

<https://doi.org/10.32782/2786-9067-2023-26-1>

УДК 619:616 - 099

## ПОГЛЯД НА ТОКСИКОЛОГІЮ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ В УМОВАХ ВОЄННОГО ЧАСУ

Пихтєєва О.Г., Большой Д.В., Пихтєєва О.Д.

*Український НДІ медицини транспорту МОЗ України, Одеса, Україна*

*Одеський обласний клінічний центр, Одеса, Україна*

*Пам'яті нашого вчителя Л.М.Шафрана*

*Анотація. Стаття присвячена новим викликам, які ставить війна перед фахівцями з токсикології важких металів. Сформульовані задачі, які необхідно вирішити науковій токсикологічній спільноті для захисту військовослужбовців та населення на прифронтових територіях від токсичної дії важких металів (свинцю, ртуті, збідненого урану).*

*Ключові слова: важки метали, свинець, ртуть, збіднений уран, прифронтові території*

**Передмова.** Токсикологія важких металів – один з основних напрямків експериментальної та клінічної токсикології, який успішно і послідовно розвивається у відділі Гігієни та токсикології УкрНДІ медицини транспорту більше 25 років. Одним з найважливіших напрямків наших досліджень є біохімічні основи транспорту важких металів в організмі [1-3], зв'язок токсичних і есенціальних (життєво-необхідних) металів, вплив забезпеченості організму цинком, залізом, міддю, марганцем, кальцієм та магнієм як важлива передумова профілактики токсичної дії важких металів на робітників, що працюють в небезпечних умовах.

**Актуальність.** Важкі метали — глобальні забруднювачі довкілля, які завжди присутні в оточуючому середовищі в нормальних умовах, але концентрація їх в пилу повітря, воді, водойм і більшості ґрунтів зазвичай достатньо низька. За роки еволюції в організмі людей, тварин, рослин створені механізми утилізації і виведення токсичних важких металів, які надходять в звичайних умовах.

Проте господарська діяльність людства призводить до концентрації цих елементів в процесі добичі, переробки та використання. Основні токсичні метали (свинець, ртуть, кадмій, талій тощо) та їх сполуки є речовинами I та II класу небезпечності і широко використовуються в мирний час, а також надходять в навколишнє середовище при аварійних ситуаціях і в період бойових дій. До недавнього часу наймасштабніше забруднення території України свинцем відбулося під час ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС в 1986 р., коли 2 травня (згідно з розсекреченими документами [4]) з метою створення поглинаючого екрану в осередок аварії було скинуто 900 тон свинцю. Зазвичай свинець використовують як екран від радіоактивного випромінювання. Але при високій температурі

(близько 1000 °C) розплавлений свинець починає помітно випаровуватися, переходячи в газову фазу. Таким чином, в повітря (а потім в ґрунти та поверхневі води) за короткий час потрапила величезна кількість свинцю, що на довгі роки забезпечило актуальність досліджень його нейротоксичної, нефротоксичної, гепатотоксичної дії, впливу на репродуктивне здоров'я нації, тощо.

### **Нові виклики для фахівців з токсикології важких металів під час війни**

Якщо обіг (добича, виробництво, використання і утилізація відходів) важких металів в мирний час жорстко регламентується і контролюється, під час бойових дій небезпека токсичної дії важких металів зазвичай недооцінюється, оскільки основні наслідки дії не смертельних доз носять відстрочений характер і проявляються через досить тривалий час [5, 6].

Втім виконання військовослужбовцями своїх обов'язків у воєнний час загрожує не тільки небезпекою поранення або загибелі від зброї супротивника, але й впливом інших факторів, значення яких безпосередньо в бойових діях не завжди можна адекватно оцінити. Одним з таких факторів є ураження організму (насамперед нирок, печінки та нервової системи) парами ртуті та свинцю, які у високій концентрації містяться в порохових газах, пилу, залишаються на шкірі.

Як ініціювальний заряд боєприпаси ствольної артилерії (а також танкові постріли, зенітні снаряди, патрони до кулеметів та стрілецької зброї) містять «гримучу ртуть» (фульminat ртуті  $\text{Hg}(\text{CNO})_2$ ), азид свинцю ( $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ ), ТНПС (стифнат свинцю  $\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3(\text{OPb})_2$ ) чи їх комбінації. Саме ці речовини знаходяться в значній кількості в боєприпасах до зброї радянського виробництва, яка масово використовується обома сторонами.

При пострілі разом із пороховими газами пари ртуті та свинцю (можливо, в особливо небезпечній нанодисперсній формі) потрапляють у зону дихання військовослужбовців.

Капсуль-детонатор патрона до стрілецької зброї містить, як правило, 0,1-0,2 г ініціюючих вибухових речовин, у той час як артилерійські снаряди калібром 122-155 мм включають кілька грамів сполук ртуті і свинцю.

Викид токсичних металів при артилерійському пострілі набагато значніший, ніж при стрільбі з автоматичної зброї. Слід, однак, мати на увазі, що використання стрілецької зброї має на увазі стрілянину чергами (10 пострілів за секунду), при цьому вихід порохових газів відбувається безпосередньо в зону дихання військовослужбовця. Таким чином, вплив ртуті та свинцю на організм піхотинця, ймовірно, можна порівняти з таким для артилериста.

Надходження сполук свинцю та ртуті в організм військовослужбовців, особливо на тлі досить одноманітного харчування, часто проблем з доступом до якісної питної води та

постійним психоемоційним стресом, може призводити до віддалених наслідків для соматичного та психічного здоров'я. Наші пілотні дослідження показали знижений вміст цинку та підвищений вміст свинцю і ртуті в крові військовослужбовців, які знаходились в шпиталі м. Одеси (у порівнянні з середньопопуляційними значеннями для мешканців Одеси). Раніше [7] саме впливом важких металів поряд зі стресом пояснювали посттравматичні розлади у учасників війни в Перській затоці та Афганістані.

Всі ці проблеми стосуються також мирного населення, яке перебуває поряд з зоною бойових дій або повертається на територію колишніх боїв після їх закінчення. Крім того, сполуки ртуті, свинцю, кадмію є стійкими забруднювачами довкілля — при потраплянні в ґрунти та води вони не зникають з часом, а їх перетворення в менш розчинні і безпечні форми потребує часу та/або спеціальної обробки. Крім того, пил, забруднений важкими металами під час бойових дій, пересувається на значні відстані. Вивчення забруднення льодів Гренландії і Арктики показало значно вищий вміст свинцю і ртуті в пластах, що формувались в період світових війн в Європі [8, 9]. Після закінчення бойових дій на певній території на багато років залишається небезпечний вплив важких металів на майбутні покоління [10, 11]. За аналізом даних попередніх конфліктів, загальні наслідки для здоров'я включали респіраторні захворювання, а також шкірні, серцево-судинні, репродуктивні та вроджені наслідки. Також часто повідомлялося про посттравматичний стресовий розлад, депресію, тривогу, когнітивні порушення та зниження якості життя [12].

До широко розповсюджених і достатньо вивчених наведених вище металічних поллютантів, які вже потрапляють в довкілля під час бойових дій, можуть додатись збіднений уран, який входить до сучасних боєприпасів НАТО, які плануються до постачання в найближчий час. Відомо, що уран видобувається переважно задля отримання ізотопу  $^{235}\text{U}$ . Процес збагачення регулює співвідношення трьох природних ізотопів ( $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  та  $^{238}\text{U}$ ) для отримання двох фракцій. Фракція з підвищеним вмістом  $^{235}\text{U}$  у порівнянні з природним називається збагаченим ураном і є джерелом отримання енергії для ядерних реакторів та зброї. Інша фракція, збіднена  $^{235}\text{U}$  та  $^{234}\text{U}$ , називається збідненим ураном і менш радіоактивна, ніж природний уран. Його шкідливість для здоров'я зумовлена не радіологічними, а токсичними властивостями. Це типовий важкий метал 1 класу небезпечності, проявляє нейро-, нефро-, гепатотоксичні властивості при тривалому впливі на організм навіть у низьких дозах [13]. Можливі наслідки включають порушення пам'яті, концентрації, координацію рухів, а також погіршення функцій нервової системи в цілому. Раніше вважалося, що, щоб отримати такі ефекти, необхідно перебувати в контакті з ураном протягом тривалого часу та при досить високих концентраціях. Однак, як показали Lestaevel,

P [14], після гострого впливу навіть помірної дози збідненого урану головний мозок є органом-мішенню поряд із нирками.

Збіднений уран широко застосовується у промисловості та військовому виробництві. Завдяки високій щільності він використовується як противага в літальних апаратах та броньованих машинах, а також у виробництві кінетичних пенетраторів (артилерійських снарядів та боєприпасів).

Ще в 1949 р. були описані стани депресії або збудження у людей після промислового впливу сполук урану [15]. Було продемонстровано, що U може долати гематоенцефалічний бар'єр і накопичуватися в головному мозку [16]. Це накопичення не рівномірно у всьому мозку і є дозозалежним [17]. Нейрокогнітивні розлади спостерігалися у ветеранів, які зазнали впливу фрагментів збідненого урану під час війни в Перській затоці [18] та Косово [19]. У разі використання на території України зброї зі збідненим ураном українські фахівці з токсикології важких металів повинні бути готові до нових викликів.

### **Що робити?**

Необхідно в найближчий час на основі власних досліджень та світового досвіду:

1. Розробити державну програму реабілітації військовослужбовців, постраждалих від дії важких металів (ВМ). Першим етапом програми є аналіз біосередовищ військовослужбовців (в першу чергу артилеристів та танкістів) на вміст токсичних важких металів, а також моніторинг есенціальних (цинку, магнію та кальцію);
2. Запропонувати заходи щодо превентивного захисту від токсичної дії ВМ, зниження впливу порохових газів на військовослужбовців (ЗІЗ органів дихання);
3. Розробити методи нефро- та гепатопротекції (з урахуванням медичної ефективності та економічної доцільності);
4. Розробити метод оцінки впливу бойових дій на забруднення території та впливу цих забруднень на здоров'я населення та сільськогосподарську діяльність;
5. Розробити державну програму рекультивації земель від забруднення важкими металами внаслідок бойових дій.

Вирішення цих проблем потребує злагодженої взаємодії всіх фахівців з токсикології важких металів, участі Асоціації мікроелементологів України та Товариства токсикологів України.

### **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Шафран Л.М., Пыхтеева Е.Г., Большой Д.В. Металлотионеины / Под редакцией проф. Л.М. Шафрана. Одесса: Издательство "Чорномор'я", 2011. 428 с.
2. Шафран Л.М., Пыхтеева Е.Г., Большой Д.В. Тяжёлые металлы: система биологического транспорта. Одесса: Феникс, 2018. 312 с.

3. Большой Д. В., Пихтеева О. Г., Трахтенберг И. М., Шафран Л. М. Ртуть у XXI столітті: від постановки проблеми до її вирішення : монографія / Під ред.: ак. НАМНУ І. М. Трахтенберга, проф. Л. М. Шафрана. Одеса : Фенікс, 2020. 240 с.
4. Жуйков Б. Чернобыль: секретность против людей Доступ <https://trv-science.ru/2019/05/chernobyl-sekretnost-protiv-lyudej/>
5. Пихтеева О.Г. Металотіонеїн у токсикології важких металів: дис ...доктора біол. наук: 14.03.06 . К., 2015. 350 с.
6. Большой Д. В. Гігієнічне значення особливостей токсикокінетики, токсикодинаміки і біотрансформації малих доз ртуті: дис.... канд. биол. наук: 14.02.01. К., 2007. 167 с.
7. Figueroa X. A., Wright J. K. Ok, doc... What do I really have? Posttraumatic stress disorder versus traumatic brain injury. *Journal of Special Operations Medicine*. 2015. Vol. 15(4). P. 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2010.10.008>
8. Gębka K., Bełdowski J., Bełdowska M. The impact of military activities on the concentration of mercury in soils of military training grounds and marine sediments. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. Vol. 23. P. 23103-23113. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-016-7436-0>
9. Munro N. B., Talmage S. S., Griffin G. D., Waters L. C., Watson A. P., King J. F., Hauschild V. The sources, fate, and toxicity of chemical warfare agent degradation products. *Environmental health perspectives*. 1999. Vol. 107(12). P. 933-974. <https://doi.org/10.1289/ehp.99107933>
10. Vänskä M., Diab S. Y., Perko K., Quota S. R., Albarqouni N. M., Myöhänen A., Manduca P. Toxic environment of war: maternal prenatal heavy metal load predicts infant emotional development. *Infant behavior and development*. 2019. Vol. 55. P. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2019.01.002>
11. Hermanson M. H. Historical accumulation of atmospherically derived pollutant trace metals in the Arctic as measured in dated sediment cores. *Water Science and Technology*. 1993. Vol. 28(8-9). P. 33-41. <https://doi.org/10.2166/wst.1993.0601>
12. Durham J., Pizzino S. The health impacts of toxic remnants of war on civilian populations: A scoping review. *Prehospital Disaster Med*. 2019. Vol. 34. P. 32. [https://www.researchgate.net/profile/Ashis-Shrestha/publication/332909503\\_Newborn\\_and\\_Child\\_Health\\_Care\\_in\\_Humanitarian\\_Crisis\\_Settings\\_Piloting\\_of\\_Training\\_Package\\_for\\_Primary\\_Health\\_Care\\_Workers\\_in\\_Rural\\_Nepal/links/60f1d4dd0859317dbdea23f8/Newborn-and-Child-Health-Care-in-Humanitarian-Crisis-Settings-Piloting-of-Training-Package-for-Primary-Health-Care-Workers-in-Rural-Nepal.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ashis-Shrestha/publication/332909503_Newborn_and_Child_Health_Care_in_Humanitarian_Crisis_Settings_Piloting_of_Training_Package_for_Primary_Health_Care_Workers_in_Rural_Nepal/links/60f1d4dd0859317dbdea23f8/Newborn-and-Child-Health-Care-in-Humanitarian-Crisis-Settings-Piloting-of-Training-Package-for-Primary-Health-Care-Workers-in-Rural-Nepal.pdf)

13. Nordberg G.F., Costa M. eds. Handbook on the Toxicology of Metals: Volume II: Specific Metals. Academic Press, 2021. P. 885-936
14. Lestaev P., Houpert P., Bussy C., Dhieux B., Gourmelon P., Paquet F. The brain is a target organ after acute exposure to depleted uranium. *Toxicology*. 2005. Vol. 212(2-3). P. 219-226. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2005.05.002>
15. Howland J. W. Studies on human exposures to uranium compounds. Pharmacology and toxicology of uranium. New York: McGraw-Hill Book Company, 1949. P. 993-1017. <https://inldigitalibrary.inl.gov/PRR/89501.pdf>
16. Lemerrier V., Millot X., Ansoborlo E., Menetrier F., Flüry-Hérard A., Rousselle C., Scherrmann J.M. Study of uranium transfer across the blood-brain barrier. *Radiation protection dosimetry*. 2003. Vol. 105(1-4). P. 243-245. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006232>
17. Pellmar T. C., Fuciarelli A. F., Ejniak J. W., Hamilton M., Hogan J., Strocko S., Landauer, M. R.. Distribution of uranium in rats implanted with depleted uranium pellets. *Toxicological sciences*. 1999. Vol. 49(1). P. 29-39. <https://doi.org/10.1093/toxsci/49.1.29>
18. McDiarmid M. A., Keogh J. P., Hooper F. J., McPhaul K., Squibb K., Kane R., Walsh, M. Health effects of depleted uranium on exposed Gulf War veterans. *Environmental research*. 2000. Vol. 82(2). P. 168-180. <https://doi.org/10.1006/enrs.1999.4012>
19. Jiang G.C.T., Aschiner M. Neurotoxicity of depleted uranium: reasons for increased concern. *Biological trace element research*. 2006. Vol. 110. P. 1-17. <https://link.springer.com/article/10.1385/BTER:110:1:1>

#### REFERENCES

1. Shafran LM, Pykhtieieva EG, Bolshoy DV. Metallothioneins / Edited by prof. L.M. Saffron - Odessa: Chornomor'ya Publishing House, 2011. - 428 p.
2. Shafran LM, Pykhtieieva EG, Bolshoy DV. Heavy metals: a biological transport system - Odessa: Phoenix, 2018. - 312 p.
3. Bolshoy DV, Pykhtieieva EG, Trakhtenberg IM, Shafran LM. Mercury in the 21st century: from problem statement to solution: monograph / Ed.: ak. Trachtenberg IM. State National University, prof. Shafran L.M. Odesa: Phoenix, 2020. – 240 p.
4. Zhuikov B. Chernobyl: secrecy against people Access <https://trv-science.ru/2019/05/chernobyl-sekretnost-protiv-lyudej/>
5. Pykhtieieva OG. Metallothionein in the toxicology of heavy metals: thesis ... doctor of biol. Sciences: 14.03.06 . K., 2015. 350 p.
6. Bolshoy DV. Hygienic significance of the features of toxicokinetics, toxicodynamics and biotransformation of small doses of mercury: diss... Cand. biol. Sciences: 02.14.01. K., 2007. 167 p.

7. Figueroa XA, Wright JK. Ok, doc... What do I really have? Posttraumatic stress disorder versus traumatic brain injury. *Journal of Special Operations Medicine*. 2015;15(4):59-66. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2010.10.008>
8. Gębka K, Bełdowski J, Bełdowska M. The impact of military activities on the concentration of mercury in soils of military training grounds and marine sediments. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23:23103-23113. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-016-7436-0>
9. Munro NB, Talmage SS, Griffin GD, Waters LC, Watson AP, King JF, Hauschild V. The sources, fate, and toxicity of chemical warfare agent degradation products. *Environmental health perspectives* 1999;107(12):933-974. <https://doi.org/10.1289/ehp.99107933>
10. Vänskä M, Diab SY, Perko K, Quota SR, Albarqouni NM, Myöhänen A, Manduca P. Toxic environment of war: maternal prenatal heavy metal load predicts infant emotional development. *Infant behavior and development*. 2019; 55:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2019.01.002>
11. Hermanson MH. Historical accumulation of atmospherically derived pollutant trace metals in the Arctic as measured in dated sediment cores. *Water Science and Technology*. 1993;28(8-9): 33-41. <https://doi.org/10.2166/wst.1993.0601>
12. Durham J, Pizzino S. The health impacts of toxic remnants of war on civilian populations: A scoping review. *Prehospital Disaster Med*. 2019;34:32. [https://www.researchgate.net/profile/Ashis-Shrestha/publication/332909503\\_Newborn\\_and\\_Child\\_Health\\_Care\\_in\\_Humanitarian\\_Crisis\\_Settings\\_Piloting\\_of\\_Training\\_Package\\_for\\_Primary\\_Health\\_Care\\_Workers\\_in\\_Rural\\_Nepal/links/60f1d4dd0859317dbdea23f8/Newborn-and-Child-Health-Care-in-Humanitarian-Crisis-Settings-Piloting-of-Training-Package-for-Primary-Health-Care-Workers-in-Rural-Nepal.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ashis-Shrestha/publication/332909503_Newborn_and_Child_Health_Care_in_Humanitarian_Crisis_Settings_Piloting_of_Training_Package_for_Primary_Health_Care_Workers_in_Rural_Nepal/links/60f1d4dd0859317dbdea23f8/Newborn-and-Child-Health-Care-in-Humanitarian-Crisis-Settings-Piloting-of-Training-Package-for-Primary-Health-Care-Workers-in-Rural-Nepal.pdf)
13. Nordberg GF, Costa M. eds. *Handbook on the Toxicology of Metals: Volume II: Specific Metals*. Academic Press, 2021. P. 885-936
14. Lestaevel P, Houpert P, Bussy C, Dhieux B, Gourmelon P, Paquet F. The brain is a target organ after acute exposure to depleted uranium. *Toxicology*, 2005;212(2-3):219-226. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2005.05.002>
15. Howland JW. *Studies on human exposures to uranium compounds. Pharmacology and toxicology of uranium*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1949. P. 993-1017. <https://indigitallibrary.inl.gov/PRR/89501.pdf>
16. Lemerrier V, Millot X, Ansoborlo E, Menetrier F, Flüry-Hérard A, Rousselle C, Scherrmann J.M. Study of uranium transfer across the blood-brain barrier. *Radiation protection dosimetry*. 2003;105(1-4): 243-245. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006232>
17. Pellmar TC, Fuciarelli A.F, Ejnik JW, Hamilton M, Hogan J, Strocko S, Landauer MR. Distribution of uranium in rats implanted with depleted uranium pellets. *Toxicological sciences: an*

official journal of the Society of Toxicology. 1999;49(1):29-39.  
<https://doi.org/10.1093/toxsci/49.1.29>

18. McDiarmid MA, Keogh JP, Hooper FJ, McPhaul K, Squibb K, Kane R, Walsh M. Health effects of depleted uranium on exposed Gulf War veterans. *Environmental research*. 2000;82(2): 168-180. <https://doi.org/10.1006/enrs.1999.4012>

19. Jiang GCT, Aschiner M. Neurotoxicity of depleted uranium: reasons for increased concern. *Biological trace element research*. 2006;110: 1-17.  
<https://link.springer.com/article/10.1385/BTER:110:1:1>

## **A LOOK AT THE TOXICOLOGY OF HEAVY METALS IN WARTIME CONDITIONS**

Pykhtieieva E.G., Bolshoy D.V., Pykhtieieva E.D.

*Abstract. The problematic article is devoted to the new challenges that the war poses for specialists in the toxicology of heavy metals. The tasks that need to be solved by the scientific toxicological community to protect military personnel and civilians in front-line territories from the toxic effects of heavy metals are formulated.*

**Key words:** heavy metals, lead, mercury, depleted uranium, military operations

Пихтєєва Олена Гераклітівна ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8765-2380>, +38050 56 20 522, +38067 942 68 73, pyhteevaeg@gmail.com

Большой Д.В. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8731-6678>

Пихтєєва О.Д. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8953-0619>

Надійшла до редакції / Receiv: 20.03.2023