



УДК 543.42+628.16

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.17.2026.12>

ОЦІНКА ЕЛЕМЕНТНОГО СКЛАДУ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ КИЇВЩИНИ МЕТОДОМ АТОМНО-ЕМІСІЙНОЇ СПЕКТРОМЕТРІЇ

О. І. Хижан¹, Л. О. Ковшун², О. І. Хижан³, А. Г. Галстян⁴

Сучасний стан водних систем потребує контролю їх хімічного складу, оскільки антропогенний фактор може призводити до накопичення у водному середовищі потенційно небезпечних речовин. Значну увагу привертають важкі метали, які відзначаються високою токсичністю, здатністю до біоаккумуляції та негативним впливом на водні екосистеми і здоров'я населення навіть у дуже низьких концентраціях. З огляду на це, визначення елементного складу природних вод є пріоритетним завданням сучасного екологічного та аналітичного контролю. Актуальність дослідження пояснюється необхідністю отримання достовірних даних щодо вмісту хімічних елементів у водних системах Київщини для оцінки їх екологічного стану та відповідності нормативним вимогам.

Метою роботи було визначення елементного складу зразків води з різних водних об'єктів Київщини, зокрема встановлення концентрацій важких металів та оцінка їх розподілу у поверхневих водах регіону. Отримані результати мають важливе значення для аналізу якості водних ресурсів Київщини, а також для створення комплексу заходів щодо їх раціонального використання, охорони та відтворення.

Дослідження виконувалися в Українській лабораторії якості і безпеки продукції АПК НУБіП України, що акредитована відповідно до вимог стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025 і гарантує досто-

¹ кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри загальної, органічної та фізичної хімії
(Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ)
e-mail: olenakhyzhan@nubip.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2986-3251

² доктор технічних наук, професор,
професор кафедри загальної, органічної та фізичної хімії
(Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ)
e-mail: kovshunlidia@nubip.edu.ua
ORCID: 0000-0003-2036-0145

³ кандидат хімічних наук,
науковий співробітник відділу хімії гетероциклічних сполук
(Інститут фізико-органічної хімії і вуглекімії імені Л. М. Литвиненка НАН України, м. Київ)
e-mail: khyzhan@gmail.com
ORCID: 0009-0008-0799-688X

⁴ доктор хімічних наук, професор,
завідувач кафедри загальної, органічної та фізичної хімії
(Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ)
e-mail: aggaalst@nubip.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8475-8166

вірність та відтворюваність отриманих результатів. Для встановлення елементного складу водних зразків застосовано метод атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою (ICP-AES). Цей метод характеризується високою чутливістю, точністю та можливістю одночасного визначення значної кількості хімічних елементів у низьких концентраціях. Межа детектування для основної більшості елементів становить близько $0,01 \text{ мг/дм}^3$, що дає змогу виявляти навіть слідові кількості металів у водних пробах. Для досягнення точності та контролю якості аналітичних вимірювань використовували багатоелементний стандартний розчин IV виробництва Merck KGaA (Німеччина).

Аналіз отриманих даних показав, що концентрації таких важких металів, як кобальт (Co), кадмій (Cd), свинець (Pb), нікель (Ni), хром (Cr) та мідь (Cu) у зразках води, що досліджувались, є незначними та не перевищують встановлених нормативних значень. Крім того, з'ясовано, що вміст цинку (Zn), мангану (Mn), молибдену (Mo), вісмуту (Bi), арсену (As) та ртуті (Hg) перебуває в межах допустимих концентрацій. Результати свідчать про задовільний екологічний стан досліджених водних об'єктів Київщини з точки зору вмісту важких металів.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному визначенні елементного складу природних вод регіону із застосуванням сучасного високочутливого методу ICP-AES. Це дозволило одержати достовірні дані щодо концентрацій мікроелементів та важких металів у водних об'єктах Київщини. Практичне значення даного дослідження полягає у можливості застосування отриманих результатів для оцінки екологічного стану водних ресурсів регіону, прогнозування ризиків їх забруднення та забезпечення екологічної безпеки. Крім того, отримані дані можуть бути використані для оцінки впливу якості води на безпечність вирощування сільськогосподарської продукції та формування системи ефективного моніторингу водних ресурсів.

Ключові слова: атомно-емісійна спектроскопія, вода, важкі метали, елементний склад води, якість води.

ASSESSMENT OF THE ELEMENTAL COMPOSITION OF AQUATIC ECOSYSTEMS OF THE KYIV REGION USING ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY

O. I. Khyzhan, L. O. Kovshun, O. I. Khyzhan, A. G. Galstyan

The current state of aquatic systems requires careful monitoring of their chemical composition, as anthropogenic factors may lead to the accumulation of potentially hazardous substances in the aquatic environment. Particular attention is paid to heavy metals, which are characterized by high toxicity, the ability to bioaccumulate, and negative impacts on aquatic ecosystems and human health even at very low concentrations. In this regard, determining the elemental composition of natural waters is a priority task of modern environmental and analytical monitoring. The relevance of this study is explained by the need to obtain reliable data on the content of chemical elements in water systems of the Kyiv region in order to assess their ecological status and compliance with regulatory requirements. The aim of this work was to determine the elemental composition of water samples from various water bodies of the Kyiv region, in particular to establish the concentrations of heavy metals and evaluate their distribution in the surface waters of the region. The obtained results are important for the analysis of water resource quality in the Kyiv region, as well as for the development of a set of measures aimed at their rational use, protection, and restoration.

The research was carried out at the Ukrainian Laboratory of Quality and Safety of Agricultural Products of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, which is accredited in accordance with the requirements of the DSTU ISO/IEC 17025 standard and ensures the reliability and reproducibility of the obtained results. To determine the elemental composition of water samples, the method of inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) was applied. This method is characterized by high sensitivity, accuracy, and the ability to simultaneously determine a large number of chemical elements at low concentrations. The detection limit for the majority of elements is approximately 0.01 mg/dm^3 , which makes it possible to detect even trace amounts of metals in water samples. To ensure accuracy and quality control of analytical measurements, a multielement standard solution IV produced by Merck KGaA (Germany) was used.

Analysis of the obtained data showed that the concentrations of such heavy metals as cobalt (Co), cadmium (Cd), lead (Pb), nickel (Ni), chromium (Cr), and copper (Cu) in the studied water samples are insignificant and do not exceed the established regulatory limits. In addition, it was found that the content of zinc (Zn), manganese (Mn), molybdenum (Mo), bismuth (Bi), arsenic (As), and mercury (Hg) is within the permissible concentrations. The results indicate a satisfactory ecological state of the studied water bodies of the Kyiv region in terms of heavy metal content.

The scientific novelty of this work lies in the comprehensive determination of the elemental composition of natural waters of the region using the modern highly sensitive ICP-AES method. This made it possible to obtain reliable data on the concentrations of trace elements and heavy metals in water bodies of the Kyiv region. The practical significance of this study lies in the possibility of using the obtained results to assess the ecological condition of the region's water resources, predict the risks of their contamination, and ensure environmental safety. In addition, the obtained data may be used to evaluate the impact of water quality on the safety of agricultural production and to develop an effective water resource monitoring system.

Key words: *atomic emission spectrometry, water, heavy metals, elemental composition of water, water quality.*

Вступ

Забруднення довкілля важкими металами є однією з найсучасніших екологічних проблем. Такі елементи характеризуються високою токсичністю, здатністю до біоаккумуляції та стійкістю у природному середовищі. Потрапляючи у водне середовище, вони можуть накопичуватися в організмах живих істот і переходити через харчові ланцюги, що посилює їх негативний вплив на екосистеми та здоров'я людини (Balali-Mood et al., 2021; Parida & Patel, 2023). Відомо, що навіть незначні концентрації таких металів, як свинець (Pb), ртуть (Hg), кадмій (Cd) і миш'як (As), викликають значні порушення у функціонуванні організму людини, таких як ураження нервової, серцево-судинної системи та нирок (Zhang et al., 2023; Saravanan et al., 2024).

Основними джерелами надходження важких металів у водні екосистеми є промислові підприємства, транспорт, гірничодобувна діяльність, сільське господарство і нераціональне поводження з відходами. Поверхневий стік з урбанізованих територій, промислові стічні води та атмосферні випадіння сприяють перенесенню токсичних металів у озера, річки та підземні води, що призводить до погіршення якості водних ресурсів (Xu et al., 2024; Piwowarska et al., 2024).

Значну небезпеку становить здатність важких металів до біоаккумуляції та біомагніфікації. Під час біоаккумуляції токсичні елементи можуть поступово накопичуватися у тканинах живих організмів, а в процесі біомагніфікації їх концентрація збільшується на кожному наступному рівні харчового ланцюга. Тому навіть низькі концентрації металів у водному середовищі можуть становити значну небезпеку для тварин та людини у довгостроковій перспективі (Yaashikaa et al., 2024).

Автори (Kumar et al., 2023) проаналізували інформацію 233 наукових публікацій

за 2010–2022 рр., щоб дати оцінку поширення токсичних металів у поверхневих водах на різних континентах. Встановлено, що середні концентрації таких елементів, як Fe, Pb, Cr, Hg, Cd та As у багатьох регіонах перевищують гранично допустимі норми, встановлені World Health Organization. За результатами оцінки ризику показано, що миш'як і свинець можуть спричиняти значні неканцерогенні ризики для здоров'я людини при споживанні такої води.

Забруднення води важкими металами має також негативний вплив на сільське господарство (Orosun et al., 2023). Використання забрудненої води для зрошення спричиняє накопичення токсичних елементів у ґрунтах і рослинах, що призводить до їх потрапляння у харчовий ланцюг і становить ризик для здоров'я людини. Автори акцентують необхідність впровадження ефективних заходів контролю для зниження забруднення водних ресурсів токсичними металами.

Зростання рівня урбанізації та індустріалізації сприяє збільшенню антропогенного навантаження на природні водні системи. У зв'язку з цим особливого значення набуває проведення регулярного моніторингу хімічного складу води. Визначення концентрацій важких металів у водних системах дозволяє оцінити рівень забруднення, встановити джерела його виникнення та розробити заходи для зниження негативного впливу на довкілля (Khan et al., 2023).

Важливим показником якості води є її елементний склад. Сучасні аналітичні методи дають змогу визначати навіть дуже низькі концентрації металів у водних зразках. Одним із найефективніших методів є індуктивно зв'язана плазмова мас-спектрометрія (ICP-MS), яку можна охарактеризувати високою чутливістю та можливістю одночасного визначення широкого спектра елементів. Використання цього методу дозволяє визначати токсичні метали навіть у слідових концентраціях, що є над-

звичайно важливим для екологічних досліджень (Abdallah & Bashir, 2023).

У сучасних наукових дослідженнях значна увага приділяється також розробці нових методів очищення води від важких металів. Серед найперспективних технологій виділяють адсорбційні методи, використання наноматеріалів, біоремедіацію та застосування метал-органічних каркасів. Ці підходи дозволяють ефективно знижувати концентрацію токсичних металів у водних системах і мінімізувати їх негативний вплив на довкілля (Hama Aziz et al., 2023; Kayani & Mohammed, 2025).

Дослідження останніх років (De Silva et al., 2025) також демонструють значний потенціал використання наноматеріалів для вилучення важких металів із водних середовищ. Наноструктуровані матеріали мають високу площу поверхні та здатні ефективно адсорбувати токсичні елементи. Це робить їх перспективними для застосування у сучасних системах очищення води.

Водночас актуальним напрямом досліджень є оцінка просторового розподілу важких металів у природних водах та визначення факторів, що впливають на їх концентрацію. Аналіз таких даних (Chen & Ding, 2025) дозволяє встановити закономірності поширення забруднення та розробити ефективні стратегії управління водними ресурсами.

Таким чином, дослідження елементного складу води та визначення концентрацій важких металів є важливим етапом оцінки екологічного стану водних систем. Отримані результати можуть бути використані для оцінки рівня антропогенного навантаження на довкілля, визначення джерел забруднення та розробки заходів щодо охорони і раціонального використання водних ресурсів.

Метою даного дослідження є визначення елементного складу води водойм Київщини та оцінка їх екологічного стану. Отримані результати дозволять встановити концентрації важких металів у поверхневих водах регіону, оцінити можливі джерела їх надходження та визначити потенційні ризики для довкілля і здоров'я людини.

Матеріал і методи

Дослідження виконували в Українській лабораторії якості і безпеки продукції АПК НУБіП України, що акредитована відповідно до вимог стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025. Наявність такої акредитації засвідчує високий рівень компетентності та надійності

лабораторії у виконанні різних аналітичних досліджень, зокрема визначення кількісного вмісту хімічних елементів, у тому числі важких металів, у зразках води з водних об'єктів Київщини.

Для якісного та кількісного визначення вмісту хімічних елементів, зокрема важких металів, застосовували один із сучасних аналітичних методів – атомно-емісійну спектроскопію з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-AES). Цей метод відзначається високою чутливістю, швидкістю та точністю виконання вимірювань, що робить його ефективним для проведення стандартних досліджень як неорганічних, так і органічних компонентів у водних зразках. Метод ICP-AES дає можливість виявлення навіть дуже низьких концентрацій важких металів у водних розчинах. Висока роздільна здатність методу та мінімальні втрати аналіту під час аналізу дають достовірне визначення вмісту елементів. Крім того, застосування цього підходу дає можливість виконувати аналізи у короткі терміни та отримувати результати практично в режимі реального часу. Використання методу ICP-AES у дослідженнях забезпечує високу якість аналітичних вимірювань і достовірність отриманих результатів, що має важливе значення для проведення подальших наукових досліджень і виконання екологічного моніторингу стану водних ресурсів. Підготовку зразків води для подальшого визначення їх елементного складу здійснювали відповідно до вимог стандарту ДСТУ ISO 11885:2005 «Якість води. Визначення 33 елементів методом атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно зв'язаною плазмою» (ISO 11885:1996, IDT). Зразки води попередньо фільтрували через мембранні фільтри з метою видалення зважених частинок. Після фільтрації проби піддавали кислотному розкладанню із застосуванням концентрованої нітратної кислоти, що забезпечувало повне розчинення наявних елементів.

Визначення елементного складу досліджуваних водних зразків виконували за допомогою атомно-емісійного спектрофотометра з індуктивно зв'язаною плазмою. Даний аналітичний прилад належить до сучасного лабораторного обладнання та забезпечує точне визначення концентрацій різних хімічних елементів у водних пробах. Межа виявлення для більшості елементів становить 0,01 мг/дм³, що дає можливість фіксувати навіть дуже незначні їх кількості у воді. Як стандарт застосовували

багатоеlementний стандартний розчин IV виробництва Merck KGaA (Німеччина). Використання стандартних розчинів сприяє підвищенню точності вимірювань і забезпечує відтворюваність отриманих результатів.

Підготовлені проби вводили до приладу, де відбувалося збудження атомів хімічних елементів. У збудженому стані атоми випромінюють світло з характерними довжинами хвиль, які реєструються спектрометром. Інтенсивність такого випромінювання є пропорційною концентрації відповідних елементів у зразку. Отримані спектри обробляли за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке порівнює інтенсивність сигналів із калібрувальною кривою для визначення концентрацій елементів у досліджуваних пробах.

Результати та їх обговорення

Київська область має вагомe значення для сільськогосподарства України, що обумовлює необхідність ретельного лабораторного контролю стану водних ресурсів у цьому регіоні. Значне антропогенне навантаження на довкілля, особливо на водні екосистеми, сприяє підвищенню концентрацій важких металів у підземних і поверхневих водах. Така тенденція являє серйозну екологічну проблему, адже важкі метали практично не піддаються природному розкладанню і можуть довгий час зберігатися в навколишньому середовищі. У водних екосистемах вони можуть знаходитися у різних формах, зокрема у вигляді іонів, колоїдних частинок або сполук, зв'язаних з неорганічними та органічними компонентами. Навіть за незначних концентрацій їх постійна присутність може бути загрозливою для здоров'я людини і тварин, оскільки багато важких металів характеризуються вираженими токсичними властивостями. Надходження важких металів у водне середовище може бути обумовлене різними чинниками, серед яких сільськогосподарські стоки, промислові викиди, неналежне поводження з відходами, а також природні геохімічні процеси. Зниження рівня забруднення вод важкими металами вимагає застосування комплексних заходів, що включають систематичний моніторинг їх концентрацій, контроль і обмеження викидів забруднювальних речовин, використання ефективних технологій очищення води, а також відновлення забруднених водних екосистем. Дослідження вмісту важких металів у водних об'єктах Київщини має важливе значення для підтримання екологічної рівноваги, збереження здоров'я

населення та забезпечення раціонального використання водних ресурсів у регіоні. З метою дослідження елементного складу водного середовища та визначення можливих джерел ксенобіотичного забруднення було здійснено відбір проб води на території одного із сіл Київщини. Досліджувана місцевість характеризується значною площею сільськогосподарських угідь, наявністю лісосмуг та різноманітних типів водойм, що робить її показовою для аналізу впливу аграрної діяльності на стан водних ресурсів.

З метою врахування гідрологічного різноманіття та відображення просторових особливостей місцевості було визначено кілька контрольних точок, які представляють різні типи водних об'єктів. Розміщення пунктів відбору проб планувалося з урахуванням гідрологічних характеристик водойм, рівня антропогенного навантаження, а також їхнього просторового розташування відносно потенційних джерел сільськогосподарського впливу.

Точки відбору були визначені таким чином:

Точка 1 (Т1) – витік річки (північна частина населеного пункту);

Точка 2 (Т2) – місце впадіння струмка або притоку в озеро;

Точка 3 (Т3) – центральна частина озера.

Кожна з обраних точок характеризує певний стан водного об'єкта залежно від локальних умов – наявності сільськогосподарського використання прилеглих територій, близькості інфраструктурних об'єктів або природних ділянок. Диференційоване розташування пунктів відбирання дає можливість визначити шляхи надходження забруднювальних речовин у водне середовище, зокрема залишків пестицидів, важких металів та інших ксенобіотиків.

Відбирання проб здійснювали у ранкові години за умов відносно стабільної температури навколишнього середовища. Зразки води відбирали у стерильні поліетиленові контейнери об'ємом 1 л, попередньо промиті водою з відповідної точки відбору. Доставка зразків до лабораторії проводили у термоконтейнерах при температурі близько +4 °C не пізніше ніж через 6 годин після відбору, що забезпечувало збереження аналітичної стабільності проб до проведення лабораторних досліджень. За результатами проведеного елементного аналізу проб води (табл. 1), відібраних у досліджуваних водних об'єктах Київської області, здійснено оцінку вмісту важких металів

у водному середовищі. Отримані дані свідчать, що концентрації кобальту, кадмію, свинцю, нікелю, хрому, міді та арсену не перевищують встановлених нормативних значень і визначаються у незначних кількостях. Це вказує на відсутність істотного техногенного навантаження за цими показниками та підтверджує їхній безпечний рівень у досліджуваних водах. Водночас результати моніторингу демонструють відносно низький вміст окремих мікроелементів, зокрема Купруму, Цинку та Мангану. Відповідно до даних, наведених у таблиці 1, концентрація Купруму становить близько 0,01 мг/дм³, вміст Цинку також знаходиться на рівні 0,01 мг/дм³, тоді як концентрація Мангану складає приблизно 0,013 мг/дм³. Такі значення свідчать про незначну забезпеченість досліджуваних вод зазначеними мікроелементами.

Крім того, встановлено, що вміст Молібдену, Кадмію, Свинцю, Арсену та Вісмуту у відібраних зразках води не перевищує 0,01 мг/дм³, що також характеризує їх як екологічно безпечні за цими показниками.

Концентрація Ртуті визначена на рівні менше 0,005 мг/дм³, що відповідає чинним нормативним вимогам і не свідчить про потенційний ризик для якості водних ресурсів.

За результатами елементного аналізу води, представленими в таблиці 2, встановлено, що концентрації Co, Cd, Pb, Ni, Cr, Cu та As перебувають у межах допустимих значень або визначаються у незначних кількостях.

Отримані дані свідчать про те, що вміст зазначених металів у досліджуваних зразках води не перевищує нормативно встановлених рівнів і не становить загрози для якості водного середовища. Разом із тим результати лабораторного контролю показали, що відібрані проби характеризуються відносно низьким вмістом окремих мікроелементів. Зокрема, концентрація купруму становить близько 0,01 мг/дм³, вміст цинку також перебуває на рівні 0,01 мг/дм³, тоді як концентрація мангану складає приблизно 0,012 мг/дм³.

Крім того, встановлено, що вміст Mo, Cd, As та Bi у воді не перевищує

Таблиця 1
Результати елементного аналізу зразків води Київщини точки відбору Т1

Хімічний елемент	Масова частка, г/дм ³	Розширена невизначеність	Межа детектування, мг/дм ³
Кальцій, Ca	38,44	±5,31	0,01
Натрій, Na	29,31	±3,24	0,01
Магній, Mg	17,14	±3,05	0,01
Ферум, Fe	0,05	±0,04	0,01
Калій, K	9,51	±2,04	0,01
Стронцій, Sr	0,71	±0,07	0,01
Бор, B	0,07	±0,02	0,01
Барій, Ba	0,05	±0,02	0,01
Літій, Li	0,03	±0,01	0,01
Манган, Mn	0,013	±0,003	0,01
Алюміній, Al	<0,010	-	0,01
Цинк, Zn	<0,010	-	0,01
Хром, Cr	<0,010	-	0,01
Свинець, Pb	<0,010	-	0,01
Купрум, Cu	<0,010	-	0,01
Нікель, Ni	<0,010	-	0,01
Кобальт, Co	<0,010	-	0,01
Аргентум, Ag	<0,010	-	0,001
Бісмут, Bi	<0,010	-	0,01
Молібден, Mo	<0,010	-	0,01
Кадмій, Cd,	<0,001	-	0,001
Арсен, As,	<0,001	-	0,001
Селен, Se,	<0,001	-	0,001
Ртуть, Hg	<0,0005	-	0,0005

Таблиця 2

Результати елементного аналізу зразків води Київщини точки відбору Т2

Хімічний елемент	Масова частка, мг/дм ³	Розширена невизначеність	Межа детектування, мг/дм ³
Кальцій, Ca	41,12	±5,13	0,01
Натрій, Na	29,15	±3,16	0,01
Магній, Mg	20,01	±3,01	0,01
Ферум, Fe	0,09	±0,02	0,01
Калій, K	8,22	±1,51	0,01
Стронцій, Sr	0,90	±0,08	0,01
Бор, B	0,11	±0,05	0,01
Барій, Ba	0,06	±0,04	0,01
Літій, Li	0,03	±0,01	0,01
Марганець, Mn	0,012	±0,005	0,01
Алюміній, Al	<0,010	-	0,01
Цинк, Zn	<0,010	-	0,01
Хром, Cr	<0,010	-	0,01
Свинець, Pb	<0,010	-	0,01
Купрум, Cu	<0,010	-	0,01
Нікель, Ni	<0,010	-	0,01
Кобальт, Co	<0,010	-	0,01
Аргентум, Ag	<0,010	-	0,001
Бісмут, Bi	<0,010	-	0,01
Молібден, Mo	<0,010	-	0,01
Кадмій, Cd	<0,0010	-	0,001
Миш'як, As	<0,0010	-	0,001
Селен, Se	<0,0010	-	0,001
Ртуть, Hg	<0,0005	-	0,0005

0,01 мг/дм³, що можна розглядати як позитивну характеристику стану водного середовища, оскільки такі значення відповідають чинним нормативним вимогам. Концентрація Hg визначена на рівні менше 0,005 мг/дм³, що також узгоджується з допустимими нормативами та не свідчить про погіршення якості водних

Аналіз результатів, представлених у таблиці 3, показує, що у точці відбору Т3 спостерігаються дещо вищі концентрації окремих елементів порівняно з іншими дослідженими ділянками.

Зокрема, вміст кальцію становить 51,24 мг/дм³, магнію – 27,15 мг/дм³, а калію – 29,43 мг/дм³, що може свідчити про підвищений рівень мінералізації води у цій частині водойми. Концентрація натрію є близькою до значень, зафіксованих у точках Т1 та Т2. Також відзначається підвищений вміст феруму та марганцю порівняно з іншими точками дослідження, що може бути пов'язано з локальними умовами водного середовища або процесами мобілізації цих елементів із донних відкладів. У цій точці також зафіксовано наяв-

ність цинку та алюмінію, концентрації яких перевищують рівні, визначені у попередніх зразках. Вміст стронцію, бору, літію та барію також дещо вищий порівняно з точками Т1 та Т2. Разом з тим концентрації таких токсичних елементів, як свинець, хром, мідь, нікель, кадмій, миш'як, селен та ртуть, залишаються нижчими за межу детектування методу.

Висновки

Узагальнюючи отримані результати, можна відзначити, що елементний склад досліджуваних зразків води формується переважно за рахунок природних геохімічних процесів. Найбільший внесок у мінералізацію води здійснюють кальцій, натрій та магній, тоді як концентрації більшості потенційно токсичних елементів є дуже низькими або не перевищують межі визначення аналітичного методу. Порівняльний аналіз показує, що у точці Т3 спостерігається дещо вищий рівень мінералізації та вмісту окремих мікроелементів, що може бути пов'язано з локальними природними умовами або особливостями гідрологічного режиму водойми.

Таблиця 3

Результати елементного аналізу зразків води Київщини точки відбору ТЗ

Хімічний елемент	Масова частка, мг/дм ³	Розширена невизначеність	Межа детектування, мг/дм ³
Кальцій, Ca	51,24	±9,23	0,01
Натрій, Na	28,12	±4,88	0,01
Магній, Mg	27,15	±4,26	0,01
Калій, K	29,43	±3,76	0,01
Ферум, Fe	0,50	±0,07	0,01
Стронцій, Sr	1,14	±0,14	0,01
Цинк, Zn	0,09	±0,03	0,01
Марганець, Mn	0,09	±0,02	0,01
Бор, B	0,19	±0,06	0,01
Літій, Li	0,04	±0,01	0,01
Алюміній, Al	0,06	±0,02	0,01
Барій, Ba	0,07	±0,01	0,01
Хром, Cr	<0,010	-	0,01
Свинець, Pb	<0,010	-	0,01
Купрум, Cu, мг/дм ³	<0,010	-	0,01
Нікель, Ni, мг/дм ³	<0,010	-	0,01
Кобальт, Co	<0,010	-	0,01
Кадмій, Cd	<0,0010	-	0,01
Аргентум, Ag	<0,010	-	0,01
Вісмут, Bi	<0,010	-	0,01
Молібден, Mo	<0,010	-	0,01
Кадмій, Cd	<0,0010	-	0,001
Миш'як, As	<0,0010	-	0,001
Селен, Se	<0,0010		0,001
Ртуть, Hg	<0,0005		0,0005

Отримані результати можуть слугувати науковим підґрунтям для розроблення та впровадження ефективних заходів, спрямованих на контроль і мінімізацію забруднення водних ресурсів, що, у свою чергу, сприятиме підтриманню належного рівня їх якості та безпечності для

різних напрямів використання. Водночас продовження систематичного моніторингу стану водного середовища є необхідною умовою забезпечення екологічної рівноваги та своєчасного виявлення можливих змін у хімічному складі водних об'єктів.

Список використаної літератури

- Abdallah O., Bashir K. Quantitative determination of heavy metals in water using ICP-MS. *International Journal of Advanced Chemistry Research*. 2023. Vol. 5. Issue 1. P. 115–116. <https://doi.org/10.33545/26646781.2023.v5.i1b.192>
- Balali-Mood M., Naseri K., Tahergorabi Z., Khazdair M. R., Sadeghi M. Toxic mechanisms of five heavy metals: mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. *Frontiers in Pharmacology*. 2021. Vol. 12. Article 643972. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972>
- Chen S., Ding Y. Systematic bibliographic analysis of heavy metal remediation. *Water Science and Technology*. 2025. Vol. 91. № 1. P. 56–68. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.396>
- De Silva M., Cao G., Tam K. C. Nanomaterials for the removal and detection of heavy metals: a review. *Environmental Science: Nano*. 2025. Vol. 12. №4. P. 2154–2176. <https://doi.org/10.1039/D4EN01041H>
- Hama Aziz K. H., Mustafa F. S., Omer K. M., Hama S., Hamarawf R. F., Rahman K. O. Heavy metal pollution in the aquatic environment: efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: a review. *RSC Advances*. 2023. Vol. 13. № 26. P. 17595–17610. <https://doi.org/10.1039/D3RA00723E>

Kayani K. F., Mohammed S. J. Heavy metal pollution in aquatic environments and removal using metal-organic frameworks. *RSC Advances*. 2025. Vol. 15. № 43. P. 35756–35769. <https://doi.org/10.1039/D5RA06296A>

Khan M., Omer T., Ellahi A., Ur Rahman Z., Niaz R., Lone S. A. Monitoring and assessment of heavy metal contamination in surface water of selected rivers. *Geocarto International*. 2023. Vol. 38. Issue 1. Article 2256313. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2256313>

Kumar A., Kumar V., Pandita S., Singh S., Bhardwaj R., Varol M., Rodrigo-Comino J. A global meta-analysis of toxic metals in continental surface water bodies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023. Vol. 11. Issue 3. Article 109964. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109964>

Orosun M. M., Ige S. O., Orosun R. O. et al. Potentially toxic metals in irrigation water, soil, and vegetables and their health risks using Monte Carlo models. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Article 21220. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48489-4>

Parida L., Patel T. N. Systemic impact of heavy metals and their role in cancer development: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023. Vol. 195. Article 766. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11399-z>

Piwowska D., Kiedrzyńska E., Jaszczyszyn K. A global perspective on the nature and fate of heavy metals polluting water ecosystems, and their impact and remediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2024. Vol. 54, № 19. P. 1436–1458. <https://doi.org/10.1080/10643389.2024.2317112>

Saravanan P., Saravanan V., Rajeshkannan R., Arnica G., Rajasimman M., Baskar G., Pugazhendhi A. Comprehensive review on toxic heavy metals in the aquatic system: sources, identification, treatment strategies, and health risk assessment. *Environmental Research*. 2024. Vol. 258. Article 119440. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119440>

Xu W., Jin Y., Zeng G. Introduction of heavy metals contamination in the water and soil: a review on source, toxicity and remediation methods. *Green Chemistry Letters and Reviews*. 2024. Vol. 17, № 1. Article 2404235. <https://doi.org/10.1080/17518253.2024.2404235>

Yaashikaa P. R., Palanivelu J., Hemavathy R. V. Sustainable approaches for removing toxic heavy metal from contaminated water: a comprehensive review of bioremediation and biosorption techniques. *Chemosphere*. 2024. Vol. 357. Article 141933. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141933>

Zhang P., Yang M., Lan J., Huang Y., Zhang J., Huang S., Yang Y., Ru J. Water quality degradation due to heavy metal contamination: health impacts and eco-friendly approaches for heavy metal remediation. *Toxics*. 2023. Vol. 11, № 10. Article 828. <https://doi.org/10.3390/toxics11100828>

References

Abdallah, O., & Bashir, K. (2023). Quantitative determination of heavy metals in water using ICP-MS. *International Journal of Advanced Chemistry Research*, 5(1), 115–116. <https://doi.org/10.33545/26646781.2023.v5.i1b.192> [in English]

Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., & Sadeghi, M. (2021). Toxic mechanisms of five heavy metals: Mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. *Frontiers in Pharmacology*, 12, 643972. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972> [in English]

Chen, S., & Ding, Y. (2025). Systematic bibliographic analysis of heavy metal remediation. *Water Science and Technology*, 91(1), 56–68. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.396> [in English]

De Silva, M., Cao, G., & Tam, K. C. (2025). Nanomaterials for the removal and detection of heavy metals: A review. *Environmental Science: Nano*, 12(4), 2154–2176. <https://doi.org/10.1039/D4EN01041H> [in English]

Hama Aziz, K. H., Mustafa, F. S., Omer, K. M., Hama, S., Hamarawf, R. F., & Rahman, K. O. (2023). Heavy metal pollution in the aquatic environment: Efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: A review. *RSC Advances*, 13(26), 17595–17610. <https://doi.org/10.1039/D3RA00723E> [in English]

Kayani, K. F., & Mohammed, S. J. (2025). Heavy metal pollution in aquatic environments and removal using metal-organic frameworks. *RSC Advances*, 15(43), 35756–35769. <https://doi.org/10.1039/D5RA06296A> [in English]

Khan, M., Omer, T., Ellahi, A., Ur Rahman, Z., Niaz, R., & Lone, S. A. (2023). Monitoring and assessment of heavy metal contamination in surface water of selected rivers. *Geocarto International*, 38(1), Article 2256313. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2256313> [in English]

Kumar, A., Kumar, V., Pandita, S., Singh, S., Bhardwaj, R., Varol, M., & Rodrigo-Comino, J. (2023). A global meta-analysis of toxic metals in continental surface water bodies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), Article 109964. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109964> [in English]

Orosun, M. M., Ige, S. O., Orosun, R. O., et al. (2023). Potentially toxic metals in irrigation water, soil, and vegetables and their health risks using Monte Carlo models. *Scientific Reports*, 13, Article 21220. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48489-4> [in English]

Parida, L., & Patel, T. N. (2023). Systemic impact of heavy metals and their role in cancer development: A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, Article 766. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11399-z> [in English]

Piwowarska, D., Kiedrzyńska, E., & Jaszczyszyn, K. (2024). A global perspective on the nature and fate of heavy metals polluting water ecosystems, and their impact and remediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 54(19), 1436–1458. <https://doi.org/10.1080/10643389.2024.2317112> [in English]

Saravanan, P., Saravanan, V., Rajeshkannan, R., Arnica, G., Rajasimman, M., Baskar, G., & Pugazhendhi, A. (2024). Comprehensive review on toxic heavy metals in the aquatic system: Sources, identification, treatment strategies, and health risk assessment. *Environmental Research*, 258, Article 119440. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119440> [in English]

Xu, W., Jin, Y., & Zeng, G. (2024). Introduction of heavy metals contamination in the water and soil: A review on source, toxicity and remediation methods. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 17(1), Article 2404235. <https://doi.org/10.1080/17518253.2024.2404235> [in English]

Yaashikaa, P. R., Palanivelu, J., & Hemavathy, R. V. (2024). Sustainable approaches for removing toxic heavy metal from contaminated water: A comprehensive review of bioremediation and biosorption techniques. *Chemosphere*, 357, Article 141933. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141933> [in English]

Zhang, P., Yang, M., Lan, J., Huang, Y., Zhang, J., Huang, S., Yang, Y., & Ru, J. (2023). Water quality degradation due to heavy metal contamination: Health impacts and eco-friendly approaches for heavy metal remediation. *Toxics*, 11(10), Article 828. <https://doi.org/10.3390/toxics11100828> [in English]

Дата першого надходження статті до видання: 19.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

