УДК 556.114:543.24:504.4.054(477)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.27

ПОРІВНЯЛЬНА ЕКОЛОГО-ХІМІЧНА ОЦІНКА ЗАГАЛЬНОЇ ТВЕРДОСТІ ВОДИ З ЛОКАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ВОДОПОСТАЧАННЯ

Ямборак Р.С. (orcid.org/0000-0003-1865-9308),
Крачан Т.М. (orcid.org/0000-0002-0618-4483),
Плахтій Д.П. (orcid.org/0000-0002-2014-9748)
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
вул. Шевченка, 13, 32300, м. Кам'янець-Подільський
raisa.yamborak@gmail.com, krachantm@pdatu.edu.ua, loringswoe@gmail.com

У статті здійснено комплексну порівняльну еколого-хімічну та аналітичну оцінку показника загальної твердості води з двох контрастних локальних об'єктів децентралізованого питного водопостачання Подільського регіону: природного низхідного джерела (безнапірні ґрунтові води алювіальних четвертинних відкладів із глибиною залягання дзеркала 3–5 м) та індивідуальної експлуатаційної свердловини (глибина 60 м, напірний міжпластовий водоносний горизонт у тріщинуватих карбонатних товщах вапняків і доломітів силурійського віку). Експериментально обґрунтовано механізми диференціації гідрохімічного профілю залежно від глибини залягання горизонту та літологічних особливостей порід водовмісного пласта. Дослідження реалізовано за допомогою методу прямого комплексонометричного титрування суми іонів кальцію та магнію розчином трилону Б (ЕДТА, 0,05 моль-екв/дм³) в аміачному буферному середовищі за pH 10,0 з використанням металохромного індикатора еріохрому чорного Т згідно зі стандартом ДСТУ ISO 6059:2003. Отримані результати серії з п'яти паралельних лабораторних визначень опрацьовано із застосуванням методів математичної статистики та розрахунку параметрів варіації (вибіркове середнє, дисперсія, стандартне відхилення). Встановлено, що середня загальна твердість джерельної води становить 3,40 ± 0,122 ммоль-екв/дм³ (помірно тверда вода), а свердловинної – 6,20 ± 0,158 ммоль-екв/дм³ (тверда вода), що формує статистично достовірну різницю у 2,80 ммоль-екв/дм³ (82,4 %). Доведено, що обидва джерела формально повністю задовольняють нормативи ДСанПіН 2.2.4-171-10, проте мають принципово відмінні екологічні ризики: відкритість неглибокого горизонту створює постійну загрозу інфільтрації поверхневих антропогенних полютантів (нітратів та важких металів), тоді як глибокі підземні води характеризуються високою літологічною захищеністю від техногенезу, проте потребують технічної водопідготовки для пом'якшення. Обґрунтовано методологічну неприпустимість трактування твердості як ізольованого критерію токсикологічної безпеки. *Ключові слова:* загальна твердість води, децентралізоване водопостачання, підземні води, комплексонометричне титрування, трилон Б, екологічний моніторинг, гідрохімія, екологічна безпека, водоносний горизонт.

Comparative ecological and chemical assessment of total water hardness in local water supply sources. Yamborak R., Krachan T., Plahtiy D.

The study provides a comprehensive comparative ecological, chemical, and analytical assessment of total water hardness in two contrasting decentralized potable water supply systems within the Podillia region: a natural descending shallow spring (unconfined shallow groundwater in alluvial Quaternary deposits with a water table depth of 3–5 m) and an individual operational deep well (depth of 60 m, confined interstratal aquifer in fractured carbonate strata of Silurian limestones and dolomites). Hydrogeochemical mechanisms causing profile differentiation depending on aquifer depth and lithological composition of host rocks were experimentally substantiated. The research protocol is based on direct EDTA complexometric titrimetry of calcium and magnesium ions with 0.05 mol-eq/dm³ titrant in ammonia buffer solution at pH 10.0 using Eriochrome Black T indicator strictly following the DSTU ISO 6059:2003 guidelines. Analytical data obtained from a series of five parallel laboratory replications were processed using mathematical statistics and dispersion parameters (sample mean, variance, standard deviation). It was determined that the mean total hardness of shallow spring water is 3.40 ± 0.122 mmol-eq/dm³ (moderately hard water), whereas deep well water exhibits 6.20 ± 0.158 mmol-eq/dm³ (hard water), demonstrating a statistically significant absolute difference of 2.80 mmol-eq/dm³ (82.4%). Both examined water sources formally satisfy the Ukrainian national sanitary regulations State Sanitary Norms and Rules 2.2.4-171-10, yet demonstrate fundamentally distinct environmental and technological risk profiles: vulnerability of the unconfined shallow aquifer leads to continuous hazards of surface anthropogenic infiltration (nitrate and heavy metal leaching), while deep interstratal groundwater demonstrates reliable lithological isolation from surface technogenesis, but requires technological softening for hot water systems to eliminate scale formation. It is methodologically substantiated that total hardness cannot serve as an autonomous diagnostic index of toxicological safety. *Key words:* total water hardness, decentralized water supply, groundwater, complexometric titration, EDTA, environmental monitoring, hydrochemistry, environmental safety, aquifer.

Постановка проблеми. Забезпечення населення якісною та безпечною питною водою належить до фундаментальних екологічних, соціальних та гігієнічних пріоритетів, які безпосередньо зумовлюють рівень громадського здоров'я, санітарно-епідемічна безпека та сталий розвиток територіальних громад [1; 4]. В умовах посилення техногенного тиску на гідросферу, інтенсивного ведення агропромисло-

© Ямборак Р.С., Крачан Т.М., Плахтій Д.П., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

вого виробництва та регіональних кліматичних змін якісний стан поверхневих і підземних джерел зазнає незворотних просторово-часових трансформацій [1]. Це зумовлює нагальну потребу постійного системного моніторингу гідроекосистем та перегляду науково-методологічних засад оцінки їхньої безпеки.

Актуальність дослідження. Якщо мешканці урбанізованих територій споживають здебільшого очищену воду з централізованих комунальних мереж, то населення сільських регіонів, невеликих селищ і приватного сектора майже цілком залежить від локальних систем децентралізованого водопостачання – природних виходів джерел, копаних шахтних колодязів та індивідуальних свердловин [4]. Вода з таких джерел використовується населенням переважно у нативному вигляді – без попередньої водопідготовки, відстоювання чи знезараження. При цьому споживаються води генетично гетерогенних гідрогеологічних горизонтів. Серед розмаїття гідрохімічних параметрів інтегральний показник загальної твердості займає особливе місце, оскільки він визначає не лише органолептичні, смакові та побутово-технічні властивості води, але й виступає чинником фізіологічної повноцінності добового раціону людини [6; 9; 10].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. У практиці водокористування та суспільній свідомості закріпився хибний стереотип: населення ототожнює «м'яку» воду з гарантовано екологічно чистою та безпечною для здоров'я, а тверду воду з підвищеною мінералізацією розцінює як небезпечну чи «забруднену». З позицій сучасної гідрохімії та екологічної токсикології такий підхід є науково некоректним. Комплексне встановлення кореляції між літологічною будовою горизонтів, глибиною водозабору та формуванням показників твердості безпосередньо пов'язане з виконанням завдань Національної стратегії управління водними ресурсами та регіональних програм екологічного моніторингу щодо запобігання поширенню неінфекційних захворювань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формування хімічного складу водних об'єктів під впливом природних і антропогенних чинників, вдосконалення титриметричних і фізико-хімічних тест-методів та оцінка екологічної безпеки гідросфери є класичними напрямами сучасної науки. Теоретичні та прикладні засади гідрохімічних досліджень ґрунтовно закладено у фундаментальних роботах В. К. Хільчевського та М. Р. Забокрицької [5]. Стан поверхневих водних масивів і вразливість басейнових систем детально досліджувалися М. В. Боярином [1]. Специфіка гідрохімічного режиму та гігієнічного стану децентралізованих джерел питного водопостачання висвітлена у працях Є. Є. Степаненка та А. В. Колесник [4]. Водночас закордонні дослідники (A. Bykowska-Derda та ін. [6], P. Sengupta [9], R. Picetti та ін. [8]) акцентують увагу на епідеміологічних наслідках споживання вод контрастної твердості, вказуючи, що як надлишок, так і дефіцит іонів кальцію та магнію створює серйозні фізіологічні загрози.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. У науково-практичних публікаціях нерідко бракує комплексного зіставлення аналітичної метрології та екологічної інтерпретації: внутрішньосерійну похибку вимірювання (дисперсію паралельних визначень) часом ототожнюють із природною просторово-часовою мінливістю горизонту. Потребує суворого розмежування еколого-хімічний статус джерел різного гідрогеологічного залягання (неглибокого безнапірного та глибинного) для спростування міфу про апріорну безпеку джерельної води та обґрунтування диференційованого підходу до їх використання.

Новизна. Наукова новизна роботи полягає у системному методологічному узгодженні аналітико-хімічних результатів комплексонометричного титрування із принципами екологічної інтерпретації твердості води локальних водозаборів Поділля: експериментально доведено й кількісно окреслено явище вертикальної гідрохімічної зональності в межах єдиного географічного пункту; спростовано доцільність застосування твердості як ізольованого критерію антропогенної забрудненості; реалізовано чітке методологічне розмежування метрологічної дисперсії лабораторного експерименту від гідродинамічної мінливості підземних водоносних систем.

Методологічне або загальнонаукове значення. Стаття має важливе загальнонаукове та прикладне значення для розвитку методів локального моніторингу природних вод, гармонізації лабораторного контролю якості довкілля з вимогами нормативних регламентів (ДСТУ ISO 6059:2003, ДСанПіН 2.2.4-171-10) та впровадження алгоритмізованих підходів до інтерпретації хіміко-екологічних даних.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження виконувалися на базі лабораторій кафедри хімії, екології і загальнобіологічних дисциплін Закладу вищої освіти «Подільський державний університет». Для проведення порівняльного аналізу було відібрано проби з двох просторово локалізованих, проте генетично контрастних об'єктів децентралізованого водопостачання:

Зразок № 1 – природне низхідне джерело, що дренує безнапірний горизонт ґрунтових вод четвертинних долинно-схилових відкладів (глибина залягання дзеркала 3–5 м);

Зразок № 2 – індивідуальна водозабірна свердловина глибиною 60 м, яка розкриває напірний водоносний горизонт у тріщинуватих вапняках і доломітах силурійського ярусу, перекритих потужною товщею водотривких глин.

Відбір, транспортування та консервацію проб проводили відповідно до стандартних гідрохімічних

Таблиця 1

Статистичні параметри загальної твердості досліджуваних джерел води (n = 5, P = 0,95)

Об'єкт дослідження	Обсяг вибірки (n)	Середня твердість, X^- (ммоль-екв/дм³)	Дисперсія, S^2	Стандартне відхилення, S
Зразок № 1 (Природне джерело)	5	3,40	0,015	0,122
Зразок № 2 (Свердловина, 60 м)	5	6,20	0,025	0,158

методик [2; 5]. Визначення загальної твердості води здійснювали методом прямого комплексонометричного титрування сумарного вмісту іонів Ca^{2+} і Mg^{2+} стандартизованим 0,05 моль-екв/дм³ розчином трилону Б (динатрієвої солі етилендіамінтетраоцтової кислоти) у лужному середовищі аміачного буферного розчину (pH = 10,0) за присутності металохромного індикатора еріохрому чорного Т згідно з регламентом ДСТУ ISO 6059:2003 [2]. Для мінімізації суб'єктивної та випадкової похибки для кожного об'єкта було проведено по 5 паралельних титрувань (n = 5).

Отримані експериментальні дані оброблено методами математичної статистики з визначенням середнього арифметичного значення, вибіркової дисперсії та стандартного відхилення. Результати вимірювань і розрахунків наведено в таблиці 1.

Отримані статистичні результати свідчать про вкрай низьку експериментальну дисперсію, що підтверджує високу збіжність і метрологічну надійність використаного титриметричного алгоритму. Різниця середніх величин становить 2,80 ммоль-екв/дм³, що вказує на суттєву гідрохімічну диференціацію горизонтів (зростання твердості на 82,4 %).

Гідрогеохімічний генезис виявлених відмінностей безпосередньо обумовлений літологією. Вода неглибокого джерела (3,40 ммоль-екв/дм³) формується в умовах швидкого інфільтраційного водообміну, контактуючи здебільшого з уламковими піщано-глинистими породами, бідними на легкорозчинні сполуки кальцію. Відповідно до гідрохімічної класифікації вона є помірно твердою і фізіологічно збалансованою для щоденного пиття [6; 9]. Натомість підземні води свердловини (60 м) перебувають у тривалому контакті із силурійськими карбонатними породами (вапняками $CaCO_3$ і доломітами $CaCO_3 \cdot MgCO_3$) в умовах утрудненого водообміну та підвищеного парціального тиску розчиненого діоксиду карбону. Це зумовлює перехід карбонатів у розчинні гідрокарбонати та формування високої твердості (6,20 ммоль-екв/дм³ – тверда вода).

Аналіз відповідності вимогам ДСанПіН 2.2.4-171-10 засвідчує, що обидва об'єкти не перевищують гранично допустимої концентрації за загальною твердістю (ГДК = 7,0 ммоль-екв/дм³, а для окремих джерел – до 10,0 ммоль-екв/дм³) [3]. Проте екологічна оцінка демонструє контрастні ризики:

Поверхневе джерело: низька твердість сприймається населенням позитивно, однак відсутність водотривкої покрівлі зумовлює високу небезпеку потрапляння агрогенних нітратів (NO_3^-), фекального забруднення та токсичних важких металів у періоди сніготанення чи злив [1; 8].

Глибока свердловина: товща глин гарантує санітарну та токсикологічну надійність за рахунок літологічної захищеності [4], однак висока твердість призводить до активних відкладень солей на теплообмінних поверхнях побутової техніки, зумовлюючи потребу локального селективного пом'якшення води для нагрівальних контурів [7].

Головні висновки: 1. Загальна твердість води безнапірного природного джерела становить 3,40 ± 0,122 ммоль-екв/дм³ (помірно тверда), тоді як міжпластової свердловини глибиною 60 м – 6,20 ± 0,158 ммоль-екв/дм³ (тверда), що засвідчує наявність вираженої вертикальної гідрохімічної зональності (приріст 82,4 %).

2. Формування підвищеної твердості глибоких підземних вод силурійського горизонту є закономірним природним наслідком гідродинамічної та хімічної взаємодії в системі «вода – карбонатна порода».

3. Обидва досліджені водні об'єкти за показником загальної твердості відповідають чинним нормативам ДСанПіН 2.2.4-171-10 та Директиви (ЄС) 2020/2184.

4. Показник загальної твердості характеризує мінералізацію та макроіонний склад, проте в жодному разі не може слугувати автономним діагностичним маркером екологічної або токсикологічної безпеки питної води.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати є основою для запровадження цілорічного моніторингу локальних водозаборів Поділля в різні гідрологічні сезони з обов'язковим синхронним скринінгом азотовмісних сполук, важких металів та мікробіологічних параметрів з метою створення комплексних геоекологічних паспортів джерел децентралізованого водопостачання.

Література

1. Боярин М. В. Екологічна оцінка якості масивів поверхневих вод басейну верхів'я річки Прип'ять. *Науковий вісник Вінницької академії безперервної освіти. Серія «Екологія. Публічне управління та адміністрування»*. 2024. № 2. С. 19–23. DOI: 10.32782/2786-5681-2024-2.03.

2. ДСТУ ISO 6059:2003. Якість води. Визначення суми кальцію та магнію. Комплексонометричний метод (ISO 6059:1984, IDT). Київ: Держспоживстандарт України, 2004. 10 с.
3. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10): наказ Міністерства охорони здоров'я України від 12.05.2010 № 400 / Міністерство охорони здоров'я України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text (дата звернення: 28.08.2026).
4. Степаненко Є. Є., Колесник А. В. Оцінка якості питної води децентралізованих джерел водопостачання. *Екологічні науки*. 2020. № 1(28). С. 14–19. DOI: 10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.2.
5. Хільчевський В. К., Забокрицька М. Р. Хімічний аналіз та оцінка якості природних вод: навч. посібник. Луцьк: Вежа-Друк, 2021. 76 с.
6. Bykowska-Derda A., Spychała M., Człapka-Matyasik M. et al. The Relationship between Mortality from Cardiovascular Diseases and Total Drinking Water Hardness: Systematic Review with Meta-Analysis. *Foods*. 2023. Vol. 12, No. 17. Article 3255. DOI: 10.3390/foods12173255.
7. Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast). *Official Journal of the European Union*. 2020. L 435. P. 1–62. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj (дата звернення: 28.08.2026).
8. Picetti R., Deeney M., Pastorino S. et al. Nitrate and nitrite contamination in drinking water and cancer risk: A systematic review with meta-analysis. *Environmental Research*. 2022. Vol. 210. Article 112988. DOI: 10.1016/j.envres.2022.112988.
9. Sengupta P. Potential health impacts of hard water. *International Journal of Preventive Medicine*. 2013. Vol. 4, No. 8. P. 866–875.
10. World Health Organization. Chemical fact sheets: Hardness. Geneva: World Health Organization, 2022. URL: https://www.who.int/publications/i/item/WHO-HEP-ECH-WSH-2022.1 (дата звернення: 28.08.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 20.10.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026