

АКВАКУЛЬТУРА

УДК 504.064.2:556.114:519.876.5

DOI <https://doi.org/10.32782/wba.2025.2.1>

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІНТЕГРАЛЬНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ПИТНОЇ ВОДИ НА ОСНОВІ МЕТРИКИ ХЕММІНГА

Валерко Р.А. – д. ю-г. н., доцент

orcid.org/0000-0003-4716-0100

Герасимчук Л.О. – к. с.-г. н., доцент

orcid.org/0000-0002-3166-5588

Пацева І.Г. – д. т. н., професор

orcid.org/0000-0001-6271-7355

Державний університет «Житомирська політехніка»

valerko_ruslana@ukr.net

У статті розглянуто проблему забезпечення якості питної води у сільських районах Житомирської області, де значна частина населення користується нецентралізованими джерелами водопостачання. Актуальність дослідження зумовлена високим рівнем забруднення вод нітратами, залізом і підвищеною твердістю, що створює ризики для здоров'я населення. Обґрунтовано актуальність використання інтегральних методів оцінювання, які дозволяють кількісно відобразити не лише перевищення окремих показників, а й структуру відхилень від нормативних значень. Запропоновано використання метрики Хеммінга як інструменту інтегральної оцінки якості питної води. Метод дозволяє кількісно оцінити відмінності між експериментальними показниками та нормативними значеннями, що забезпечує простоту розрахунків, об'єктивність і можливість автоматизації моніторингу. Дослідження проведено на території чотирьох районів області – Бердичівського, Житомирського, Коростенського та Новоград-Волинського за трьома ключовими показниками: вмістом нітратів, загального заліза та загальної твердості. Розраховано статистичні характеристики похибок (MAE, MSE) і визначено інтегральні показники якості води. Установлено, що лише 36 – 45 % зразків відповідають нормативам, тоді як 20 – 40 % мають критичний рівень забруднення. Найгірші результати зафіксовано у Бердичівському районі, де концентрація нітратів перевищує норму в 2,6 рази. Моделювання за відстанню Хеммінга показало, що вода прийнятної якості характеризується значеннями метрики до 16,8, а перевищення цього рівня вказує на підвищені ризики. Метод продемонстрував ефективність у класифікації зразків води за ступенем забруднення та дозволив сформулювати інтегральну оцінку стану джерел водопостачання. Отримані результати свідчать про доцільність використання відстані Хеммінга як простої та надійної альтернативи традиційним індексам якості води, що дає змогу створювати автоматизовані системи моніторингу та картографічні сервіси для прийняття управлінських рішень на рівні громад. Практична значущість роботи полягає у можливості застосуван-

ня методу для підвищення екологічної безпеки водопостачання й реалізації цілей сталого розвитку ООН (ЦСР-6).

Ключові слова: питна вода, якість, нітрати, залізо, твердість, інтегральна оцінка, відстань Хеммінга, Житомирська область.

Постановка проблеми. Питна вода є одним з ключових ресурсів, необхідних для підтримання життя та здоров'я людини. Відповідно до даних Всесвітньої організації охорони здоров'я, понад 2 мільярди людей у світі не мають доступу до безпечної води для споживання, що створює значні ризики виникнення інфекційних захворювань та хронічних інтоксикацій [1]. Якість питної води визначається комплексом фізико-хімічних, органолептичних і мікробіологічних показників, які повинні відповідати встановленим нормативам. В Україні ці нормативи регламентуються ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» [2], а також гармонізуються з європейськими стандартами, зокрема Директивою Ради 98/83/ЄС [3].

Процес моніторингу якості води, завдяки якому можна постійно контролювати стан води в режимі реального часу та швидко реагувати на зміни, можна автоматизувати за допомогою математичних моделей. Оскільки моделі можуть замінити частину експериментальних вимірювань, моделювання дозволяє зменшити витрати на фізичні дослідження і моніторинг. Математичні моделі є також важливими інструментами для державних органів та організацій, які займаються охороною водних ресурсів, а також дозволяють інтегрувати великі обсяги даних із різних джерел, таких як гідрологічні, хімічні, біологічні та екологічні показники. За допомогою моделювання можна виявляти потенційні ризики для здоров'я людей через забруднену питну воду, оскільки воно дозволяє оцінити вплив різних показників якості води на здоров'я, наприклад, рівня нітратів, важких металів чи біологічних забруднювачів, і відповідно, коригувати заходи щодо їх контролю [4; 5].

Традиційні методи оцінки якості питної води передбачають аналіз кожного показника окремо, що не завжди дозволяє отримати цілісне уявлення про стан води. У зв'язку з цим все більшого поширення набувають інтегральні методи, які дозволяють об'єднати інформацію про кілька параметрів у єдиний узагальнений показник [6; 7]. Одним із таких методів є відстань Хеммінга, яка історично була розроблена для виявлення та виправлення помилок у цифрових кодах [8], але знайшла застосування в біоінформатиці, аналізі даних та екологічному моніторингу [9].

Суть методу полягає у визначенні кількості відмінностей між двома наборами даних однакової довжини – у випадку контролю якості води це вектори, що містять інформацію про відповідність або невідповідність кожного показника нормативу. Такий підхід дозволяє швидко та об'єк-

тивно визначати кількість перевищених нормативів і оцінювати загальний стан води. Крім того, відстань Хеммінга може бути інтегрована в автоматизовані системи моніторингу, що робить її ефективним інструментом для оперативного прийняття управлінських рішень у сфері водопостачання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі відзначається, що методи на основі метрик відстаней, зокрема відстані Хеммінга, демонструють високу ефективність у сфері управління відходами [10], прогнозування опадів [11], ефективного енергоспоживання [12; 13], роботизації сільського господарства [14; 15], цифровізації промисловості [16], управління надзвичайними ситуаціями [17], моніторингу рівня моря і хвилових характеристик [18], вивчення біорізноманіття [19], управління сейсмічними даними [20], прогнозуванні аварійних ресурсів на нафтогазопроводах [21], завданнях класифікації екологічних даних, виявлення аномалій та формуванні інтегральних індексів якості [22].

Зокрема, AN Da et al. (2013) застосовували вираз Хеммінга у фузі-моделі оцінки якості підземних вод біля полігонів твердих побутових відходів. Метод показав високу коректність порівняно з традиційними фузі-методами – результати відповідали класам якості IV та III, а роздільна здатність моделі виявилась високою [23]. У роботі S. Xu et al. (2015) було розроблено модель динамічної оцінки якості води, де параметр $p = 1$ відповідав лінійному застосуванню відстані Хеммінга для розрахунку метрики між зразками та стандартами, у протигау евклідовій відстані $p = 2$ [24]. Zamri et al. (2022) застосовували відстань Хеммінга в алгоритмі K-NN для класифікації якості річкової води. У порівнянні з іншими метриками, Hamming здобув точність 90,12 % у класифікації – поступаючись лише моделі з ентропійним зважуванням (99,90 %) [25]. Дослідження Yan (2019) описує використання відстані Хеммінга в класифікації аномалій у водних даних методом k-NN, хоча без прямої фокусування на якість питної води [26]. У дослідженні, проведеному на поверхневих водах застосовується зважена Hamming-відстань у рамках поліпшеного «сіро-кореляційного» підходу для визначення подібності до стандартів якості [27].

Для дослідження якості питної води такий підхід дозволяє врахувати не тільки факт перевищення норми окремого показника, але й загальну кількість та структуру відхилень. Застосування відстані Хеммінга для моделювання та інтегральної оцінки якості питної води є перспективним напрямком, що поєднує простоту обчислень, об'єктивність оцінки та можливість масштабування в системах моніторингу різного рівня.

Формулювання цілей статті. Таким чином, метою даного дослідження було використання відстані Хеммінга для моделювання та інтегральної оцінки якості питної води джерел нецентралізованого водопостачання на прикладі Житомирської області.

Матеріали і методи дослідження. Дослідження проведено у межах сільських населених пунктів Житомирської області (Бердичівський, Житомирський, Коростенський, Новоград-Волинський райони). Для оцінки якості питної води джерел нецентралізованого водопостачання було обрано три ключові показники: нітрати (мг/дм³), залізо загальне (мг/дм³), загальна твердість (ммоль/дм³), вміст яких визначали за загальноприйнятими методиками. Нормативні значення обирали відповідно до ДСанПіН 2.2.4-171-10 [2] та Директиви Ради 98/83/ЄС [3].

Модель відстані Хеммінгу використовується для порівняння отриманих експериментальних даних з «еталонним» зразком. Велика відстань Хеммінга може вказувати на аномальний зразок. Групування схожих зразків води на основі їхньої відстані Хеммінга може допомогти виявити патерни забруднення. Модель описується такою залежністю:

$$HD = \frac{\sum_{i=1}^n |x - x_i|}{n}, \quad (1)$$

де x – еталонне (нормативне) значення показника;

x_i – виміряне значення показника;

n – кількість досліджуваних показників (у нашому випадку $n = 3$).

Для підвищення точності оцінювання були використані такі статистичні характеристики: середня абсолютна похибка (Mean Absolute Error) та середньоквадратична похибка (Mean Squared Error).

Середня абсолютна похибка (MAE) розраховується як середнє абсолютних різниць між цільовим значенням і значенням, що передбачене моделлю:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|, \quad (2)$$

де N – число прикладів вибірки;

y_i – цільове значення i -го прикладу;

$\hat{y}_i$ – значення, передбачене моделлю.

Середньоквадратична похибка (MSE) використовується у випадках, коли необхідно підкреслити великі похибки та обрати модель, яка дає найменшу кількість саме великих похибок. Великі значення похибок стають помітнішими за рахунок квадратичної залежності. MSE розраховується за формулою:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (3)$$

де n – кількість спостережень за якими будується модель та кількість прогнозів;

y_i – фактичне значення залежної змінної для i -го спостереження;

$\hat{y}_i$ – значення залежної змінної, що передбачено моделлю.

Результати досліджень та їх обговорення. Характерною особливістю функціонування сільських селітебних територій України є використання нецентралізованих джерел водопостачання для задоволення власних побутових та питних потреб. Не винятком у цьому сенсі є й Житомирська область, сільські населені пункти якої забезпечені централізованим водопостачанням лише на 7,7 %, тобто лише 125 сіл станом на 2023 рік мали централізований водопровід [28].

Житомирська область належить до одного із найбільш розвинених аграрних регіонів України. Область знаходиться у сприятливих природно-кліматичних умовах, що сприяє успішному веденню сільського господарства. Житомирщина не лише забезпечує власні потреби у продуктах рослинництва і тваринництва, а й демонструє значні показники експорту цієї продукції. Однак водночас гостро стоїть проблема впливу діяльності сільськогосподарського виробництва на довкілля. Зокрема, це й забруднення водних об'єктів сільськогосподарськими стоками, що містять надлишки мінеральних добрив.

У результаті досліджень встановлено, що середній вміст нітратів у питній воді джерел питного водопостачання усіх досліджуваних районів Житомирської області перевищував норматив, регламентований ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною». Максимальний вміст нітратів зафіксовано у межах Бердичівського району на рівні 129,8 мг/дм³, що перевищує норматив у 2,6 рази.

Такий рівень є особливо небезпечним для дітей та вагітних жінок, оскільки пов'язаний із ризиком розвитку неканцерогенних ефектів [29].

У країнах Європейського Союзу норматив заліза у питній воді встановлений на рівні 0,2 мг/дм³, в Австралії, Японії, Китаї, США, Канаді – на рівні 0,3 мг/дм³, що відповідає нормативу, затвердженому ВООЗ, який обмежується відомостями лише про зміну органолептичних властивостей при його перевищенні [30]. Вміст загального заліза у зразках коливався від 0,55 мг/дм³ до 1,06 мг/дм³, що також перевищує нормативи ВООЗ та Директиви 98/83/ЄС. Високі значення спричиняють погіршення органолептичних властивостей води (смак, колір, запах) і можуть бути індикатором техногенного або природного надходження заліза у підземні горизонти. В Україні з 2010 року діє 2 нормативи вмісту заліза: 0,2 мг/дм³ – для централізованого водопостачання і 1 мг/дм³ допускається для води, що надходить із джерел нецентралізованого водопостачання [2].

Середній вміст заліза загального у питній воді джерел нецентралізованого водопостачання сільських населених пунктів Житомирської області

коливався у межах від 0,55 мг/дм³ у Житомирському районі до 1,06 мг/дм³ у Новоград-Волинському.

В Україні для джерел нецентралізованого водопостачання встановлено норматив твердості на рівні 10 ммоль/дм³, а за ДСТУ 7525:2014 його оптимальний рівень визначено у межах від 1,5 до 7 ммоль/дм³.

Середня твердість питної води джерел нецентралізованого водопостачання сільських населених пунктів Житомирської області коливається у межах від 7,2 ммоль/дм³ у Житомирському районі до 10,2 ммоль/дм³ у Бердичівському районі, що свідчить про підвищену твердість питної води, її високу мінералізацію та негативно впливає на побутове використання води, зокрема на роботу техніки та систем опалення.

Відстань Хеммінга – це міра відмінностей між двома наборами даних, яка визначає кількість позицій, у яких дані відрізняються. Це можна використати для оцінки якості питної води шляхом порівняння наборів показників якості з прийнятними значеннями.

Низька відстань Хеммінга вказує на те, що якість води близька до прийнятної, і вода, ймовірно, безпечна для споживання. Натомість високе значення відстані Хеммінга вказує на те, що якість води значно відрізняється від прийнятних значень, і така вода може становити ризик для здоров'я.

Серед переваг використання відстані Хеммінга варто виділити:

1. Простота: відстань Хеммінга легко розрахувати за допомогою простих математичних операцій.

2. Об'єктивність: цей метод забезпечує об'єктивну оцінку якості води, виключаючи суб'єктивні інтерпретації.

3. Виявлення кількох відхилень: дозволяє виявляти не тільки окремі випадки перевищення, але й загальну тенденцію відхилення від прийнятних значень. Велика відстань Хеммінга може вказувати на аномальний зразок.

4. Кластеризація даних: групування схожих зразків води на основі їхньої відстані Хеммінга може допомогти виявити паттерни забруднення.

Недоліками застосування відстані Хеммінга є те, що ця модель не враховує інші фактори, що можуть вплинути на якість води, такі як візуальні характеристики і органолептичні властивості та залежність від нормативних значень, які можуть відрізнятися залежно від регіону та юрисдикції.

Моделювання якості питної води джерел нецентралізованого водопостачання сільських населених пунктів досліджуваних районів Житомирської області було здійснено за вмістом нітратів, заліза загального та жорсткості.

Результати розрахунків статистичних характеристик наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Статистичні характеристики показників якості питної води

Район	MAE			MSE		
	Нітрати	Залізо	Твердість	Нітрати	Залізо	Твердість
Бердичівський	125,7	1,3	4,2	38282,7	3,5	29,8
Житомирський	84,8	0,9	2,1	18584,6	1,3	7,8
Коростенський	65,5	0,98	4,4	9221,5	1,8	35,4
Новоград-Волинський	68,83	1,1	3,1	10420,2	3,4	17,6

Для визначення відстані Хеммінга вимірювані показники якості питної води (x_i) порівнювали із нормативним значенням (x). Стосовно вмісту нітратів, то при нормативі 50,0 мг/дм³, який встановлено ДСанПіН 2.2.4-171-10, відстань збільшується навіть при значеннях значно менших за норматив. Тому для оцінки було використано норматив на рівні 5,0 мг/дм³, який встановлено Директивою Ради 98/83/ЄС про якість води, призначеної для споживання людиною. Отже, значення нормативу для визначення відстані Хеммінга за вмістом нітратів описується рівнянням 4:

$$x = \begin{cases} 50, HD \uparrow \\ 5, HD \downarrow \end{cases}, \quad (4)$$

де x – нормативне значення вмісту нітратів, мг/дм³;

HD = відстань Хеммінга.

Для оцінювання якості питної води за вмістом показника загальної твердості також був використаний норматив, наведений у Директиві ЄС на рівні 7,0 ммоль/дм³. Стосовно вмісту заліза, то його нормативне значення було на рівні 1,0 мг/дм³, що регламентується ДСанПіН 2.2.4-171-10.

У такий спосіб, на основі розрахунків відстані Хеммінгу були розроблені моделі якості питної води (рис. 1).

У результаті моделювання якості питної води за відстанню Хеммінга встановлено, що вода прийнятної якості описується відстанню до рівня 16,8, тоді як перевищення цього рівня вказує на зростання ризиків.

Використання відстані Хеммінга дозволило отримати інтегральну оцінку якості води у відсотках придатних зразків (табл. 2).

Зокрема, у Бердичівському районі лише 36,4 % зразків відповідали вимогам, тоді як 40 % віднесено до категорії критичної якості (рис. 2). У Житомирському (рис. 3) та Коростенському районах (рис. 4) показники кращі: понад 44 % зразків придатні, але 19–22 % класифікуються як критично забруднені. У Новоград-Волинському районі 40 % зразків були придатними, але понад п'ята частина – критичної якості (рис. 5).

Отримані результати досліджень свідчать, що в усіх досліджуваних районах існує значна частка зразків питної води, які не відповідають нормативам. Найгірші показники зафіксовано у Бердичівському районі, де частка критично забруднених джерел досягає 40 %.

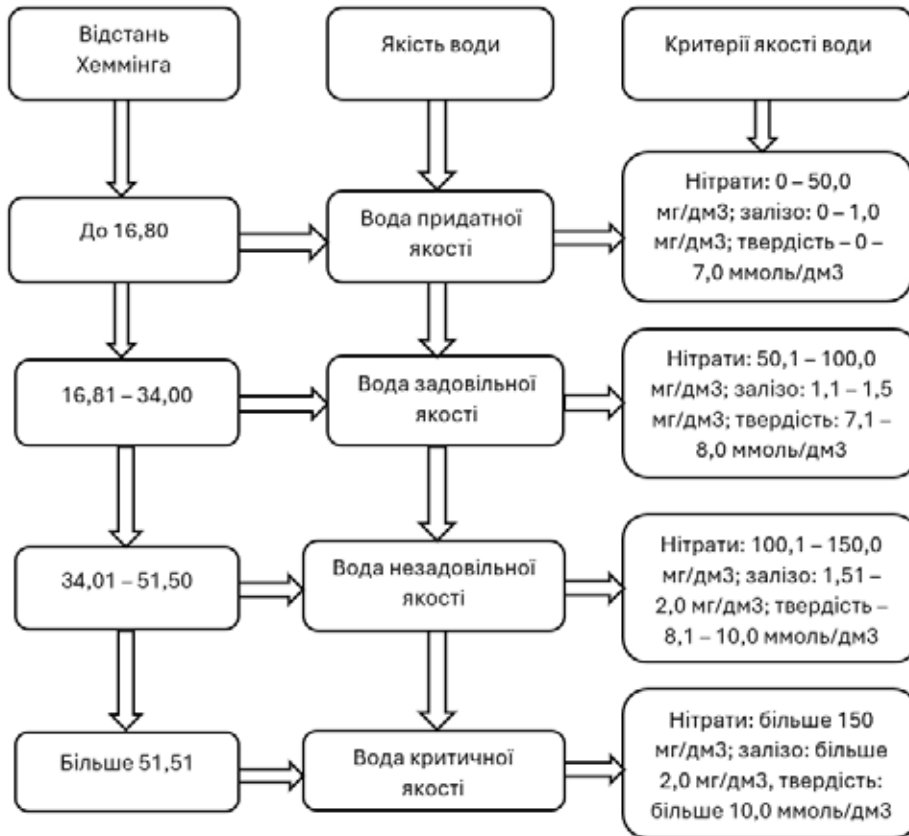


Рис. 1. Критерії оцінки якості питної води за відстанню Хеммінга

Таблиця 2. Інтегральна оцінка якості питної води за відстанню Хеммінга, %

Район	Придатна	Критична	Непридатна
Бердичівський	36,4	40,0	23,6
Житомирський	44,6	21,5	33,9
Коростенський	44,4	19,8	35,8
Новоград-Волинський	40,0	21,4	38,6

Основним фактором відхилень є перевищення вмісту нітратів, що становить ризик для здоров'я, особливо для дітей. Відстань Хеммінга чітко відобразила ці відхилення у вигляді збільшення інтегрального показника.

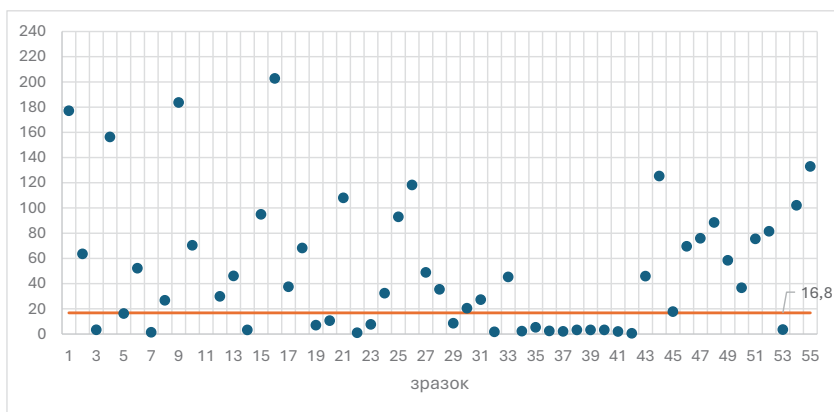


Рис. 2. Розподіл зразків питної води за відстанню Хеммінга у Бердичівському районі

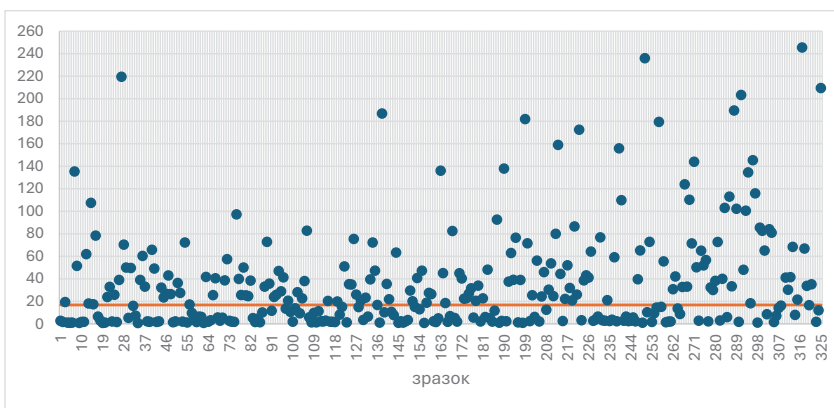


Рис. 3. Розподіл зразків питної води за відстанню Хеммінга у Житомирському районі

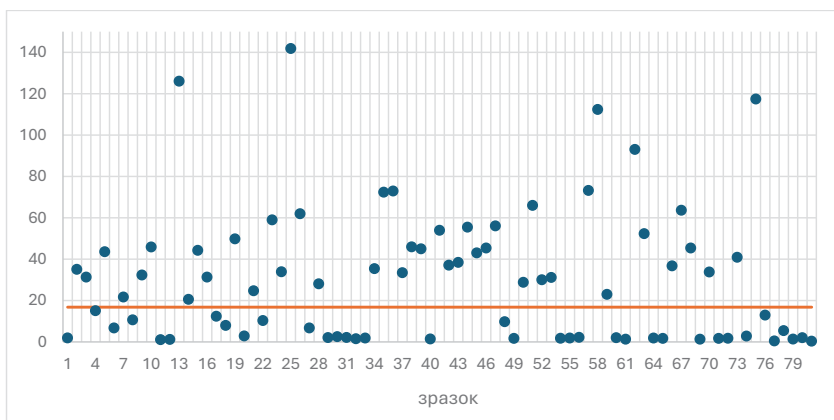


Рис. 4. Розподіл зразків питної води за відстанню Хеммінга у Коростенському районі

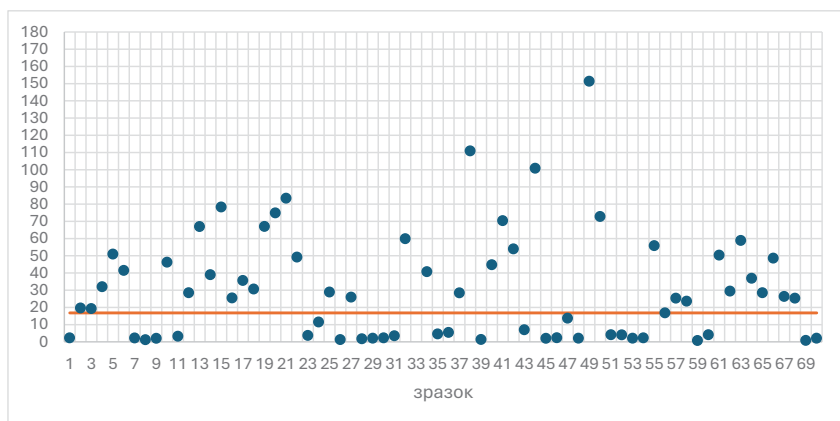


Рис. 5. Розподіл зразків питної води за відстанню Хеммінга у Новоград-Волинському районі

У світовій практиці інтегральні методи оцінки якості води базуються переважно на Water Quality Index (WQI) або нечітких методах багатокритеріального аналізу [31]. Отримані результати підтверджують, що метрика Хеммінга є ефективною альтернативою, оскільки забезпечує швидкість обчислення, можливість автоматизації моніторингу та високу чутливість до навіть незначних відхилень від нормативів.

На відміну від WQI, що вимагає вагових коефіцієнтів, метод відстані Хеммінга простіший у реалізації й менш залежний від експертних припущень. Це підвищує об'єктивність оцінки та знижує ризик суб'єктивних спотворень.

Результати дослідження мають безпосереднє значення для системи екологічної безпеки у громадах, оскільки органи місцевого самоврядування отримують інструмент для оперативного контролю, є можливість здійснювати кластеризацію джерел водопостачання за рівнем ризику, а також створюється основа для розробки інтерактивних картографічних сервісів із позначенням «червоних зон» небезпечних джерел.

Застосування цього підходу також дозволяє формувати рекомендації для населення, наприклад, щодо необхідності встановлення систем доочистки чи використання альтернативних джерел водопостачання.

Висновки. Якість питної води в сільських районах Житомирщини залишається критичною: значна частка зразків не відповідає нормативним вимогам за вмістом нітратів, загального заліза та показником жорсткості. Найбільш проблемним виявився Бердичівський район, де частка критично забруднених зразків досягає 40 %. Метрика Хеммінга підтвердила свою ефективність як простий, об'єктивний та гнучкий метод інтегральної оцінки якості питної води. Вона дозволяє не лише визначати факт пере-

вищення окремих нормативів, а й кількісно оцінювати загальний рівень відхилень, що робить її корисною для системного моніторингу.

Інтегральні результати показали, що в середньому лише 36–45 % зразків у досліджених районах відповідають санітарним вимогам, тоді як 20–40 % перебувають у критичній зоні. Це свідчить про системний ризик для здоров'я населення, особливо дітей, та вимагає впровадження додаткових заходів контролю й очищення води.

Використання відстані Хеммінга дало змогу створити класифікаційні моделі, що можуть бути інтегровані в автоматизовані системи моніторингу, а також застосовані для кластеризації населених пунктів за рівнем водної небезпеки. Це створює основу для формування інтерактивних картографічних сервісів та прийняття управлінських рішень на рівні громад.

Практична значущість дослідження полягає у можливості застосування методу як у наукових дослідженнях, так і в управлінській діяльності органів місцевого самоврядування, що сприятиме посиленню екологічної безпеки водопостачання, реалізації завдань сталого розвитку (ЦСР-6) та підвищенню якості життя сільського населення.

Подяки. Немає

Фінансування. Немає

Конфлікт інтересів. Немає.

MODELING AND INTEGRAL ASSESSMENT OF DRINKING WATER QUALITY BASED ON THE HAMMING METRIC

*Valerko R.A. – Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor
orcid.org/0000-0003-4716-0100*

*Herasymchuk L.O. – PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor
orcid.org/0000-0002-3166-5588*

*Patseva I.H. – Doctor of Technical Sciences, Professor
orcid.org/0000-0001-6271-7355*

*Zhytomyr Polytechnic State University
valerko_ruslana@ukr.net*

The article examines the problem of ensuring drinking water quality in rural areas of Zhytomyr Region, where a significant portion of the population relies on non-centralized water supply sources. The relevance of the study is determined by the high levels of water contamination with nitrates, iron, and increased hardness, which pose health risks to the population. The importance of applying integral assessment methods is substantiated, as they allow for a quantitative representation not only of individual parameter exceedances but also of the overall structure of deviations from regulatory values. The use of the Hamming metric is proposed as a tool for the integral

assessment of drinking water quality. This method enables quantitative evaluation of differences between experimental indicators and regulatory limits, ensuring simplicity of calculation, objectivity, and the potential for automated monitoring. The study was conducted in four districts of the region Berdychiv, Zhytomyr, Korosten, and Novohrad-Volynskyi – based on three key parameters: nitrate content, total iron, and total hardness. Statistical error characteristics (MAE, MSE) were calculated, and integral indicators of water quality were determined. It was established that only 36 – 45% of samples meet regulatory standards, while 20 – 40% show critical levels of contamination. The poorest results were recorded in the Berdychiv District, where nitrate concentrations exceed the norm by a factor of 2.6. Modeling based on the Hamming distance demonstrated that water of acceptable quality corresponds to metric values up to 16.8, and exceeding this level indicates increased risks. The method proved effective in classifying water samples according to the degree of contamination and allowed for the formation of an integral assessment of water supply sources. The obtained results confirm the feasibility of using the Hamming distance as a simple and reliable alternative to traditional water quality indices, enabling the creation of automated monitoring systems and cartographic services to support community-level management decisions. The practical significance of the study lies in the potential application of the method to enhance the environmental safety of water supply and to contribute to the achievement of the UN Sustainable Development Goals (SDG 6).

Key words: drinking water, quality, nitrates, iron, hardness, integral assessment, Hamming distance, Zhytomyr Region.

ЛІТЕРАТУРА

1. World Health Organization: Drinking-water. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>.
2. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. [Чинний від 2010-05-12]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10>.
3. Директива Ради 98/83/ЄС від 3 листопада 1998 року про якість води, призначеної для споживання людиною. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31998L0083>.
4. Валерко Р. А., Бондарчук В. М., Герасимчук Л. О. Моделювання сумарного показнику якості питної води джерел нецентралізованого водопостачання у межах громад Житомирського району. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського*. 2024. № 2. С. 36-40. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.2.4>.
5. Eguda F. Y., Amoo A. O., Adamu S. B., Ogwumu O. D., Somma S. A., Babura I. B. A mathematical model for water quality assessment: Evidence-based from selected boreholes in Federal University Dutse, Nigeria. *UMYU Scientifica*. 2023. 2(4). P. 161–168. <https://doi.org/10.56919/usci.2324.020>.
6. Li H., Smith C. D., Wang L., Li Z., Xiong C., Zhang R. Combining Spatial Analysis and a Drinking Water Quality Index to Evaluate Monitoring Data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. 16(3). 357. <https://doi.org/10.3390/ijerph16030357>.

7. Simeonov V., Stratis J. A., Samara C., Zachariadis G., Voutsas D., Anthemidis A., Sofoniou M., Kouimtzi T. Assessment of the surface water quality in Northern Greece. *Water Research*. 2003. 37(17). P. 4119–4124. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00398-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00398-1).
8. Hamming R. W. Error detecting and error correcting codes. *Bell System Technical Journal*. 1950. 29(2). P. 147–160. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x>.
9. Cover T. M., Thomas J. A. *Elements of information theory* 2006. (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/047174882X>.
10. Savitha Mary A., Sarukasan D., Kayelvizhi C., Jethruth Emelda Mary L., Josephine Daisy F., Pitchaimani K. An application of site selection for solid waste management system using neutrosophic set. *Neutrosophic Sets and Systems*. 2025. 85. P. 748–765. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15335827>.
11. Vijayalakshmi C., Pushpa M. Optimizing non-linear autoregressive networks with Bird Sea Lion algorithms for effective rainfall forecasting. *Earth Science Informatics*. 2025. 18(3), Article 279. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01768-2>.
12. Lu Y., Yuan Y., Yasenjiang J., Sitahong A., Chao Y., Wang Y. An optimized method for solving the green permutation flow shop scheduling problem using a combination of deep reinforcement learning and improved genetic algorithm. *Mathematics*. 2025. 13(4), 545. <https://doi.org/10.3390/math13040545>.
13. Hong S.-p., Kim T., Lee S. A precision pump schedule optimization for the water supply networks with small buffers. *Omega*. 2019. 82. P. 24–37. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.12.001>.
14. Sivakumar C., Maragatha Meenakshi P., Iampan A., Rajesh N., Mariyappan S. Logarithmic Pythagorean neutrosophic vague aggregating operators and their real-life applications. *International Journal of Neutrosophic Science*. 2024. 23(3). P. 111–130. <https://doi.org/10.54216/IJNS.230310>.
15. Palanikumar M., Arulmozhi K., Jana C., Pal M. Multiple-attribute decision-making spherical vague normal operators and their applications for the selection of farmers. *Expert Systems*. 2023. 40(3), e13188. <https://doi.org/10.1111/exsy.13188>.
16. Duque Anton S., Schotten H. D. Intrusion detection in binary process data: Introducing the Hamming-distance to Matrix Profiles. *IEEE WoWMoM*. 2020. P. 347–353. <https://doi.org/10.1109/WoWMoM49955.2020.00065>.
17. Sindhu S. S., Nair D. S., Maya V. S., Thanseeha M. T., Vishnu Hari C. Disaster management from social media using machine learning. In *Proceedings of the International Conference on Advances in Computing, Communication and Control (ICACC)*. 2019. P. 246–252. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICACC48162.2019.8986198>.

18. Dinardo S., Fenoglio-Marc L., Buchhaupt C. K., Becker M., Scharroo R., Fernandes M. J., Benveniste J. Coastal SAR and PLRM altimetry in German Bight and West Baltic Sea. *Advances in Space Research*. 2018. 62(6). P. 1371–1404. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.12.018>.
19. Bazeia D., Pereira M. B. P. N., Brito A. V., de Oliveira B. F., Ramos J. G. G. S. A novel procedure for the identification of chaos in complex biological systems. *Scientific Reports*. 2017. 7, 44900. <https://doi.org/10.1038/srep44900>.
20. Obidegwu D. C., Chassagne R. L., MacBeth C. D. Seismic assisted history matching using binary image matching. In *Proceedings of the SPE Reservoir Simulation Symposium*. 2015. P. 1119–1140. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/174310-MS>.
21. Qian X., Liu M., Liu Z. Emergency resource demand forecast model for oil and gas long-distance pipeline accidents based on CBR. *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*. 2011. 32 (Suppl. 2), 350–354.
22. Валерко Р. А., Герасимчук Л. О., Романчук Л. Д. Моделювання якості питної води методом «Відстань Хеммінга». *Екологічний стан навколишнього середовища та раціональне природокористування в контексті сталого розвитку* : матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції (24–25 жовтня 2024 року, м. Херсон) / ХДАЕУ. – Одеса : Олді+, 2024. С. 74-77.
23. AN D., Zhang X., Liu W., Zhang L. Application of Hamming distance method in fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality near landfill. *Environmental Engineering*. 2013. 31(2). P. 123-127. <https://www.hjgcjxb.org.cn/en/article/doi/10.3969/j.issn.1674-991X.2013.02.020>.
24. Xu S., Wang T., Hu S. Dynamic Assessment of Water Quality Based on a Variable Fuzzy Pattern Recognition Model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015. 12(2). P. 2230-2248. <https://doi.org/10.3390/ijerph120202230>.
25. Zamri N., Ali A., Omar A. River quality classification using different distances in k-nearest neighbors algorithm. *Procedia Computer Science*, 2022. 203. P. 575-582. <https://strathprints.strath.ac.uk/82430/>.
26. Yan Y. *Anomaly detection in water data using k-nearest neighbors algorithm* (Master's thesis, McMaster University). URL: https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/25041/2/YAN_YAN_201906_M.Sc.pdf.
27. Si X., Zhang Y. Quality assessment of surface water environment based on improved grey correlation method. *Proceedings (conference)*. 2016. P. 175–180.
28. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2023 році / Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. URL: <https://mtu>.

- gov.ua/content/nacionalna-dopovid-pro-yakist-pitnoi-vodi-ta-stan-pitnogo-vodopostachannya-v-ukraini.html.
29. Valerko R., Herasymchuk L., Pitsil A., Palkevich J. GIS-based assessment of risk for drinking water contamination to children's health in rural settlements. *Ekológia (Bratislava)*, 2022. 41(4). P. 312–321. <https://doi.org/10.2478/eko-2022-0032>.
30. UN World Water Development Report 2019. URL: <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2019>.
31. Herasymchuk L., Romanchuk L., Valerko R. Water quality from the sources of non-centralized water supply within the rural settlements of Zhytomyr region. *Ekológia (Bratislava)*. 2022. 41(2). P. 126–134. <https://doi.org/10.2478/eko-2022-0013>.

REFERENCES

1. World Health Organization. (2022). *Drinking-water*. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>.
2. DSanPiN 2.2.4-171-10. (2010). *Hihiiienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoj dlia spozhyvannia liudynoiu* [Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption]. Effective from May 12, 2010. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10>. [in Ukrainian].
3. Council of the European Union. (1998). *Council Directive 98/83/EC on the quality of water intended for human consumption*. Official Journal of the European Communities. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31998L0083>.
4. Valerko, R. A., Bondarchuk, V. M., Herasymchuk, L. O. (2024). Modeliuvannia sumarnoho pokaznyku yakosti pytnoi vody dzherel netsentralizovanoho vodopostachannia u mezhakh hromad Zhytomyrskoho raionu [Modeling of the integral indicator of drinking water quality from non-centralized water supply sources within the communities of Zhytomyr district]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, No. 2, pp. 36–40. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.2.4>. [in Ukrainian].
5. Eguda, F. Y., Amoo, A. O., Adamu, S. B., Ogwumu, O. D., Somma, S. A., Babura, I. B. (2023). A mathematical model for water quality assessment: Evidence-based from selected boreholes in Federal University Dutse, Nigeria. *UMYU Scientifica*, 2(4), 161–168. <https://doi.org/10.56919/usc.2324.020>.
6. Li, H., Smith, C. D., Wang, L., Li, Z., Xiong, C., Zhang, R. (2019). Combining Spatial Analysis and a Drinking Water Quality Index to Evaluate Monitoring Data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(3), 357. <https://doi.org/10.3390/ijerph16030357>.

7. Simeonov, V., Stratis, J. A., Samara, C., Zachariadis, G., Voutsas, D., Anthemidis, A., Sofoniou, M., Kouimtzis, T. (2003). Assessment of the surface water quality in Northern Greece. *Water Research*, 37(17), 4119–4124. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00398-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00398-1).
8. Hamming, R. W. (1950). Error detecting and error correcting codes. *Bell System Technical Journal*, 29(2), 147–160. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x>.
9. Cover, T. M., Thomas, J. A. (2006). *Elements of information theory* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/047174882X>.
10. Savitha Mary, A., Sarukasan, D., Kayelvizhi, C., Jethruth Emelda Mary, L., Josephine Daisy, F., Pitchaimani, K. (2025). An application of site selection for solid waste management system using neutrosophic set. *Neutrosophic Sets and Systems*, 85, 748–765. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15335827>.
11. Vijayalakshmi, C., Pushpa, M. (2025). Optimizing non-linear autoregressive networks with Bird Sea Lion algorithms for effective rainfall forecasting. *Earth Science Informatics*, 18(3), Article 279. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01768-2>.
12. Lu, Y., Yuan, Y., Yansenjiang, J., Sitahong, A., Chao, Y., Wang, Y. (2025). An optimized method for solving the green permutation flow shop scheduling problem using a combination of deep reinforcement learning and improved genetic algorithm. *Mathematics*, 13(4), 545. <https://doi.org/10.3390/math13040545>.
13. Hong, S.-p., Kim, T., Lee, S. (2019). A precision pump schedule optimization for the water supply networks with small buffers. *Omega*, 82, 24–37. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.12.001>.
14. Sivakumar, C., Maragatha Meenakshi, P., Iampan, A., Rajesh, N., Mariyappan, S. (2024). Logarithmic Pythagorean neutrosophic vague aggregating operators and their real-life applications. *International Journal of Neutrosophic Science*, 23(3), 111–130. <https://doi.org/10.54216/IJNS.230310>.
15. Palanikumar, M., Arulmozhi, K., Jana, C., Pal, M. (2023). Multiple-attribute decision-making spherical vague normal operators and their applications for the selection of farmers. *Expert Systems*, 40(3), e13188. <https://doi.org/10.1111/exsy.13188>.
16. Duque Anton, S., Schotten, H. D. (2020). Intrusion detection in binary process data: Introducing the Hamming-distance to Matrix Profiles. *IEEE WoWMoM 2020* (pp. 347–353). <https://doi.org/10.1109/WoWMoM49955.2020.00065>.
17. Sindhu, S. S., Nair, D. S., Maya, V. S., Thanseeha, M. T., Vishnu Hari, C. (2019). Disaster management from social media using machine learning. In *Proceedings of the International Conference on Advances in Computing, Communication and Control (ICACC)* (pp. 246–252). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICACC48162.2019.8986198>.

18. Dinardo, S., Fenoglio-Marc, L., Buchhaupt, C. K., Becker, M., Scharroo, R., Fernandes, M. J., Benveniste, J. (2018). Coastal SAR and PLRM altimetry in German Bight and West Baltic Sea. *Advances in Space Research*, 62(6), 1371–1404. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.12.018>.
19. Bazeia, D., Pereira, M. B. P. N., Brito, A. V., de Oliveira, B. F., Ramos, J. G. G. S. (2017). A novel procedure for the identification of chaos in complex biological systems. *Scientific Reports*, 7, 44900. <https://doi.org/10.1038/srep44900>.
20. Obidegwu, D. C., Chassagne, R. L., MacBeth, C. D. (2015). Seismic assisted history matching using binary image matching. In *Proceedings of the SPE Reservoir Simulation Symposium* (pp. 1119–1140). Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/174310-MS>.
21. Qian, X., Liu, M., Liu, Z. (2011). Emergency resource demand forecast model for oil and gas long-distance pipeline accidents based on CBR. *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*, 32(Suppl. 2), 350–354.
22. Valerko, R. A., Herasymchuk, L. O., Romanchuk, L. D. (2024). Modeliuvannia yakosti pytnoi vody metodom “Vidstan Khemminga” [Modeling of drinking water quality using the “Hamming distance” method]. *Ekolohichniy stan navkolyshnoho seredovyshcha ta ratsionalne pryrodokorystuvannia v konteksti staloho rozvytku: Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference* (October 24–25, 2024, Kherson). KhDAEU. Odesa: Oldi+, pp. 74–77. [in Ukrainian].
23. AN, D., Zhang, X., Liu, W., Zhang, L. (2013). Application of Hamming distance method in fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality near landfill. *Environmental Engineering*, 31(2), 123-127. <https://www.hjgcjxb.org.cn/en/article/doi/10.3969/j.issn.1674-991X.2013.02.020>.
24. Xu, S., Wang, T., Hu, S. (2015). Dynamic Assessment of Water Quality Based on a Variable Fuzzy Pattern Recognition Model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(2), 2230-2248. <https://doi.org/10.3390/ijerph120202230>.
25. Zamri, N., Ali, A., Omar, A. (2022). River quality classification using different distances in k-nearest neighbors algorithm. *Procedia Computer Science*, 203, 575-582. <https://strathprints.strath.ac.uk/82430/>.
26. Yan, Y. (2019). *Anomaly detection in water data using k-nearest neighbors algorithm* (Master’s thesis, McMaster University). URL: https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/25041/2/YAN_YAN_201906_M.Sc.pdf.
27. Si, X., Zhang, Y. (2016). Quality assessment of surface water environment based on improved grey correlation method. *Proceedings (conference)*, 175–180.

28. Ministerstvo rozvytku hromad, terytorii ta infrastruktury Ukrainy. (2023). *Natsionalna dopovid pro yakist pytnoi vody ta stan pytnoho vodopostachannia ta vodovidvedennia v Ukraini u 2023 rotsi* [National report on the quality of drinking water and the state of drinking water supply and sewerage in Ukraine in 2023]. <https://mtu.gov.ua/content/nacionalna-dopovid-pro-yakist-pitnoi-vodi-ta-stan-pitnogo-vodopostachannya-v-ukraini.html>. [in Ukrainian].
29. Valerko, R., Herasymchuk, L., Pitsil, A., Palkevich, J. (2022). GIS-based assessment of risk for drinking water contamination to children's health in rural settlements. *Ekológia (Bratislava)*, 41(4), 312–321. <https://doi.org/10.2478/eko-2022-0032>.
30. UNESCO. (2019). *The United Nations world water development report 2019: Leaving no one behind*. United Nations World Water Assessment Programme. URL: <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2019>.
31. Herasymchuk, L., Romanchuk, L., Valerko, R. (2022). Water quality from the sources of non-centralized water supply within the rural settlements of Zhytomyr region. *Ekológia (Bratislava)*, 41(2), 126–134. <https://doi.org/10.2478/eko-2022-0013>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 31.12.2025