних вимог. Це потребує розробки рекомендацій для підприємств – виробників питної води.

Для виявлення реального впливу скиду з очисних споруд м. Ізюму на якість води р. Сіверський Донець досліджувалася різниця у вмісті нітратів у річковій воді нижче скиду і вище скиду за середньорічними показниками.

До 2010 року спостерігалася зменшення вмісту нітратів у річковій воді, що свідчило про ефективну роботу очисних споруд міста з очищення промислово-побутової стічної води, яка сприяла покращенню якості річкової води. Починаючи з 2010 року і по цей час спостерігається чітка тенденція постійного збільшення вмісту нітратів у річковій воді внаслідок скиду погано очищеної води з очисних споруд міста, що суттєво погіршує якість питної води, виготовленої з води р. Сіверський Донець [6].

Усе це створює чималі труднощі для виробників питної води з води р. Сіверський Донець, тому що на станціях підготовки питної води не передбачені технологічні стадії, спрямовані на видалення нітратів з води. Абсолютно аналогічна тенденція спостерігається щодо зміни різниці вмісту фосфатів у річковій воді нижче скиду і вище скиду стічної води.

Така тенденція, безумовно, свідчить про те, що очисні споруди вичерпали практично в повному обсязі свої технологічні можливості щодо очищення промислово-побутових стоків і на фоні постійного зростання використання населенням різноманітних миючих засобів та іншої побутової хімії не в змозі забезпечити їх видалення на очисних спорудах, що призводить до суттєвого погіршення екологічного стану р. Сіверський Донець. Додатковим свідченням цього є зміни різниці поверхнево-активних речовин у річковій воді нижче скиду і вище скиду стічної води за середньорічними показниками та зміни різниці біологічного споживання кисню (БСК) у річковій воді нижче скиду і вище скиду стічної води.

На основі щомісячних показників концентрації фосфатів, нітратів та БСК в річці Сіверський Донець в Харківській області можна спрогнозувати ймовірний стан річки на наступний місяць по кожному з показників. Згідно прогнозу на основі існуючих даних [6] в січні концентрація БСК є невисокою, нітратів погіршується (0,8–1,6 мг/м<sup>3</sup>), та концентрація фосфатів залишається стабільно дуже високою 8,5–9,4 мг/м<sup>3</sup>. В даній ситуації прогноз значень показників слід розуміти як випадкові величини, рівномірно розподілені на певних інтервалах. Оскільки мова йде про чіткі інтервали, ніякий інше розподіл, крім рівномірного, не буде мати сенсу.

Для визначення ступеню ризику зараження стічних вод речовинами необхідно мати класифікацію стану викідів. Встановимо діапазон концентрації забруднюючої речовини на основі показників, отриманих з двох створів – створ 610 км (вище Ізюму, де вказано мінімальне значення показника), створ 600 км (нижче Ізюму, де вказано максимальне значення показника). Показники зазначені в табл. 1.

Таблиця 1

Концентрація забруднюючих речовин в створах вище та нижче Ізюму

Місце	Фосфати	Нітрати	БСК
Створ вище Ізюму	8,5	0,8	7,8
Створ нижче Ізюму	9,4	1,6	8,15
ГДК	3,5	1	15

Введемо наступні базові множини і підмножини станів, описані природною мовою. Повна безліч станів – це стан поверхневих вод на даній ділянці, яка розбита на три підмножини виду:

- підмножина станів "Добрий стан";
- підмножина станів "Нормальний стан";
- підмножина станів "Поганий стан".

У цій конструкції лінгвістичні визначення є стандартними функціями приналежності, які за допомогою сучасних засобів теорії нечітких множин можуть бути замінені відповідними функціями належності, що мають конкретну математичну форму. Тому, на практиці, зручно використовувати ті функції приналежності, які допускають аналітичне подання у вигляді деякої простої математичної функції. Найбільш характерним прикладом таких функцій є трапецієподібна функція приналежності [7].

Кожному інтервалу трапецієподібної функції приналежності відповідає певний стан забруднюючої речовини, тому складемо універсальну безліч для приблизних середньодобових показників кожного елемента, відштовхуючись від нормативних значень гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин: фосфати {0; 2; 3,5}; нітрати {0; 0,3; 1}; біологічне споживання кисню (БСК) {0; 8; 15}.

В залежності від інформованості та досвіду осіб, що приймають рішення (ОПР), подання, якими вони користуються при побудові нечітких множин, можуть володіти різним ступенем розпливчастості, в результаті чого виникає питання про градація нечіткості самих нечітких множин. У загальному випадку вибір нечіткості інтервалу може бути довільним, і не обмежений ніякими правилами.

Задамо кордони нечіткої приналежності результатів середньодобових показників забруднюючих речовин до кожного можливого стану: фосфати ±0,2, нітрати ±0,015, БСК ±0,2 [8].

Для наочності складемо графіки, на яких представимо трапецієподібні функції приналежності можливих значень показників різноманітним станам (рис. 1–3). На графіках вказано діапазон концентрації забруднюючої речовини на основі показників, отриманих з двох створів.

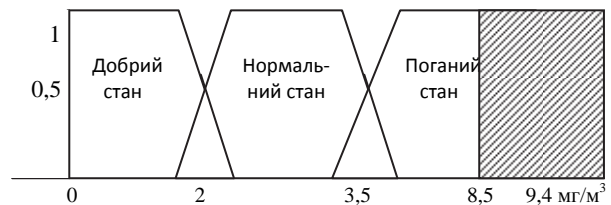


Рис. 1. Функції приналежності фосфатів

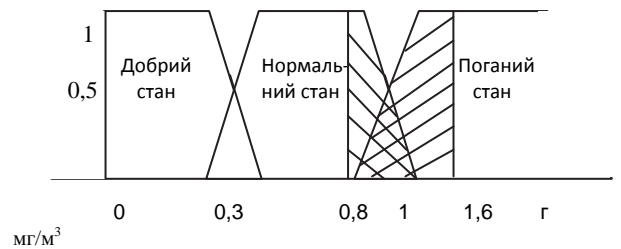


Рис. 2. Функції приналежності нітратів

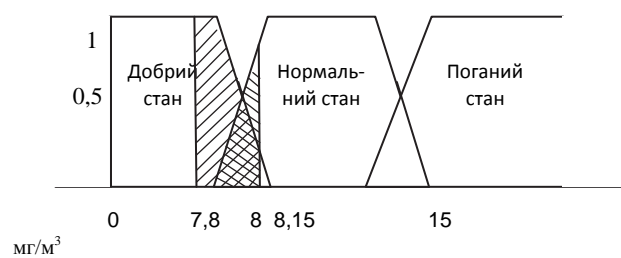


Рис. 3. Функції приналежності БСК

Згідно з виразами (1) визначено середні ймовірності приналежності кожного з показників до доброго, нормального і поганого станів (табл. 2).

Таблиця 2

Середня ймовірність стану забруднюючих речовин в створах вище та нижче Ізюму

Забруднюючі речовини	Добрий стан	Нормальний стан	Поганий стан
Фосфати	0	0	1
Нітрати	0	0,41	0,59

БСК	0,73	0,27	0
-----	------	------	---

Обчислення ймовірності атомарного висловлювання про стан поверхневих вод базується на виразні (2) і ймовірності приналежності і-го показника значення відповідної лінгвістичної змінної.

Наприклад, у нашому випадку є три критерії  $i=1...n$  ( $n=3$ ), кожен з яких характеризується лінгвістичною змінною з трьох можливих станів ( $N = 3$ ), тоді формальні знання будуть складатися з  $Z$  атомарних висловлювань  $i=1..Z$ , де  $Z = Nn$  ( $Z=27$ ). Кожне з цих висловлювань може бути віднесено до якого-небудь нечіткого стану системи, що характеризується значенням лінгвістичної змінної. Наприклад, хороший стан системи відповідає ситуації, коли хоча б два показника з трьох мають хороші значення («Д»), а один – нормальне («Н»). У цьому випадку ймовірність атомарного висловлювання РД (інакше – ймовірність хорошого стану води) визначається за формулою:

$$P_D = p_{\phi}(D)p_n(D)p_{\sigma}(D) + p_{\phi}(D)p_n(D)p_{\sigma}(H) + p_{\phi}(D)p_n(H)p_{\sigma}(D) + p_{\phi}(H)p_n(D)p_{\sigma}(D),$$

де  $p_{\phi}(D)$ ,  $p_n(D)$ ,  $p_{\sigma}(D)$  – середня ймовірність доброго стану фосфатів, нітратів і БСК відповідно;  $p_{\phi}(H)$ ,  $p_n(H)$ ,  $p_{\sigma}(H)$  – відповідно середня ймовірність доброго стану фосфатів, нітратів і БСК (табл. 2). Аналогічно встановимо правила для визначення середніх ймовірностей приналежності якісного складу води до нормального ( $P_H$ ) і поганого ( $P_{II}$ ) станів:

$$P_{II} = p_{\phi}(II)p_n(H)p_{\sigma}(D) + p_{\phi}(II)p_n(D)p_{\sigma}(H) + p_{\phi}(II)p_n(H)p_{\sigma}(H) + p_{\phi}(D)p_n(H)p_{\sigma}(II) + p_{\phi}(H)p_n(D)p_{\sigma}(II) + p_{\phi}(H)p_n(H)p_{\sigma}(II) + p_{\phi}(H)p_n(II)p_{\sigma}(D) + p_{\phi}(D)p_n(II)p_{\sigma}(H) + p_{\phi}(H)p_n(II)p_{\sigma}(H) + p_{\phi}(II)p_n(II)p_{\sigma}(II);$$

$$P_H = p_{\phi}(H)p_n(H)p_{\sigma}(D) + p_{\phi}(D)p_n(H)p_{\sigma}(H) + p_{\phi}(H)p_n(H)p_{\sigma}(H) + p_{\phi}(H)p_n(D)p_{\sigma}(H) + p_{\phi}(H)p_n(H)p_{\sigma}(H) + p_{\phi}(H)p_n(D)p_{\sigma}(H) + p_{\phi}(II)p_n(D)p_{\sigma}(D) + p_{\phi}(D)p_n(II)p_{\sigma}(D) + p_{\phi}(D)p_n(D)p_{\sigma}(II).$$

Результати обчислення величин  $P_D$ ,  $P_H$ ,  $P_{II}$  наведено в табл.3.

Таблиця 3

Ймовірнісні показники змінення стану річки

$P_D$	$P_H$	$P_{II}$
0	0,2693	0,7307

### Висновки

Споживання води суб'єктами господарювання у кількісному вираженні перевищує сумарне споживання усіх інших природних ресурсів. За сучасного

рівня водоспоживання природні механізми самоочищення вже не в змозі забезпечити нам воду відповідної якості. Крім високого рівня витрати води, її нестача викликана також і всезростаючим забрудненням внаслідок скиду у річки виробничих та побутових стічних вод. Проблема забруднення водою існує і в Харківській області, де добре розвинуті як сільське господарство, так і промисловість. Сучасний незадовільний стан водних об'єктів показує, що проблеми у сфері охорони вод від забруднення та виснаження не тільки не знайшли вирішення, а й значно загострилися, особливо в останні роки.

Особливості задачі оцінювання стану екологічних систем характеризуються великою кількістю параметрів, які необхідно не тільки вимірювати та розраховувати, але й прогнозувати можливе їх змінення.

Інтервальне прогнозування можливих змін параметрів надає гнучкість дослідженням при вирішенні таких багатокритеріальних задач, де точкова оцінка середнього, максимального або мінімального значення не надає належної об'єктивності оцінюванню.

Нечітко-множинна методика оцінки якості поверхневих вод дозволяє зробити як загальний аналіз стану води, так і оцінити її якість за кожним критерієм окремо. Крім цього відпадає необхідність у визначенні вагомості кожного з критеріїв. Визначення ймовірнісних характеристик змінення показників якості поверхневих вод може бути основою для виконання оцінки або ранжування різноманітних об'єктів і регіонів по ступеню забрудненості водних ресурсів і рекомендацій природоохоронним організаціям ретельніше контролювати стан навколишнього середовища.

Багатокритеріальні оцінки якості поверхневих вод можуть бути використані територіальними природоохоронними органами при розробці щорічного і перспективного прогнозів соціально-економічного розвитку регіонів.

Практична реалізація запропонованого підходу дозволить враховувати результати досліджень при розробці і узгодженні програм і заходів, що направлені на зниження негативних наслідків господарської діяльності для навколишнього природного середовища і її окремих ресурсних компонентів (атмосферне повітря, водні ресурси, земельні ресурси, біоресурси).

### Список літератури

1. Наполов О.Б. Влияние техногенных факторов на состояние окружающей среды и здоровья человека. Экологические проблемы современности. / О.Б. Наполов, М.В. Анисимова // Сборник статей международной научно-практической конференции «Экология жизни». – Пенза, 2005. – 153 с.

2. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною: ДСанПіН2.2.4-171-10 // Офіційний вісник України від 16.07.2010. – 2010. – № 51. – Ст. 1717. – С. 99.

3. Дилигенский Н.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология / Н.В. Дилигенский, Л.Г. Дымова, П.В. Севастьянов. – М.: «Издательство Машиностроение – 1», 2004. – 397 с.

4. Лосев М.Ю. Нечітко-множинна оцінка стану параметрів техніко-економічних систем / М.Ю. Лосев, Ю.М. Малишко // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: Харківський університет Повітряних сил імені Івана Кожедуба, 2015. – Вип.4 (129). – С.33-38.

5. Недосекин А.О. Нечетко-множественный анализ рисков фондовых инвестиций / А.О. Недосекин. – СПб.: «Сезам», 2002. – 181 с.

6. Белан С.В. Визначення екологічної небезпеки водокористування басейну р. Сіверський Донець у Харківській області / С.В. Белан, О.В. Рибалова, О.В. Козловська //

Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2016. – Вып. 60. – С. 128-132.

7. Лосев М.Ю. Методика многокритериальной оценки состояния технико-экономических систем на основе нечетко-множественного анализа показателей / М.Ю. Лосев, Ю.Н. Кононов, Ю.М. Лосева. – Х.: ХУПС, 2012. – 232 с. (С. 24-29).

8. Калмыков С.А. Методы интервального анализа / С.А. Калмыков, Ю.И. Шокин, З.Х. Юлдашев. – Новосибирск: «Наука», 2006. – 223 с.

Надійшла до редакції 6.02.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук доц. К.О. Метешкін, Харківська національна академія міського господарства, Харків.

## НЕЧЕТКО-МНОЖЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД В ХАРЬКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

М.Ю. Лосев

*В работе рассматривается анализ результатов мониторинга качества поверхностных вод на основе методики нечетко-множественной оценки состояния сложных систем, которые описываются множеством параметров. Методика позволяет определять вероятностные характеристики показателей различной природы, это дает возможность избежать ограничений и неоднозначности, возникающей при свертке частных критериев в некоторый глобальный критерий качества.*

**Ключевые слова:** нечеткое множество, многокритериальная оценка, функция принадлежности, состояние системы, лингвистическая переменная, показатель качества, неопределенность, поверхностные воды, загрязняющее вещество, экологическая система, класс опасности, предельно допустимая концентрация.

## FUZZY SET ANALYSIS OF SURFACE WATER QUALITY IN THE KHARKIV REGION

M.Y. Losev

*Analysis of the results of monitoring the quality of surface water is considered in the work. It is based on the use of methods of fuzzy set-assess the status of complex systems, which are described by a variety of parameters. The method allows to determine the probabilistic characteristics of indicators of different nature. This makes it possible to avoid the limitations and ambiguity that arises when the convolution of partial criteria in some global quality criterion.*

**Keywords:** fuzzy set multi-criteria evaluation, membership function, system status, linguistic variable, an indicator of quality, uncertainty, the superficial water, pollutant, ecological system, hazard class, maximum admissible concentration.