

УДК 628.162: 613.34.: 502.65+546.134

DOI: <https://zenodo.org/records/15648845>

ОЦІНКА ПОТЕНЦІЙНИХ РИЗИКІВ ХЛОРРЕЗИСТЕНТНИХ БАКТЕРІЙ (CRB) У ПИТНІЙ ВОДІ

**Ігнат'єв О.М.¹, Мокієнко А.В.², Солтик С. М.¹, Квасницька О.Б.³,
Садовий К.К.¹, Красікова Д.Р.¹**

¹Одеський національний медичний університет

²Національний університет «Острозька академія»

³Буковинський державний медичний університет

E-mail: mokienkoav56@gmail.com

ASSESSMENT OF POTENTIAL RISKS OF CHLORINE-RESISTANT BACTERIA (CRB) IN DRINKING WATER

**Ignatyev O.M.¹, Mokienko A.V.², Soltyk S.M.¹, Kvasnytska O.B.³,
Sadoviy K.K.¹, Krasikova D.R.¹**

¹Odessa National Medical University

²Ostroh Academy National University

³Bukovinian State Medical University

E-mail: mokienkoav56@gmail.com

Summary/Резюме

The review aimed to summarize the results of studies on chlorine-resistant bacteria (CRB) in drinking water. Analysis of existing methods for assessing chlorine resistance showed the need for systematic study of CRB. The lack of a generally accepted method for assessing chlorine resistance was emphasized. The genera, sources and chlorine resistance of typical isolated CRB strains were summarized. It was confirmed that chlorine disinfection cannot completely control the risks of CRB development (pathogenicity, antibiotic resistance and microbial growth). The highest frequency of detection of pathogenic or conditionally pathogenic CRB of the genera *Mycobacterium*, *Bacillus*, *Legionella*, *Pseudomonas* and *Sphingomonas* was established. The lack of definition of non-pathogenic CRB, which are most often found in drinking water, was emphasized. An assessment method using the logarithmic rate of removal of *E. coli* as a reference indicator was proposed. The use of the recommended method as a comparative guideline for assessing chlorine resistance is justified, which has great potential for studying specific types of chlorine-resistant CRB.

Keywords: *chlorine-resistant bacteria (CRB), recommended evaluating method, chlorine disinfection, microbial growth risks.*

Огляд мав на меті узагальнення результатів досліджень хлоррезистентних бактерій (CRB) у питній воді. Аналіз існуючих методів оцінки стійкості до хлору показав необхідність систематичного вивчення CRB. Підкреслено відсутність загальноприйнятого методу оцінки стійкості до хлору. Підсумовано роди, джерела та стійкість до хлору типових ізольованих штамів CRB. Підтверджено, що дезінфекція хлором не може повністю контролювати ризики розвитку CRB (патогенності, стійкості до антибіотиків та росту мікробів). Встановлено найбільшу частоту виявлення патогенних або умовно-патогенних CRB родів *Mycobacterium*, *Bacillus*, *Legionella*, *Pseudomonas* та *Sphingomonas*. Підкреслено відсутність визначення непатогенних CRB, які найбільш

часто знаходять у питній воді. Запропоновано метод оцінки з використанням логарифмічної швидкості видалення *E. coli* як референтного показника. Обґрунтовано застосування рекомендованого методу як порівняльного орієнтиру для оцінки стійкості до хлору, що має великий потенціал для вивчення конкретних видів хлоррезистентних CRB.

Ключові слова: хлоррезистентні бактерії (ХРБ), рекомендований метод оцінки, хлорна дезінфекція, ризики росту мікробів.

Дезінфекція води хлором є найпоширенішим засобом контролю мікроорганізмів у системах очищення питної/стічних вод, рекультивації стічних вод та в промислових системах охолодження [1-4]. У системах очищення води на основі мембранних технологій, таких як ультрафільтрація та система зворотного осмосу, хлор використовується не лише як технологія дезінфекції для контролю ризиків для здоров'я, але й як метод очищення або попередньої обробки для контролю біологічних забруднень [1-4]. Наприклад, на заводі Changi NEWater у Сінгапурі протягом усього процесу очищення хлор додається 5 разів, з яких 3 пункти додавання хлору розташовані на стадії попередньої обробки.

Деякі бактерії у питній воді можуть становити ризик для здоров'я, але дезінфекція хлором не може інактивувати всі бактерії [5-9]. Деякі бактерії мають сильнішу стійкість до хлору порівняно зі звичайними, тому їх називають «хлоррезистентними бактеріями» (CRB). Farkashimsley (1964) вперше використав термін «Хлоррезистентні бактерії» [10]. Нещодавно в нових дослідженнях повідомлялося, що CRB широко присутні на водоочисних спорудах, системах водопостачання та системах охолодження [11, 12]. В цьому огляді [13] термін «хлоррезистентність» стосується лише стійкості планктонних клітин і не включає резистентність біоплівки.

Загалом на Web of Science знайдено 1040 статей на тему «хлоррезистентні бактерії». Судячи з публікацій статей, увага до хлоррезистентних бактерій значно зросла з 2001 року, особливо за останні 5 років.

Хоча проблема CRB вже давно вик-

ликає занепокоєння, досі не існує загальноприйнятого наукового визначення CRB та методології кількісної оцінки їхньої здатності до хлоррезистентності. CRB зазвичай визначаються як бактерії з високою стійкістю до хлору або бактерії, які можуть виживати або навіть розмножуватися в присутності залишкового хлору. Jia, Jia et al. [14] припустили, що хлоррезистентність CRB є відносним поняттям і не може бути кількісно визначеною, оскільки на неї впливають умови росту. Однак все ще можливо встановити рекомендований метод порівняння хлоррезистентності серед різних бактеріальних штамів. BOOЗ (2011) запропонувала метод оцінки стійкості патогенних мікроорганізмів до хлору, який ґрунтувався на часі виживання мікроорганізмів при звичайній концентрації залишкового вільного хлору (0,5 мг/л).

Ризики для здоров'я є першочерговою причиною занепокоєння щодо CRB, але останнім часом все більше досліджень виявляють інші ризики CRB. Виявлена кореляція між стійкістю до хлору та стійкістю до антибіотиків, а наявність CRB призводить до збільшення кількості генів стійкості до антибіотиків після дезінфекції [15]. Більше того, CRB у системі водопостачання можуть спричинити корозію трубопроводів та надмірне розростання біоплівки [16]. Останній ризик часто ігнорується, але він дуже важливий: надмірне розмноження CRB призводить до зниження ефективності системи, збільшення споживання енергії та скорочення терміну служби структурних компонентів у мембранних системах виробництва води або промислових системах охолодження [2, 4].

Мікроорганізми, які швидко віднов-

люються після дезінфекції, можуть не вважатися CRB, але також заслуговують на увагу. Після дезінфекції відносна чисельність таких мікроорганізмів швидко зростатиме, що також може мати ризики, подібні до пов'язаних з вищезгаданими CRB.

Дослідження показують, що деякі патогенні або умовно-патогенні бактерії мають хлоррезистентність. Серед різних патогенів, що перебувають у воді, ВООЗ виявила, що лише *Francisella tularensis* та нетуберкульозні мікобактерії мали помірну або високу хлоррезистентність (час виживання перевищував 1 хвилину або 30 хвилин при концентрації вільного хлору 0,5 мг/л) [17]. Однак, деякі дослідження повідомляли про інші патогенні або умовно-патогенні CRB, такі як *Pseudomonas aeruginosa* та *Legionella* [18]. Owoseni [19] виділив хлоррезистентні *Enterococcus* та *Citrobacter spp.*, які є умовно-патогенними патогенами, на станції очищення стічних вод Східної Капської провінції в Південній Африці. Умовно-патогенні мікроорганізми *Enterococcus* та *Salmonella* також були виявлені в знезараженій очищеній воді [20]. Було виявлено, що *Salmonella* має високий рівень регенераційної здатності після дезінфекції хлором [20]. Це призводить до селекції резистентних до хлору патогенних бактерій, реактивація яких в очищеній воді загрожуватиме здоров'ю населення.

Наразі проводиться багато досліджень стійкості до хлору, але об'єктами дослідження є переважно патогенні та умовно-патогенні бактерії. У сучасних дослідженнях все ще є деякі недоліки. З одного боку, ці патогенні та умовно-патогенні бактерії можуть не існувати у питній або очищеній воді; з іншого боку, ризики широко розповсюджених непатогенних CRB ігноруються.

Стійкість до антибіотиків та гени стійкості до антибіотиків (ARG) залишкових бактерій після дезінфекції хлором є одними з актуальних тем досліджень останніх років [21]. Деякі дослідження повідомляли, що дезінфекція хлором при-

зводить до збільшення чисельності бактерій, стійких до антибіотиків. Khan, Beat'tie et al. [15] вивчали зв'язок між стійкістю до антибіотиків та стійкістю до дезінфекції хлором у штаммах бактерій. Було виявлено, що CRB мали вищу мінімальну інгібуючу концентрацію (MIK) для тетрацикліну, сульфаметоксазолу та амоксициліну [15]. Під час дезінфекції хлором питної води стійкість бактеріальної популяції до антибіотиків в цілому зростала [21]. Вищезазначені дослідження показали, що залишкові бактерії після хлорної дезінфекції можуть мати вищий рівень стійкості до антибіотиків, ніж інші бактерії. Деякі дослідження були використані для пояснення успадкованого механізму зв'язку між стійкістю до хлору та стійкістю до антимікробних препаратів. Дослідники виявили, що *Pseudomonas*, *Mycobacteria* та *Clostridium*, які є потенційними бактеріальними хазяїнами ARG у питній воді, виявили стійкість до хлору [22]. Karumathil, Yin et al. [23] виявили, що вплив хлору на *Acinetobacter baumannii* збільшує експресію ефлюксного насоса та активує гени, що забезпечують стійкість до хлорамфеніколу, сульфаніламіду та в-лактамних антибіотиків. Клітини *Pseudomonas aeruginosa*, пошкоджені хлором, також можуть посилювати стійкість до антибіотиків шляхом збільшення експресії ефлюксного насоса [24]. Вважається, що оксидативний стрес запускається хлором та впливає на експресію генів стійкості до антибіотиків [25, 26].

Крім того, заслуговує на увагу горизонтальний перенос ARG серед залишкових бактерій після дезінфекції. Дослідники припустили, що шляхом горизонтального переносу генів непатогенні види мікроорганізмів з ARG можна використовувати як банки генів для патогенних бактерій [27]. Збільшення кількості ARG у залишкових CRB може призвести до підвищення стійкості патогенних бактерій до антибіотиків. Дезінфекція хлором впливає на горизонтальний перенос ARG різними шляхами. Shi, Jia та ін. [28] повідомляли, що дезінфекція хлором може

збільшити відносну кількість ARG. Zhang, Chang et al. [29] виявили, що дезінфекція значно збільшила відносну кількість ARG та стійких до антибіотиків бактерій, що несуть мобільні генетичні елементи (MGE). MGE, як носії ARG, відіграють важливу роль у горизонтальному переносі ARG до бактерій-реципієнтів [30]. Jin, Liu et al. [24] виявили, що дезінфекція хлором інактивує нестійкі до хлору бактерії-носії ARG та вивільняє їх у великій кількості з цілісною генетичною інформацією. Водночас, проникність клітинної мембрани CRB, пошкоджених хлором, посилюється, що дозволяє легше отримувати позаклітинні ARG з подальшим перетворенням на стійкі до антибіотиків бактерії. Ці два ефекти пояснюють механізм, за допомогою якого хлорна дезінфекція посилює горизонтальний перенос гена ARG від нестійких до хлору бактерій до CRB [24].

Деякі дослідження виявили зміни структури мікробної спільноти у фактичних зразках води до та після хлорної дезінфекції, що дає можливість вивчати CRB у процесі очищення води.

У цьому огляді [13] визначено мікроорганізми, відносна чисельність яких збільшується на 200 % після дезінфекції, як «CRB зі збільшеною відотною чисельністю», проаналізовано відповідні результати кількох досліджень та підраховано типи та роди цих CRB. Автори цих досліджень не виділяли бактерій зі збільшеною чисельністю, а також не проводили систематичну оцінку стійкості цих бактерій до хлору. Серед CRB зі збільшеною відотною чисельністю 14 штамів були *Proteobacteria*, 5 штамів — *Firmicutes* та 2 штами — *Actinobacteria*. Роди CRB з найвищою частотою зустрічальності — *Pseudomonas* та *Bacillus*.

Деякі дослідники також оцінювали стійкість до хлору штамів, виділених ними самими або іншими дослідниками. Загалом було знайдено 365 статей з основної колекції Web of Science за темою «стійкі до хлору бактерії». З цих статей відібрано високореlevantні дослідження, а також

доповнено інші дослідження, згадані в цих статтях.

Серед типових ізольованих CRB 21 штам був *Proteobacteria*, 9 штамів — *Firmicutes*, а 14 штамів — *Actinobacteria*. Родами ізольованих CRB з найвищою частотою зустрічальності були *Mycobacterium*, *Bacillus*, *Legionella*, *Pseudomonas* та *Sphingomonas*. Роди з найвищою частотою виділених та виявлених CRB відрізнялися, оскільки дослідження приділяють більше уваги стійкості до хлору патогенних бактерій та рідко виділяють непатогенні CRB.

Деякі дослідники вважали, що грам-позитивні бактерії мають сильнішу стійкість до хлору [31]. Однак більшість ізольованих CRB були грамнегативними бактеріями, за винятком *Bacillus*, *Staphylococcus*, *Clostridium*, *Enterococcus*.

У деяких статтях представлено номери доступу GenBank хлоррезистентних штамів. Інформація про послідовність генів цих штамів та *Escherichia coli* була використана для встановлення еволюційного дерева сусідства (n-j). Встановлено, що хлоррезистентні бактерії широко поширені в багатьох типах і не мають подібних генетичних зв'язків. Генетична різниця між *E. coli* (бактеріями, що не є хлоррезистентними) та CRB не більша, ніж між CRB, що вказує на відсутність довгострокового селективного тиску, пов'язаного з хлоррезистентністю в природі.

Крім того, існують сумніви щодо того, чи можна деякі ізольовані мікроорганізми називати CRB у вищезгаданих дослідженнях. Оскільки використовувалися різні методи оцінки стійкості до хлору, важко порівняти стійкість цих мікроорганізмів до хлору та оцінити їхню здатність до стійкості до хлору. Тому, щоб систематично порівнювати стійкість до хлору різних бактеріальних штамів у різних дослідженнях, необхідно запропонувати рекомендований метод оцінки стійкості до хлору та науково обгрунтоване кількісне визначення CRB.

У цій статті [13] рід взято за основ-

ну одиницю для вивчення CRB. Багато інших дослідників також посилаються на описані роди CRB, щоб пояснити відмінності в структурі угруповання між зразками до та після дезінфекції хлором [32], але наскільки стійкість до хлору залежить від роду бактерій, досі незрозуміло. Якщо міжродова різниця в стійкості до хлору більша, ніж міжвидова різниця, то прийняття роду за основну одиницю дослідження CRB є науковим.

Наразі бракує технологій швидкого виявлення CRB. Ці факти ускладнюють визначення чисельності CRB у навколишньому середовищі. Якщо дослідники можуть взяти рід за основну одиницю дослідження, можливо оцінити чисельність CRB у навколишньому середовищі.

Однак багато досліджень показали, що стійкість бактерій до хлору різна серед видів, штамів і навіть поколінь [11, 14, 33]. У дослідженні стійкості *E. coli* до хлору діапазон мінімальної інгібуючої концентрації (MIC) вільного хлору від найчутливішого до найстійкішого штаму становив 0,04-0,2 мг/л [33]. Хоча були також деякі докази на підтримку протилежної точки зору. Khan, Beattie et al. [15] виділили з питної води 87 штамів бактерій 22 родів та оцінили стійкість цих бактерій до хлору. Ізольовані бактерії були розділені на три ступені відповідно щодо їх стійкості до хлору і майже кожен рід мав один ступінь [15]. Цей результат свідчить про те, що різниця стійкості до хлору на видовому рівні може бути меншою, ніж на родовому рівні.

Деякі дослідження виявили, що певні конкретні види мали аномальну стійкість до хлору. Bolton, Dodd et al. [34] виявили, що один штам *Staphylococcus* був у 100 разів стійкішим до хлору, ніж природний штам. Чи була ця різниця окремим випадком, чи поширеним явищем, досі незрозуміло. Існуючі результати досліджень, що використовують різні методи, важко порівнювати за одним стандартом, тому неможливо надати загальний діапазон стійкості до хлору певного роду. Тому це доводить необхідність запропонувати

рекомендований метод оцінки CRB [13].

З огляду на відсутність стандартних методів оцінки, як згадувалося вище, автори [13] пропонують використовувати логарифмічну швидкість інактивації *E. coli* як еталонного показника. Інші методи або індекси оцінки можуть надати додаткову інформацію про CRB на додаток до рекомендованого методу оцінки. Як еталонні бактеріальні штами *E. coli* є легкодоступними різновидами типових хлорчутливих бактерій. Досі вважається, що *E. coli* має слабку стійкість до хлору порівняно з іншими родами, хоча між різними видами *E. coli* є невеликі відмінності [33]. Оцінка стійкості *E. coli* до хлору дає орієнтир для порівняння в експериментах з ідентифікації CRB. Подальші дослідження в майбутньому можуть забезпечити загальний діапазон стійкості *E. coli* до хлору. Загальний діапазон стійкості *E. coli* до хлору сприяє контролю якості відповідних експериментів. Згідно вищезазначеної інформації автори [13] пропонують рекомендований стандартний метод для оцінки стійкості до хлору та класифікації CRB наступним чином.

Термін перебування води під час дезінфекції в резервуарах очисних споруд знаходиться в діапазоні 0,5-1,0 год, а звичайний час дезінфекції коливається від 1 хв до 60 хв в оціночних експериментах CRB в сучасних експериментальних дослідженнях [8, 35, 36]. Авторами [13] обрано 30 хв як стандартний час дезінфекції в рекомендованому методі оцінки.

Рекомендована ВООЗ концентрація залишкового вільного хлору для оцінки стійкості патогенних бактерій до хлору становить 0,5 мг/л [17]. В оціночних експериментах CRB звичайна концентрація хлору для дезінфекції коливалася від 0,5 до 2 мг/л [8, 35, 36]. Встановлено, що значення СТ для досягнення 99,9 % інактивації штаму *Mycobacterium* може досягати 135 мг-хв/л [37], але верхня межа значення СТ, що відповідає концентрації 2 мг/л протягом 30 хв, становила лише 60 мг-хв/л, що не могло відображати високорезистентних CRB до хлору. Потрібна

вища концентрація, така як 5 мг/л. Перелік CRB варіюється залежно від різних концентрацій хлору. Розрізнення CRB за конкретною концентрацією хлору може допомогти проаналізувати зміни домінантних родів у залишкових бактеріях після дезінфекції хлором з різними концентраціями.

Щодо швидкості видалення, 1-логарифмічне зниження та 3-логарифмічне зниження мікроорганізмів відповідають початковій та повній інактивації відповідно. Крім того, необхідно уніфікувати початкову концентрацію бактерій. Початкова концентрація бактерій впливає на максимальну швидкість інактивації. Рекомендована початкова концентрація бактерій становить 10^7 - 10^8 КУО/мл.

Слід зазначити, що рівень концентрації хлору в експерименті не можна вважати повністю рівним фактичній дозі хлору під час обробки води. Як розчинник для бактеріальної суспензії використовується стерильна деіонізована вода (ODF), забуферена фосфатно-солевим розчином (PBS) [38]. Тому при тій самій концентрації швидкість інактивації в експерименті вища, ніж у фактичних умовах (вода з хімічними речовинами, які можуть реагувати з хлором).

Підсумовуючи поточні дослідження, автори [13] використали результати експериментів, які відповідають вищезазначеним умовам оцінювання, щоб створити картину градації CRB, описаних у літературі.

Картина розділена на три зони, включаючи зону високої стійкості до хлору (швидкість видалення $< 1 \log$), зону низької стійкості до хлору (швидкість видалення $< 3 \log$ та $> 1 \log$), зону відсутності стійкості до хлору (швидкість видалення $> 3 \log$). Мікроорганізми з низькою або високою стійкістю до хлору при концентрації вільного хлору 0,5, 2 та 5 мг/л були визначені як CRB0,5, CRB2 та CRB5. *Pseudomonas* має високу стійкість до хлору 0,5 мг/л, але не має стійкості до хлору 5 мг/л, тому вона є різновидом CRB0,5,

але не CRB5. Згідно з рекомендованим методом оцінки, ізольовані *Enterococcus* та *Stenotrophomonas* не можна вважати штамми з високою стійкістю до хлору.

Хоча мікроорганізми з зони високої стійкості до хлору набагато стійкіші до хлору, ніж з протилежної, низької зони, вони можуть бути не найважливішими CRB. Оскільки за умови низької концентрації хлору відбір невеликий і вони не мають очевидної конкурентної переваги. Тому CRB за умови низької концентрації хлору також необхідно приділяти увагу. Рекомендований стандартний метод охоплює кілька референтних дезінфікуючих концентрацій та може бути використаний для аналізу списку CRB за типових концентрацій хлору (при обробці води).

Інші методи оцінки також можуть бути використані для доповнення рекомендованого стандартного методу. Під час оцінки конкретних мікроорганізмів дослідники також можуть використовувати значення СТ або MIC, щоб отримати більше інформації про ці бактерії. Рекомендований стандартний метод пропонується в надії, що наступні дослідження включатимуть рекомендовані умови дезінфекції та нададуть можливість порівняння між різними дослідженнями.

Рекомендований стандартний метод також корисний для вивчення механізму стійкості до хлору. Додаткові дослідження, засновані на цьому методі, забезпечать загальний діапазон стійкості до хлору для кожного роду бактерій. Аналіз структури клітин та характеристик секреції аномальних штамів поглибить розуміння стійкості до хлору.

Варто зазначити, що дезінфекція хлором може призвести до переходу залишкових бактерій у життєздатний, але некультивований (VBNC) стан [39-41]. Стан VBNC може унеможливити ідентифікацію CRB у воді, тому це є важливим напрямком наступних досліджень.

Висновки

У цьому огляді автори [13] підсумували стан досліджень CRB. Аналіз існую-

чих методів оцінки стійкості до хлору свідчить про необхідність систематичного вивчення CRB. Однак досі не існувало загальноприйнятого методу оцінки стійкості бактерій при дезінфекції води хлором. Тому в цьому огляді було запропоновано рекомендований метод оцінки стійкості до хлору та кількісне визначення CRB. Крім того, автори підсумували роди, джерела та стійкість до хлору типових ізолюваних штамів CRB. У цьому огляді є кілька ключових моментів.

Дезінфекція хлором не може повністю контролювати ризики розвитку CRB, такі як ризики патогенності, стійкості до антибіотиків та росту мікробів. Ризики росту мікробів, пов'язані з CRB у системах очищення води, привертають дедалі більше уваги. Можливим поясненням ризиків росту мікробів було те, що екзополісахаридний матрикс (EPS) захищає CRB та одночасно спричиняє сильніше забруднення. Ризики росту мікробів, пов'язані з CRB, та їх контроль стануть перспективною галуззю досліджень у майбутньому.

Родами ізолюваних CRB з найвищою частотою зустрічальності були патогенні або умовно-патогенні *Mycobacterium*, *Bacillus*, *Legionella*, *Pseudomonas* та *Sphingomonas*. Непатогенними CRB певною мірою нехтували. Ці ізолювані CRB знаходили переважно у питній воді.

Запропоновано метод оцінки з використанням логарифмічної швидкості видалення *E. coli* як показника та референтного штаму. Відповідні умови дезінфекції становили 0,5, 2, 5 мг/л вільного хлору протягом 30 хвилин. За рекомендованих умов дезінфекції, незначна інактивація (зниження < 1 log) та неповна інактивація (зниження < 3 log) відповідно вважаються кількісними визначеннями бактерій з високою та низькою стійкістю до хлору. Рекомендований стандартний метод забезпечив порівняльний орієнтир для оцінки стійкості до хлору, що має великий потенціал для аналізу стійкості до хлору на рівні конкретних видів.

References/Література

1. Chen, Y.Q., Chen, C., Zhang, X.J., Zheng, Q., Liu, Y.Y., 2012b. Inactivation of resistant *Mycobacteria mucogenicum* in water: chlorine resistance and mechanism analysis. *Biomed Environ Sci* 25 (2), 230-237.
2. Wang, Y.H., Wu, Y.H., Tong, X., Yu, T., Peng, L., Bai, Y., Zhao, X.H., Huo, Z.Y., Ikuno, N., Hu, H.Y., 2019a. Chlorine disinfection significantly aggravated the biofouling of reverse osmosis membrane used for municipal wastewater reclamation. *Water Res.* 154, 246-257.
3. Zhang, H., Tian, Y., Kang, M., Chen, C., Song, Y., Li, H., 2019b. Effects of chlorination/chlorine dioxide disinfection on biofilm bacterial community and corrosion process in a reclaimed water distribution system. *Chemosphere* 215, 62- 73.
4. Rajeev, M., Sushmitha, T.J., Prasath, K.G., Toleti, S.R., Pandian, S.K., 2020. Systematic assessment of chlorine tolerance mechanism in a potent biofilm-forming marine bacterium *Halomonas boliviensis*. *Int. Biodeterior. Biodegradation* 151.
5. Khan, M.T., Hong, P.-Y., Nada, N., Croue, J.P., 2015. Does chlorination of seawater reverse osmosis membranes control biofouling? *Water Res.* 78, 84-97.
6. Pang, Y.C., Xi, J.Y., Xu, Y., Huo, Z.Y., Hu, H.Y., 2016. Shifts of live bacterial community in secondary effluent by chlorine disinfection revealed by Miseq high-throughput sequencing combined with propidium monoazide treatment. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 100 (14), 6435-6446.
7. Roy, P.K., Ghosh, M., 2017. Chlorine resistant bacteria isolated from drinking water treatment plants in West Bengal. *Desalination Water Treat* 79, 103-107.
8. Shekhawat, S.S., Kulshreshtha, N.M., Gupta, A.B., 2020. Investigation of chlorine tolerance profile of dominant gram negative bacteria recovered from secondary treated wastewater in Jaipur. *India J. Environ. Management.* 255.
9. Zeng, F., Cao, S., Jin, W., Zhou, X., Ding, W., Tu, R., Han, S.-F., Wang, C., Jiang, Q., Huang, H., Ding, F., 2020. Inactivation of chlorine-resistant bacterial spores in drinking water using UV irradiation, UV/Hydrogen peroxide and UV/Peroxymonosulfate: efficiency and mechanism. *J Clean Prod* 243.
10. Farkashimsley, H., 1964. Killing of chlorine-resistant bacteria by chlorine-bromine solutions. *Appl Microbiol* 12 (1), 1 -8.
11. Le Dantec, C., Duguet, J.P., Montiel, A., Dumoutier, N., Dubrou, S., Vincent, V., 2002a. Chlorine disinfection of atypical mycobacteria isolated from a water distribution system. *Appl*

- Environ Microbiol 68 (3), 1025-1032.
12. Ding, W., Jin, W., Cao, S., Zhou, X., Wang, C., Jiang, Q., Huang, H., Tu, R., Han, S.F., Wang, Q., 2019. Ozone disinfection of chlorine-resistant bacteria in drinking water. *Water Res.* 160, 339-349.
13. Luo L.-W., Wu Y.-H., Yu T., Wang Y.-H., Chen G.-Q., Tong X., Bai Y., Xu C., Wang H.-B., Ikuno N., Hu H.-Y. Evaluating method and potential risks of chlorine-resistant bacteria (CRB): A review. *Water Research* 188 (2021) 116474 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116474>
14. Jia, S., Jia, R., Zhang, K., Sun, S., Lu, N., Wang, M., Zhao, Q., 2020b. Disinfection characteristics of *Pseudomonas* *pelei*, a chlorine-resistant bacterium isolated from a water supply network. *Environ Res* 185.
15. Khan, S., Beattie, T.K., Knapp, C.W., 2016. Relationship between antibiotic- and disinfectant-resistance profiles in bacteria harvested from tap water. *Chemosphere* 152, 132-141.
16. Wang, J., Sui, M., Yuan, B., Li, H., Lu, H., 2019. Inactivation of two *Mycobacteria* by free chlorine: effectiveness, influencing factors, and mechanisms. *Sci. Total Environ.* 648, 271-284.
17. WHO, 2011. Guidelines For Drinking-water Quality, 4th Edition World Health Organization.
18. Miyamoto, M., Yamaguchi, Y., Sasatsu, M., 2000. Disinfectant effects of hot water, ultraviolet light, silver ions and chlorine on strains of *Legionella* and nontuberculous mycobacteria. *Microbios* 101 (398), 7-13.
19. Owoseni, M., Okoh, A., 2017a. Assessment of chlorine tolerance profile of *Citrobacter* species recovered from wastewater treatment plants in Eastern Cape, South Africa. *Environ Monit Assess* 189 (4), 201.
20. Li, D., Zeng, S., Gu, A.Z., He, M., Shi, H., 2013. Inactivation, reactivation and regrowth of indigenous bacteria in reclaimed water after chlorine disinfection of a municipal wastewater treatment plant. *J Environ. Sci.* 25 (7), 1319-1325.
21. Jia, S., Shi, P., Hu, Q., Li, B., Zhang, T., Zhang, X.X., 2015. Bacterial Community Shift Drives Antibiotic Resistance Promotion during Drinking Water Chlorination. *Environ Sci Technol* 49 (20), 12271-12279.
22. Jia, S., Bian, K., Shi, P., Ye, L., Liu, C.-H., 2020a. Metagenomic profiling of antibiotic resistance genes and their associations with bacterial community during multiple disinfection regimes in a full-scale drinking water treatment plant. *Water Res.* 176.
23. Karumathil, D.P., Yin, H.-B., Kollanoor-Johny, A., Venkitanarayanan, K., 2014. Effect of Chlorine Exposure on the Survival and Antibiotic Gene Expression of Multidrug Resistant *Acinetobacter baumannii* in Water. *Int J Environ Res Public Health* 11 (2), 1844-1854.
24. Jin, M., Liu, L., Wang, D.-n., Yang, D., Liu, W.-l., Yin, J., Yang, Z.-w., Wang, H.-r., Qiu, Z.-g., Shen, Z.-q., Shi, D.-y., Li, H.-b., Guo, J.-h., Li, J.-w., 2020. Chlorine disinfection promotes the exchange of antibiotic resistance genes across bacterial genera by natural transformation. *Isme Journal* 14 (7), 1847-1856.
25. Greenberg, J.T., Monach, P., Chou, J.H., Josephy, P.D., Dimple, B., 1990. Positive control of a global antioxidant defense regulon activated by superoxide-generating agents in *Escherichia coli*. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A* 87 (16), 6181-6185.
26. Dimple, B., 1996. Redox signaling and gene control in the *Escherichia coli* *soxRS* oxidative stress regulon — A review. *Gene* 179 (1), 53-57.
27. Salyers, A., Shoemaker, N.B., 2006. Reservoirs of antibiotic resistance genes. *Anim. Biotechnol.* 17 (2), 137-146.
28. Shi, P., Jia, S., Zhang, X.-X., Zhang, T., Cheng, S., Li, A., 2013. Metagenomic insights into chlorination effects on microbial antibiotic resistance in drinking water. *Water Res.* 47 (1), 111-120.
29. Zhang, H., Chang, F., Shi, P., Ye, L., Zhou, Q., Pan, Y., Li, A., 2019a. Antibiotic Resistome Alteration by Different Disinfection Strategies in a Full-Scale Drinking Water Treatment Plant Deciphered by Metagenomic Assembly. *Environ. Sci. Technol.* 53 (4), 2141-2150.
30. Yu, Z., He, P., Shao, L., Zhang, H., Lu, F., 2016. Co-occurrence of mobile genetic elements and antibiotic resistance genes in municipal solid waste landfill leachates: a preliminary insight into the role of landfill age. *Water Res.* 106, 583-592.
31. Mir, J., Morato, J., Ribas, F., 1997. Resistance to chlorine of freshwater bacterial strains. *J. Appl. Microbiol.* 82 (1), 7-18.
32. Zhou, X., Ahmad, J.I., van der Hoek, J.P., Zhang, K., 2020. Thermal energy recovery from chlorinated drinking water distribution systems: effect on chlorine and microbial water and biofilm characteristics. *Environ. Res.* 187, 109655.
33. Zyara, A.M., Torvinen, E., Veijalainen, A.-M., Heinonen-Tanski, H., 2016. The effect of chlorine and combined chlorine/UV treatment on coliphages in drinking water disinfection. *J Water Health* 14 (4), 640-649.
34. Bolton, K.J., Dodd, C.E.R., Mead, G.C., Waites, W.M., 1988. Chlorine resistance of strains of *Staphylococcus aureus* isolated from poultry-processing plants. *Lett. Appl. Microbiol.* 6

- (2), 31-34.
35. Scoaris Dde, O., Colacite, J., Nakamura, C.V., Ueda-Nakamura, T., de Abreu Filho, B.A., Dias Filho, B.P., 2008. Virulence and antibiotic susceptibility of *Aeromonas* spp. isolated from drinking water. *Antonie Van Leeuwenhoek* 93 (1-2), 111-122.
36. Roi, I.Y., Klimenko, N.A., Zdorovenko, G.M., Goncharuk, V.V., 2015. Species identification of water microorganisms resistant to chlorine compounds. *J Water Chem. Technol.* 37 (3), 145-150.
37. Le Dantec, C., Duguet, J.P., Montiel, A., Dumoutier, N., Dubrou, S., Vincent, V., 2002b. Occurrence of mycobacteria in water treatment lines and in water distribution systems. *Appl. Environ. Microbiol.* 68 (11), 5318-5325.
38. Ofori, I., Maddila, S., Lin, J., Jonnalagadda, S.B., 2018. Chlorine dioxide inactivation of *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* in water: the kinetics and mechanism. *J. Water Pro. Eng.* 26, 46-54.
39. Chen, S., Li, X., Wang, Y., Zeng, J., Ye, C., Li, X., Guo, L., Zhang, S., Yu, X., 2018. Induction of *Escherichia coli* into a VBNC state through chlorination/chloramination and differences in characteristics of the bacterium between states. *Water Res.* 142, 279-288.
40. Olszewska, M.A., Bialobrzewski, I., 2019. Mixed species biofilms of *Lactobacillus plantarum* and *Listeria innocua* show facilitated entrance to the VBNC state during chlorine-induced stress. *J Food Saf* 39 (4).
41. Ye, C., Lin, H., Zhang, M., Chen, S., Yu, X., 2020. Characterization and potential mechanisms of highly antibiotic tolerant VBNC *Escherichia coli* induced by low level chlorination. *Sci Rep* 10 (1), 1957.
- Вперше надійшла до редакції 21.01.2025 р.
Рекомендована до друку на засіданні редакційної колегії після рецензування*

УДК 628.162:613.34.:502.65+546.134

DOI: <https://zenodo.org/records/15648853>

ОЦІНКА ПІДЗЕМНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНДЕКСУ ЯКОСТІ ВОДИ

Бабієнко В.В., Валькевич Д.В., Красікова Д.Р.

Одеський національний медичний університет

ASSESSMENT OF GROUNDWATER SOURCES USING THE WATER QUALITY INDEX

Babienko V.V., Valkevich D.V., Krasikova D.R.

Odessa National Medical University

Summary/Резюме

The paper presents the results of studies on the assessment of the suitability of groundwater for drinking water consumption using the Water Quality Index (WQI) in the Mufuchani district of the Copperbelt province of Zambia. Water samples were collected from 20 wells between June and August 2023. Physico-chemical and microbiological studies of the water samples were performed. It was found that 95% of the water samples had elevated levels of total and fecal coliforms. The determined WQI for 5% of the samples was described as "excellent", 35% - "good", 14% - "very poor". For 55% of the samples, the water was recognized as unfit for drinking. It was shown that groundwater in this area is unsafe for consumption without prior treatment and disinfection. It is recommended that such treatment be carried out either at the household level or at public facilities prior to use. The need to improve sanitation infrastructure, implement filtration and disinfection technologies, and implement purification measures to protect groundwater as a source of drinking water for settlements is justified.

Key words: *drinking water quality, groundwater quality, water quality assessment, water quality index.*