

## Determination of heavy metals in freshly caught fish from the Dnipro River (Ukraine)

O. Kruchynenko  | S. Mykhailiutenko | O. Klymenko | S. Kravchenko

### Article info

**Citation:** Kruchynenko, O., Mykhailiutenko, S., Klymenko, O., & Kravchenko, S. (2024). Determination of heavy metals in freshly caught fish from the Dnipro River (Ukraine). *Scientific Progress & Innovations*, 27 (3), 50–54. doi: 10.31210/spi2024.27.03.08

### Correspondence Author

O. Kruchynenko

E-mail:

[oleg.kruchynenko@pdaa.edu.ua](mailto:oleg.kruchynenko@pdaa.edu.ua)

Poltava State Agrarian

University,

1/3, Skovorody Str.,

Poltava, 36003,

Ukraine

Heavy metals are common micropollutants and are considered a problem worldwide. Most heavy metals are found in wastewater from factories and farms, which are usually discharged into lakes and rivers. Fish is a staple food in many regions of the world. At the same time, fish can accumulate more heavy metals in their gills, kidneys, liver, intestines and muscles than in water. In Ukraine, insufficient attention is paid to the study of the content of chemical elements in fish, in particular in muscles. Therefore, the purpose of the study was to determine the content of heavy metals in the dorsal muscles of the fish *Carassius carassius* (Linnaeus, 1758). Based on the results of the research, the concentration of heavy metals (Pb, Cd, Cu, As, Zn, Hg) in the muscles of freshly caught fish from the Dnipro River in the Poltava Region was determined. The research was carried out by the method of atomic absorption spectrometry on the basis of the Regional State Laboratory of Veterinary Medicine in the Poltava region. Mann-Whitney test was used for pairwise comparison of results. Differences between indicators in groups were considered significant at  $P < 0.05$ . Fish samples ( $n=5$ ) caught from the Dnipro River were taken in two markets of the city of Poltava in the spring. The samples were immediately cooled, transported to the laboratory and stored at  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  until further analysis. The average concentrations of individual toxic elements in the muscles of crucian carp were determined. It was found that the lead content in the samples from the Central Market was  $0.2\pm 0.01$ , and from the "Brailky" Market was  $0.3\pm 0.01\text{ mg/kg}$  ( $P < 0.01$ ). In the course of research, it was found that the concentration of cadmium in the muscles of fish purchased at the "Brailky" Market was probably higher ( $0.06\pm 0.01$ ) than in the CM  $0.04\pm 0.01\text{ mg/kg}$  ( $P < 0.01$ ). The level of Cu, Zn, As and Hg in the dorsal muscles of freshly caught fish from the two locations was not statistically significant. In our research, the ranking series according to the level of heavy metals is presented as follows:  $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Hg} > \text{Cd}$ . The studied samples of fish entering the Central Market and the "Brailky" Market of Poltava were safe in terms of the content of heavy metals, since no sample exceeded the maximum permissible concentration level.

**Keywords:** *Carassius carassius*, toxic elements, content, muscles.

## Визначення важких металів у свіжовиловленій рибі з річки Дніпро (Україна)

O. В. Кручиненко | С. М. Михайлютенко | О. С. Клименко | С. О. Кравченко

Полтавський державний  
аграрний університет,  
м. Полтава,  
Україна

Важкі метали є поширеними мікрозабруднювачами і вважаються проблемою в усьому світі. Більшість важких металів міститься у стічних водах заводів і ферм, які зазвичай скидаються в озера та річки. Риба є основним продуктом харчування у багатьох регіонах світу. Водночас, у своїх зябрах, нирках, печінці, кишечнику та м'язах риби можуть накопичувати більше важких металів, ніж у воді. На теренах України недостатньо уваги приділено вивченню вмісту хімічних елементів у рибі, зокрема у м'язах. Тому метою дослідження було визначити вміст важких металів у спинних м'язах риби *Carassius carassius* (Linnaeus, 1758). За результатами проведених досліджень визначено концентрацію важких металів (Pb, Cd, Cu, As, Zn, Hg) у м'язах свіжовиловленої риби з річки Дніпро у Полтавській області. Дослідження проведено методом атомно-абсорбційної спектроскопії на базі Регіональної державної лабораторії ветеринарної медицини в Полтавській області. Для попарного порівняння результатів використовували критерій Манна-Вітні. Значущими вважались відмінності між показниками у групах за  $P < 0,05$ . На двох ринках міста Полтава у весняний період були відібрані зразки риби ( $n=5$ ), виловленої з річки Дніпро. Зразки негайно охолоджували, транспортували у лабораторію та до подальшого аналізу зберігали за  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Встановлено середні показники концентрації окремих токсичних елементів у м'язах карасів. Виявлено, що вміст свинцю у пробах із Центрального ринку становив  $0,2\pm 0,01$ , а з Ринку «Браїлки»  $0,3\pm 0,01\text{ мг/кг}$  ( $P < 0,01$ ). У ході досліджень з'ясовано, що концентрація кадмію у м'язах риби, придбаної на Ринку «Браїлки», була вірогідно вищою ( $0,06\pm 0,01$ ), ніж на ЦР  $0,04\pm 0,01\text{ мг/кг}$  ( $P < 0,01$ ). Рівень Cu, Zn, As та Hg у спинних м'язах свіжовиловленої риби з двох локацій не був статистично значущим. У наших дослідженнях ранжувальний ряд за рівнем важких металів поданий таким чином:  $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Hg} > \text{Cd}$ . Досліджені проби риби, що надходили на Центральний ринок та ринок «Браїлки» міста Полтави, були безпечними щодо вмісту важких металів, оскільки не зафіксовано у жодній пробі перевищення рівня гранично допустимої концентрації.

**Ключові слова:** *Carassius carassius*, токсичні елементи, вміст, м'язи.

**Бібліографічний опис для цитування:** Кручиненко О. В., Михайлютенко С. М., Клименко О. С., Кравченко С. О. Визначення важких металів у свіжовиловленій рибі з річки Дніпро (Україна). *Scientific Progress & Innovations*. 2024. № 27 (3). С. 50–54.

## Вступ

Будь-яка форма життя потребує води, і лише 3 % запасів води на землі надходить із ресурсів прісної води, тоді як 97 % надходить із морів і океанів. Льодовики та криговий покрив на полюсах містять близько 68,7 % прісної води на землі, потім йдуть підземні води з показником 30,1 %, підземні та поверхневі води мають 0,9 та 0,3 % відповідно [13]. Відомо, що запаси прісної води обмежені, але якість води завжди викликає сумніви відповідно до «Глобальної оцінки та оцінки санітарії». Роль води в підтримці екологічної рівноваги дуже важлива. Крім того, це дуже важлива частина біосфери, оскільки вона відповідає за більшість усіх живих організмів на нашій планеті [19].

Швидка урбанізація й індустріалізація мали далекосяжні наслідки для людського суспільства. Ця зміна має такі шкідливі наслідки, як викид поллютантів у навколишнє середовище. На сьогодні важкі метали є поширеними мікрозабруднювачами і вважаються проблемою в усьому світі. Більшість важких металів міститься у стічних водах заводів і ферм, які зазвичай скидаються в озера та річки [1, 12, 16].

Важкі метали класифікують, як стійкі забруднювачі. Вони не можуть розкладатися мікроорганізмами. Забруднюючі речовини з опадів потрапляють у воду, їжу та середовища проживання організмів. Проникають у різні середовища навколишнього середовища, включаючи як прісну, так і морську воду. Метали із забрудненої води поглинають багато водних хребетних тварин. Відомо, що риба є основним продуктом харчування в різних регіонах світу [4, 18]. Доведено, що у своїх зябрах, нирках, печінці, кишечнику та м'язах можуть накопичувати більше хімічних елементів, ніж у воді [5]. Токсичність важких металів негативно впливає на ріст, розмноження та фізіологію риб, що загрожує сталому розвитку сектору аквакультури [11].

Вміст важких металів у регіонах центрального та східного Північного Китаю був на середньому рівні порівняно з іншими дослідженими регіонами країни. Всі важкі метали, особливо Zn, Cr і Cu, що містилися у воді, накопичувалися в рибі. Концентрації токсичних елементів були подібні у всіх видів риб. Разом з тим показники окремих металів (Zn, Cu, Mn, Ni) у карася значно вищі, ніж в інших видів риби. Порівнюючи дику та вирощену рибу, встановлено, що середні концентрації кожного важкого металу у диких карася, товстолоба, амура були вищими, ніж у вирощуваної людиною риби [22].

Дослідники визначали концентрацію поллютантів і токсичність у деяких видах прісноводних риб, зібраних з річки Тигр у Багдаді. У висновках зазначили, що концентрації важких металів у виловленої риби перевищували допустимі рівні. Результати даного дослідження показали високі рівні кадмію та хрому в тканинах риби, що унеможливило їх споживання людиною. Cd і Cr перевищували допустимі концентрації, визначені Всесвітньою організацією охорони здоров'я та Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН для важких металів у рибі [17].

На думку авторів, з метою забезпечення виробництва безпечної риби, підвищення їх конкурентоспроможності на міжнародному ринку та довіри споживачів на внутрішньому ринку, найбільш доцільним є впровадження міжнародних стандартів, включаючи харчове законодавство ЄС, ефективної системи НАССР, а також процедур виходу продукції на зовнішні ринки відповідно до міжнародних норм [14].

## Мета дослідження

Метою дослідження було визначити вміст важких металів у спинних м'язах риби *Carassius carassius* (Linnaeus, 1758).

## Матеріали і методи

Дослідження проводили на базі Регіональної державної лабораторії ветеринарної медицини в Полтавській області. На двох агропродовольчих ринках міста Полтава у весняний період відібрали зразки риби (n=5), яка була виловлена із річки Дніпро. Зразки негайно охолодили. Транспортували у лабораторію та до подальшого аналізу зберігали за температури -20 °C. Вміст міді, цинку, кадмію та свинцю визначали методом атомно-абсорбційної спектроскопії з атомізацією у полум'ї атомно-абсорбційного спектрофотометра Varian AA 240-FS (ДСТУ 7670:2014) [9]. Рівень миш'яку визначали за допомогою спектрофотометра Cary 50 та фотоелектроколориметра КФК-2 (ГОСТ 26930-86). Концентрацію ртуті визначали за допомогою аналізатора ртуті DMA-80 (EPA Method 7473 «Mercury in solids and solutions by thermal decomposition amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry» & ISO 11212-2:1997(E) Part 2 «Determination of mercury content by atomic absorption spectrometry») [10]. Гранично допустимий вміст токсичних елементів узятو згідно з наказом Державного департаменту ветеринарної медицини № 107 від 27.09.2004 року.

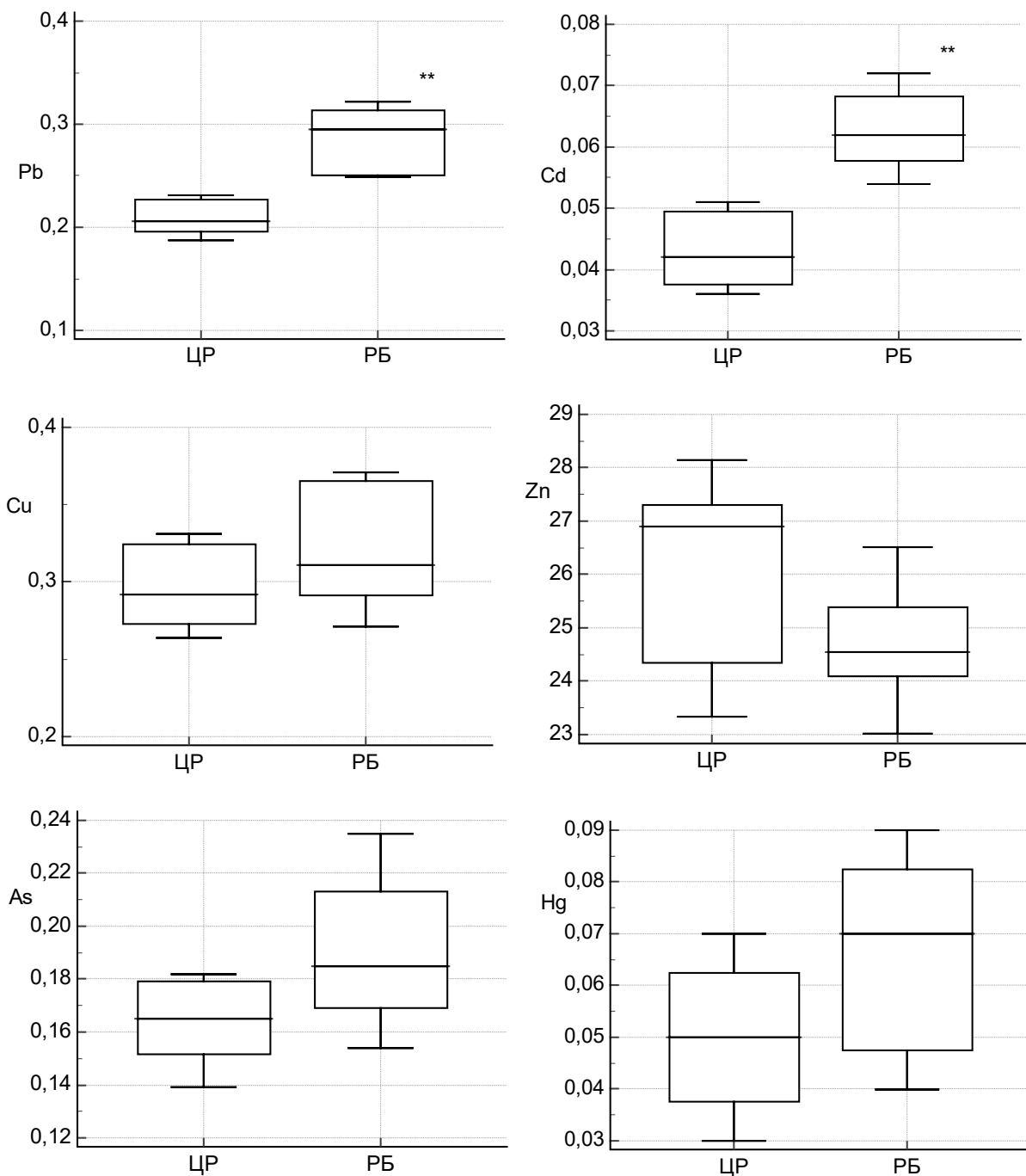
Статистичне опрацювання отриманих результатів проводили з використанням програмного забезпечення MedCalc Statistical Software version 20.216 (MedCalc Software bvba, Ostend, Belgium). Усі параметри розглядали, як непараметричні дані, виражали, як середнє значення ( $\bar{x}$ ) та стандартну помилку середнього (SE). Для попарного порівняння результатів використовували критерій Манна-Вітні. Значущими вважали відмінності між показниками у групах за  $P < 0,05$ .

## Результати та їх обговорення

За наслідками проведеної нами роботи встановлено концентрації важких металів (Pb, Cd, Cu, As, Zn, Hg, мг/кг) у досліджених зразках спинних м'язів *Carassius carassius* (Linnaeus, 1758). Проаналізовано вміст даних металів у свіжо-виловленої риби на двох ринках: Центральний ринок (ЦР) та Ринок «Брайлі» (РБ). З'ясовано, що їх вміст не перевищував гранично допустимі концентрації в

усіх проб. На *рисунку 1* показано, що вміст свинцю у пробах із ЦР не перевищував  $0,2 \pm 0,01$ , тоді як із РБ,

становив  $0,3 \pm 0,01$  мг/кг ( $P < 0,01$ ). Показник був в дозволених межах, що підтверджує безпечність риби.



**Рис. 1.** Вміст Pb, Cd, Cu, Zn, As та Hg у спинних м'язах свіжевиловленої риби, придбаної на Центральному ринку (ЦР) та Ринку «Браїлки» (РБ), мг/кг

Інші результати отримали науковці, які здійснили дослідження щодо визначення концентрації токсичних елементів у прісноводних риб (окунь, плотва, товстолобик, напівлящ, головень, корюшка, лин і щука) із 12 рік Литви. 45 % зразків м'язової тканини двохрічної риби були забруднені Pb у концентрації вищій, ніж зазначено у Литовських стандартах гігієни [20].

У ході наших досліджень з'ясовано, що концентрація кадмію у м'язах риби, придбаної на РБ, була вірогідно вищою ( $0,06 \pm 0,01$ ), ніж на ЦР

( $0,04 \pm 0,01$  мг/кг ( $P < 0,01$ )). Рівень Cu, Zn, As та Hg у спинних м'язах свіжевиловленої риби не був статистично значущим.

У наших дослідженнях ранжувальний ряд за рівнем важких металів поданий таким чином:  $Zn > Cu > Pb > As > Hg > Cd$ . В одному із досліджень концентрації Zn, Cd, Cr, As, Pb і Ni у різних видів риби коливалися від  $6,36 \pm 1,48$  до  $13,31 \pm 1,33$ ; від  $0,017 \pm 0,01$  до  $0,049 \pm 0,02$ ;  $0,654 \pm 0,04$ ; від  $0,015 \pm 0,01$  до  $0,033 \pm 0,01$ ;  $0,534 \pm 0,11$  та  $0,08 \pm 0,05$  мг/кг відповідно. Усі проаналізовані значення були в межах

рекомендованого рівня, за винятком Cr у *C. mrigala* [2]. Наші результати мають подібні висновки, адже вміст важких металів Pb, Cd, Cu, Zn, As та Hg у спинних м'язах свіжовиловленої риби не перевищували гранично допустимої концентрації.

Інша публікація висвітлює зазначені далі рівні важких металів у трьох видів риби, що живуть в озері Keban Dam, Туреччина. Так, показники Zn, Cu та Cd у м'язовій тканині коливалися від 19,07 до 35,85, від 1,36 до 2,21 та мали 0,010–0,370 мг/кг для *Cyprinus carpio*; 20,22–34,39, 1,43–2,65, 0,022–0,047 мг/кг для *Squalius cephalus* й від 11,03 до 22,52, і 1,23–1,51, і 0,010–0,035 мг/кг, відповідно для *Carpoeta umbla*. Наведений порядок біоаккумуляції даних металів може бути наслідком того факту, що окремі метали по-різному накопичуються в тканинах деяких видів риби [8].

Дослідники встановили, що концентрація Cd у м'язах риб коливалася від 1,1±0,18 до 2,5±0,21 мг/кг та Pb від 29,7±18,3 до 97,7±95,4 мг/кг [3]. Нами з'ясовано, що концентрація кадмію й свинцю не перевищували значення 0,06±0,01 мг/кг та 0,3±0,01 мг/кг, відповідно. Дані науковців підтверджують наші, оскільки серед оцінених концентрацій важких металів Zn мав найвищий рівень, а Cd – найнижчий [6].

Науковці оцінили концентрації Pb, Zn, Cr, Ni та Cu у двох прісноводних всеїдних і м'ясоїдних рибах, *Wallago attu* (Bloch and Schneider, 1801) та *Labeo dyocheilus* (McClelland, 1839). Кожен вид був вилловлений за допомогою місцевих рибалок із забрудненої частини річки Кабул поблизу Новшера, Пакистан. Всього досліджено 20 зразків, довжиною 8–11 см. Зафіксовано, що *L. dyocheilus* накопичує на 65 % більше важких металів, ніж *W. attu*. Метали накопичувалися в однаковому порядку в обох видів риб (Zn>Cr>Cu>Pb>Ni>Cd) [21].

Авторами був проведений аналіз ризику для здоров'я важких металів у їстівних частинах риби. Згідно отриманих результатів, їх вміст вказував на безпечні рівні для споживання людиною, а концентрація в м'ясі є загальноприйнятною межею міжнародного законодавства для основних металів (Zn і Cu) і несуттєвих металів (Cd). Однак вміст Pb мав перевищення ГДК [7, 15]. У наших дослідженнях перевищення ГДК щодо вмісту важких металів у м'язах риби не встановлено.

## Висновки

З'ясовано середні показники концентрації окремих важких металів у спинних м'язах риби *Carassius carassius* на території Полтавської області. Розподіл важких металів щодо їх вмісту в м'язах карасів можна подати у вигляді спадаючого ранжувального ряду Zn>Cu>Pb>As>Hg>Cd. Максимальна концентрація Цинку (26,01±0,9), Міді (0,32±0,02), Свинцю (0,3±0,01), Миш'яку (0,19±0,01), Ртуті (0,07±0,01) і Кадмію (0,06±0,01 мг/кг) відповідає гранично допустимим рівням. Досліджені проби риби, що надходили на Центральний ринок та ринок «Браїлки» міста Полтави, були безпечними щодо вмісту важких металів, оскільки не зафіксовано в жодній пробі перевищення рівня ГДК.

*Перспективи подальших досліджень.* У подальших дослідженнях плануємо вивчити вміст важких металів в інших видах риби й в залежності від пори року.

## Конфлікт інтересів





Автори стверджують про відсутність конфлікту інтересів щодо їхнього викладу та результатів досліджень.

## References

1. Afzaal, M., Hameed, S., Liaqat, I., Ali Khan, A. A., Abdul Manan, H., Shahid, R., & Altaf, M. (2022). Heavy metals contamination in water, sediments and fish of freshwater ecosystems in Pakistan. *Water Practice and Technology*, 17 (5), 1253–1272. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.039>
2. Alam, M., Rohani, M. F., & Hossain, M. S. (2023). Heavy metals accumulation in some important fish species cultured in commercial fish farm of Natore, Bangladesh and possible health risk evaluation. *Emerging Contaminants*, 9 (4), 100254. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100254>
3. Ali, H., Khan, E., & Nasir, M. J. (2020). Bioaccumulation of some potentially toxic heavy metals in freshwater fish of River Shah Alam, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Pakistan Journal of Zoology*, 52 (2). <https://doi.org/10.17582/journal.pjz/20171117161138>
4. Ali, N., Khan, M. H., Ali, M., Sidra, Ahmad, S., Khan, A., Nabi, G., Ali, F., Bououdina, M., & Kyzas, G. Z. (2024). Insight into microplastics in the aquatic ecosystem: Properties, sources, threats and mitigation strategies. *Science of The Total Environment*, 913, 169489. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169489>
5. Annabi, A., Said, K., & Messaoudi, I. (2013). Cadmium: bioaccumulation, histopathology and detoxifying mechanisms in fish. *American Journal of Research Communication*, 1, 60–79.
6. Bashir, F. H., Othman, M. S., Mazlan, A. G., Rahim, S. M., & Simon, K. D. (2013). Heavy metal concentration in fishes from the coastal waters of Kapar and Mersing, Malaysia. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 13 (2). [https://doi.org/10.4194/1303-2712-v13\\_2\\_21](https://doi.org/10.4194/1303-2712-v13_2_21)
7. Bawuro, A. A., Voegborlo, R. B., & Adimado, A. A. (2018). Bioaccumulation of heavy metals in some tissues of fish in lake Geriyo, Adamawa State, Nigeria. *Journal of Environmental and Public Health*, 2018, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2018/1854892>
8. Caglar, M., Canpolat, O., & Selamoglu, Z. (2019). Determination of some heavy metal levels in three freshwater fish in Keban Dam Lake (Turkey) for public consumption. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 18 (1), 188–198. <https://doi.org/10.22092/IJFS.2018.117890>
9. DSTU 7670:2014 *Syrovyna i produkty kharchovi. Hotuvannia prob. Mineralizatsiia dlia vyznachannia vmistu toksychnykh elementiv.* Chynnyy vid 2015-07-01. (2014). Kyiv. Retrieved from: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=85544](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=85544) [in Ukrainian]
10. DSTU ISO 11212-2:2004 *Krokhmal ta pokhidni produkty. Vmist vazhkykh metaliv. Chastyna 2. Vyznachennia vmistu rtuti metodom atomnoi absorbttsiinoi spektrometrii (ISO 11212-2:1997, IDT).* Chynnyy vid 2006-01-01. (2004). Kyiv. Retrieved from: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=93020](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=93020) [in Ukrainian]
11. Jamil Emon, F., Rohani, M. F., Sumaiya, N., Tuj Jannat, M. F., Akter, Y., Shahjahan, M., Abdul Kari, Z., Tahiluddin, A. B., & Goh, K. W. (2023). Bioaccumulation and bioremediation of heavy metals in fishes. A Review. *Toxics*, 11 (6), 510. <https://doi.org/10.3390/toxics11060510>
12. Jan, A., Banerjee, S., & Chouhan, R. (2022). Heavy metal toxicity, bioaccumulation and oxidative stress in freshwater fishes: a systematic review. *Uttar Pradesh Journal of Zoology*, 43 (24), 333–349. <https://doi.org/10.56557/upjz/2022/v43i243329>
13. Javed, M., & Usmani, N. (2017). An overview of the adverse effects of heavy metal contamination on fish health. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 89 (2), 389–403. <https://doi.org/10.1007/s40011-017-0875-7>

14. Kotelevych, V., Huralska, S., & Honcharenko, V. (2023). Veterinary and sanitary assessment of fish and seafood by quality and safety indicators. *Scientific Progress & Innovations*, 26 (3), 103–112. <https://doi.org/10.31210/spi2023.26.03.19>
15. Le, H. T., & Ngo, H. T. T. (2013). Cd, Pb, and Cu in water and sediments and their bioaccumulation in freshwater fish of some lakes in Hanoi, Vietnam. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 95 (8), 1328–1337. <https://doi.org/10.1080/02772248.2013.877462>
16. Maitera, O. N., Barminas, J. T., & Magili, S. T. (2011). Determination of Heavy Metal Levels in Water and Sediments of River Gongola in Adamawa State, Nigeria. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, 2 (5), 891–896.
17. Mensoor, M., & Said, A. (2018). Determination of heavy metals in freshwater fishes of the Tigris River in Baghdad. *Fishes*, 3 (2), 23. <https://doi.org/10.3390/fishes3020023>
18. Panda, B. P., Mohanta, Y. K., Parida, S. P., Pradhan, A., Mohanta, T. K., Patowary, K., Wan Mahari, W. A., Lam, S. S., Ghfar, A. A., Guerriero, G., Verma, M., & Sarma, H. (2023). Metal pollution in freshwater fish: A key indicator of contamination and carcinogenic risk to public health. *Environmental Pollution*, 330, 121796. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121796>
19. Sharma, A., Patel, P. L., & Sharma, P. J. (2022). Influence of climate and land-use changes on the sensitivity of SWAT model parameters and water availability in a semi-arid river basin. *CATENA*, 215, 106298. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106298>
20. Virbickas, T., & Sakalauskiene, G. (2006). Heavy metals in fish muscle in the Rivers of Lithuania. *Acta Zoologica Lituanica*, 16 (4), 271–278. <https://doi.org/10.1080/13921657.2006.10512741>
21. Yousafzai, A. M., Chivers, D. P., Khan, A. R., Ahmad, I., & Siraj M. (2010). Comparison of heavy metals burden in two freshwater fishes Wallago attu and Labeo dyocheilus with regard to their feeding habits in natural ecosystem. *Pakistan Journal of Zoology*, 42 (5), 537–544.
22. Zhong, W., Zhang, Y., Wu, Z., Yang, R., Chen, X., Yang, J., & Zhu, L. (2018). Health risk assessment of heavy metals in freshwater fish in the central and eastern North China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 157, 343–349. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.048>

#### ORCID

- O. Kruchynenko  <https://orcid.org/0000-0003-3508-0437>  
 S. Mykhailiutenko  <https://orcid.org/0000-0001-6634-1244>  
 O. Klymenko  <http://orcid.org/0000-0001-6257-5641>  
 S. Kravchenko  <https://orcid.org/0000-0002-7420-9320>



2024 Kruchynenko O. et al. This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.