Bioaccumulation of heavy metals in the dice snake *Natrix tessellata* (Reptilia, Colubridae) from ecosystems of different anthropogenic loads in modern conditions of the steppe Dnieper area

S. V. Yermolenko, V. Ya. Gasso, A. M. Hagut, I. A. Hasso, V. A. Spirina

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

Article info

Received 19.10.2019

Received in revised form

26.10.2019

Accepted 03.11.2019

Oles Honchar Dnipro
National University,
Gagarin Ave., 72, Dnipro,
49010, Ukraine.
Tel.: +38-095-173-62-18
E-mail:
serejamahno@gmail.com

*Yermolenko, S. V., Gasso, V. Ya., Hagut, A. M., Hasso, I. A., & Spirina, V. A. (2019). Bioaccumulation of heavy metals in the dice snake *Natrix tessellata* (Reptilia, Colubridae) from ecosystems of different anthropogenic loads in modern conditions of the steppe Dnieper area. Ecology and Noospherology, 30(2), 113–117. doi:10.15421/031919*

We studied the peculiarities of bioaccumulation and distribution of heavy metals (cadmium, lead, zinc and copper) in the bone tissue, liver and kidneys of the dice snake *Natrix tessellata* (Laurenti, 1768) inhabited ecosystems under different anthropogenic loads in 2015-2016. Mature individuals were caught in anthropogenically transformed ecosystems of the sanitary-protective zone of the Dniprovsk Thermal Power Plant (SPZ DTPP) (48.402°N, 35.111°E, n = 7), coastal ecosystems of the National Nature Park «Velykyi Luh» (47.443°N, 35.149°E, n = 8) and in the Maiorka gully ecosystems (48.260°N, 35.170°E, n = 7). The gross content of metals in the organs of *N. tessellata* was determined after their dry ashing in a muffle furnace. Determination of the trace elements was performed by atomic absorption spectrophotometry. Among the studied trace elements, zinc has the highest concentrations in the liver, kidneys and bones of *N. tessellata*. The kidneys and liver are characterized by such amount of concentrations: Zn > Cu > Pb > Cd, but bone tissue has the following ratio Zn > Pb > Cu > Cd. The highest concentration of cadmium is found in the kidneys, and the lowest one – in the bones of snakes. There are the highest contents of lead and copper in the snakes' liver, but the lowest in the kidneys and bones. The lead bioaccumulations in organs of snakes from different ecosystems are dissimilar. Zinc content in bones is higher than in kidneys and liver, but the lowest concentration is found in the kidneys. It has been found that the highest contents of toxic metals (Cd, Pb) were in the kidneys and liver of the snakes dwelled in the SPZ DTPP ecosystems in comparison with both studied natural ecosystems. In addition, snakes caught in anthropogenically transformed ecosystems of SPZ DTPP are characterised by increased zinc content in all studied organs and enlarged copper concentration in the kidneys. Considering the obtained results on the metals bioaccumulation, the dice snake can be considered as a potential bio-indicator of environmental pollution by heavy metals.

Keywords: snakes; cadmium; lead; zinc; copper; thermal power plant; ecotoxics

Біокумуляція важких металів у водяного вужа *Natrix tessellata* (Reptilia, Colubridae) з екосистем із різним антропогенним навантаженням у сучасних умовах степового Придніпров'я

С. В. Єрмоленко, В. Я. Гасо, А. М. Гагут, І. А. Гасо, В. А. Спіріна

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

Визначено особливості біокумуляції та розподілу важких металів (кадмій, свинець, цинк, мідь) у кістковій тканині, печінці та нирках водяних вужів *Natrix tessellata* (Laurenti, 1768), що мешкають в екосистемах з різним рівнем антропогенного навантаження. Досліджували популяції вужів з трьох місць мешкання: антропогенно трансформовані екосистеми санітарно-захисної зони Придніпровської теплової електростанції (СЗЗ Придніпровської ТЕС) на лівому березі р. Дніпра, природні прибережні екосистеми національного природного парку «Великий Луг» (НПП «Великий Луг») та природні екосистеми Майорової балки, що прилягає до с. Майорка на правому березі р. Дніпра. У всіх органах *N. tessellata*,

що досліджувалися, цинк знайдено у найбільшій концентрації порівняно з іншими мікроелементами. Виявлено, що серед органів найбільше кадмію акумулюють нирки вужів, відповідно свинець та мідь найбільше накопичуються у печінці, а цинк – у кістках тварин. У водяних вужів з популяції антропогенно трансформованої СЗЗ Придніпровської ТЕС знайдено збільшений уміст токсичних металів (Cd, Pb) в органах, які беруть активну участь у підтриманні гомеостазу тварин – нирки та печінка. Також найбільшу концентрацію цинку зафіксовано в органах змій з СЗЗ Придніпровської ТЕС.

Ключові слова: змій; кадмій; свинець; цинк; мідь; теплова електростанція; екотоксиканти

Вступ

Концентрація важких металів у компонентах довкілля є важливим об'єктом моніторингу стану навколишнього середовища. Частина мікроелементів є біогенними речовинами, що при збільшенні концентрації проявляють токсичні властивості, а інша частина – ксенобіотиками, які виявляють токсичну дію вже за незначних концентрацій. У промислово розвинених регіонах переважна більшість важких металів надходить у навколишнє середовище з антропогенних джерел: промисловість, побутові відходи, транспорт тощо (Snizhko, Shevchenko, 2011; Jan et al., 2015). Розподіл металів в абіотичних та біотичних об'єктах середовища залежить від фізико-хімічних характеристик цих елементів та речовин, з якими вони взаємодіють, а також характеристик самого середовища (Jaishankar et al., 2014).

В Україні найбільшу частку у виробництві енергетики займають теплові електростанції (ТЕС), робота яких пов'язана зі споживанням значної кількості викопного палива, що супроводжується утворенням низки токсичних забруднюючих речовин, у тому числі важких металів (Timonin, 2003; Kryzhanivskyi, Koshlak, 2016).

Оскільки рептилії перебувають на середньому або вищому трофічному рівні, змій є зручним об'єктом для оцінки потоків та накопичення токсичних речовин у трофічних ланцюгах (Sharpilo, 1983; Campbell et al., 2005). Проте розподіл та накопичення важких металів в організмах різних видів змій на різноманітних територіях залишаються до сьогодні недостатньо вивченими (Gavrić et al., 2017, 2019; Schwabenlander et al., 2019).

Natrix tessellata (Laurenti, 1768) – фоновий вид плазунів для степового Придніпров'я, який топично завжди пов'язаний з водними екосистемами (Gasso, 2011). Північна межа його ареалу має тенденцію до просування на північ у зв'язку з підвищенням значення середньорічної температури (Kotenko et al., 2011; Nekrasova et al., 2013). Водяний вуж – це гігрофільний вид, основу раціону якого складає риба (Bulakhov et al., 2007). Дані про біоаккумуляцію важких металів в організмі змій можна використовувати для індикації стану як самих популяцій, так і навколишнього середовища (Gasso, 2003; Campbell et al., 2005).

Об'єкти та методи досліджень

Для дослідження вмісту важких металів в органах водяного вужа у 2015–2016 рр. відбирали статевозрілих особин в антропогенно трансформованих екосистемах санітарно-захисної зони Придніпровської теплової електростанції (СЗЗ Придніпровської ТЕС) (48.402°N, 35.111°E, n=7), у природних прибережних екосистемах національного природного парку «Великий Луг» (НПП «Великий Луг») (47.443°N, 35.149°E, n=8) та в екосистемах Майорової балки (48.260°N, 35.170°E, n=7). Досліджено вміст чотирьох металів у кістковій тканині, нирках та печінці вужів: мідь (Cu), цинк (Zn), свинець (Pb), кадмій (Cd). Валовий уміст металів в органах *N. tessellata* визначали після їх озонення у муфельній печі при поступовому підвищенні температури до 500 °C. Визначення мікроелементів виконували методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії (Havezov, Tsalev 1983; Misyura et al., 2008).

Дослідження проводили відповідно до Європейської конвенції із захисту хребетних тварин, що використовуються для експериментальних та інших

наукових цілей. Перед отриманням біологічного матеріалу тварин присипляли.

Статистичну обробку даних здійснено шляхом розрахунку середнього значення ($\bar{x}$), медіани (M) і середньоквадратичного відхилення (SD). Значущі відмінності між вибірками оцінювали за допомогою U-критерію Манна-Уїтні у пакеті Statistica 10 (StatSoft, Inc., USA, 2011). Відмінності вважали значущими за $p < 0,05$.

Результати та їх обговорення

Кадмій здійснює високотоксичну дію на організми хребетних тварин (Perfus-Barbeoch, 2002; Chetverikova, Martinevskaya, 2013). Накопичення Cd негативно впливає на нервову, кровоносну, видільну, репродуктивну та імунну системи (Ostrovskaya, 2014). Найбільшу концентрацію кадмію в органах водяних вужів, що досліджувалися, виявлено в нирках. У той же час найбільшу концентрацію свинцю знайдено в печінці. Відомо, що саме ці органи є основними біологічними мішенями в наземних хребетних тварин для біоаккумуляції вказаних елементів (Jung et al., 1993). У той же час найменший уміст Cd знайдено в кістковій тканині *N. tessellata* (табл.1).

Таблиця 1

Розподіл важких металів (M^*) в органах водяного вужа в умовах степового Придніпров'я, мг/кг сухої маси

	Метал	Нирки	Печінка	Кістки
СЗЗ Придніпровської ТЕС (n = 7)	Cd	6,6	3,4	1,2
	Pb	20,6	26,9	16,0
	Zn	57,7	171,3	309,2
	Cu	52,6	90,0	5,1
Майорова балка (n = 7)	Cd	4,0	1,50	1,2
	Pb	11,2	19,1	13,8
	Zn	33,3	173,8	273,7
	Cu	31,5	88,5	4,8
НПП «Великий Луг» (n = 8)	Cd	4,4	2,1	1,2
	Pb	14,4	16,5	11,9
	Zn	40,8	154,4	253,3
	Cu	39,9	82,8	4,8

Примітка. * M – медіана.

Свинець, як і кадмій, відносять до токсичних елементів. Надлишкове накопичення Pb призводить до порушення функцій організму, оскільки свинець негативно впливає на основні фізіологічні процеси (Wani et al., 2015). Токсична дія свинцю, яка зумовлена впливом на баланс між утворенням вільних радикалів та антиоксидантів, призводить до розвитку оксидативного стресу (Jaishankar et al., 2014). Найменші концентрації свинцю серед органів, що досліджувалися, виявлено в кістках *N. tessellata*. з екосистем НПП «Великий Луг» та СЗЗ Придніпровської ТЕС, проте у вужів з Майорової балки найменше цього металу міститься в нирках.

Цинк та мідь – есенціальні, необхідні для функціонування живих організмів метали, які є складовими багатьох ферментів, зокрема супероксиддисмутази (Andreini, Bertini, 2012; Sharif et al. 2012) та інших. Проте перевищення концентрацій цих елементів також може несприятливо впливати на стан організмів тварин. Високі концентрації цинку негативно

впливають на засвоєння фізіологічно конкуруючих металів, наприклад міді (Dabakhov et al., 2005; Erdem et al., 2016). Найнижчі концентрації міді у змій також виявлено в кістковій тканині, в якій, навпаки, спостерігаються найбільші концентрації цинку. Найвищі концентрації Cu серед органів, що досліджувалися, також відмічені у печінці, незважаючи на значні концентрації в ній Zn. Біоаккумуляція міді у тварин відбувається переважно в печінці, легенях і серці (Chasova, Ivchuk, 2014).

Для всіх екосистем, що досліджувалися, кількісний розподіл металів в органах та тканинах водяних вужів представлений рядами: $Zn > Cu > Pb > Cd$ – для нирок і печінки та $Zn > Pb > Cu > Cd$ – для кісткової тканини (табл. 1). Відомо, що в печінці північноамериканських вужів (*Nerodia sipedon* L.) з різних екосистем штату Теннессі (США) та водяних вужів (*N. tessellata*) з природних екосистем Республіки Сербія спостерігається переважання

кадмію над свинцем у печінці (Campbell et al., 2005; Gavrić et al., 2017).

Результати дослідження вказують на збільшення концентрації міді майже в 1,4 разу в нирках та цинку в 1,3 разу в кістках водяних вужів з антропогенно порушених екосистем. Уміст кадмію, цинку та свинцю в печінці та нирках водяних вужів з антропогенно трансформованих екосистем у 1,5–2,1 разу більший, ніж концентрація зазначених металів в органах вужів з природних екосистем.

Уміст Cd, Pb, Zn та Cu у нирках *N. tessellata* в популяції з антропогенно порушених екосистем СЗЗ Придніпровської ТЕС має достовірно значущі відмінності відносно таких показників для змій з екосистем НПП «Великий Луг» та Майорової балки. У той же час між водяними вужами з популяцій природних екосистем Майорової балки і НПП «Великий Луг» достовірно значущих відмінностей не виявлено (табл. 2).

Таблиця 2

Концентрація важких металів ($\bar{x} \pm SD$) у нирках водяного вужа в умовах степового Придніпров'я, мг/кг сухої маси

Показник	НПП «Великий Луг» (n = 8)	Майорова балка (n = 7)	СЗЗ Придніпровської ТЕС (n = 7)
Cd	4,72 ± 0,97	4,41 ± 1,42	6,54 ± 0,95* [#]
Pb	13,8 ± 2,39	12,3 ± 3,72	22,4 ± 4,71* [#]
Zn	39,5 ± 6,54	36,1 ± 8,77	59,3 ± 14,00* [#]
Cu	40,9 ± 6,21	33,3 ± 12,54	54,8 ± 10,10* [#]

Примітка. * $p < 0,05$ порівняно з НПП «Великий Луг»; # $p < 0,05$ порівняно з Майоровою балкою.

Згідно з результатами в печінці водяних вужів з порушених екосистем СЗЗ Придніпровської ТЕС виявлено вищі концентрації кадмію, свинцю та цинку, ніж в особин

з інших популяцій. За вмістом Cu у печінці достовірно значущих відмінностей між змій з різних екосистем не виявлено (табл. 3).

Таблиця 3

Концентрація важких металів ($\bar{x} \pm SD$) у печінці водяного вужа в умовах степового Придніпров'я, мг/кг сухої маси

Показник	НПП «Великий Луг» (n = 8)	Майорова балка (n = 7)	СЗЗ Придніпровської ТЕС (n = 7)
Cd	2,13 ± 0,65	1,78 ± 0,82	3,45 ± 1,05* [#]
Pb	17,30 ± 3,92	20,60 ± 5,07	27,23 ± 5,36* [#]
Zn	141,9 ± 28,60	164,50 ± 22,31	172,74 ± 24,73* [#]
Cu	80,60 ± 9,38	85,41 ± 13,27	93,80 ± 18,78

Примітка. Див. табл. 2.

Також дослідження показали, що значущих відмінностей за концентраціями металів у кістковій тканині у вужів з екосистем НПП «Великий Луг» та

Майорової балки не знайдено (табл. 4). Уміст цинку в кістках водяних вужів з екосистем СЗЗ Придніпровської ТЕС вищий, ніж у особин з інших екосистем (табл. 4).

Таблиця 4

Концентрація важких металів ($\bar{x} \pm SD$) у кістках водяного вужа в умовах степового Придніпров'я, мг/кг сухої маси

Показник	НПП «Великий Луг» (n = 8)	Майорова балка (n = 7)	СЗЗ Придніпровської ТЕС (n = 7)
Cd	1,35 ± 0,50	1,31 ± 0,53	1,19 ± 0,19
Pb	14,50 ± 5,34	15,11 ± 7,62	17,34 ± 4,45
Zn	266,00 ± 88,12	286,60 ± 128,21	346,82 ± 61,11* [#]
Cu	5,91 ± 2,80	5,68 ± 2,61	6,10 ± 4,09

Примітка. Див. табл. 2.

Виявлено, що в особин із популяції *N. tessellata* СЗЗ Придніпровської ТЕС найменше середнє значення вмісту кадмію знаходиться в кістках. Оскільки цинк вважається антагоністом кадмію в живих організмах, це може впливати на зниження показників цього металу в кістковій тканині водяних вужів, виловлених з антропогенно трансформованої екосистеми (Waalkes, Poirier, 1984).

Висновки

Серед досліджених мікроелементів цинк має найвищі концентрації в печінці, нирках та кістках *N. tessellata*. Загалом для перелічених органів характерні такі розподіли: $Zn > Cu > Pb > Cd$ – для нирок і печінки та $Zn > Pb > Cu > Cd$ – для кісткової тканини.

Найбільшу концентрацію кадмію виявлено в нирках вужів, відповідно найменшу – у кістковій тканині *N. tessellata*. У печінці водяних вужів спостерігається більший уміст свинцю та міді, ніж у нирках та кістковій тканині. Також визначено, що розподіл свинцю в органах водяного вужа відрізняється в різних екосистемах. Уміст цинку в кістковій тканині вищий, ніж у нирках та печінці. Найменшу концентрацію цинку виявлено в нирках вужів.

Виявлено, що у водяних вужів з екосистеми, прилеглої до Придніпровської ТЕС, спостерігається найбільший уміст токсичних металів (Cd, Pb) у нирках та печінці порівняно з водяними вужами з обох природних екосистем, що досліджувалися. Також у змій, виловлених з антропогенно трансформованих екосистем, визначено збільшення вмісту цинку у всіх органах та концентрації міді в нирках.

Враховуючи отримані результати щодо біоаккумуляції важких металів в організмі змій, водяний вуж можна вважати перспективним видом-біоіндикатором забруднення навколишнього середовища важкими металами.

References

- Andreini, C., & Bertini, I. (2012). A bioinformatics view of zinc enzymes. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 111, 150–156.
- Bulakhov, V. L., Gasso, V. Ya., & Pakhomov, O. Ye. (2007). *Biologichne riznomanittya Ukrainy. Dnipropetrovs'ka oblast'. Zemnovodni ta plazuny (Amphibia et Reptilia) [Biological Diversity of Ukraine. The Dnipropetrovsk region. Amphibians and Reptiles (Amphibia et Reptilia)]*. Dnipropetr. Nat. Univ. Press, Dnipropetrovsk (in Ukrainian).
- Campbell, K. R., Campbell, T. S., & Burger, J. (2005). Heavy metal concentrations in northern water snakes (*Nerodia sipedon*) from East Fork Poplar Creek and the Little River, East Tennessee, USA. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 49(2), 239–248.
- Chasova, E. V., & Ivchuk, V. V. (2014). *Vozdeystvie soedineniy medi (II) na okruzhayushchuyu sredu i zdorove cheloveka [Effects of copper (II) compounds on the environmental and human health]*. *Young Scientist*, 6(1), 194–195 (in Russian).
- Chetverikova, N. S., & Martsinevskaya L.V. (2013). Cadmiy v agrolandshaftah lesostepnoy zonyi CChO [Cadmium in agricultural landscapes forest-steppe zone of Central Chernozem region]. *Achievements of Science and Technology of AIC*, 7, 69–70 (in Russian).
- Dabakhov, M. V., Dabakhova, Ye. V., & Titova, V. I. (2005). Tyazhelye metally: ekotoksikologiya i problemy normirovaniya [The Heavy metals: ecotoxicology and rationing problems]. *GSHA, Novgorod* (in Russian).
- Erdem, O., Yazihan, N., Kocak, M. K., Sayal, A., & Akcil, E. (2016). Influence of chronic cadmium exposure on the tissue distribution of copper and zinc and oxidative stress parameters in rats. *Toxicology and Industrial Health*, 32(8), 1505–1514.
- Gasso, V. Y. (2003). *Vozdeystvie tehnogennoi transformatsii ekosistem na akumulyatsiyu tiazhelykh metallov, soderzhaniye belka i lipidov v yaysakh Natrix natrix (Reptilia, Squamata) [The impact of technogenic transformation of ecosystems on the accumulation of heavy metals, protein and lipid levels in eggs Natrix natrix (Reptilia, Squamata)]*. *Visnyk of Dnipropetrovsk University-Biology Ecology*, 1(11), 146–150 (in Russian).
- Gasso, V. Y. (2011). *Kharakterystyka populatsii zvychainoho vuzha lisovykh bioheotsenoziv Prysmaria [Grass snake populations' features of the forest biogeocoenoses in the Samara River area]*. *Visnyk of Dnipropetrovsk University-Biology Ecology*, 19(2), 136–142 (in Ukrainian).
- Gavrić, J., Andjelković, M., Tomović, L., Prokić, M., Despotović, S., Gavrilović, B., Radovanović, T., Borković, S., Pavlović, S., & Saičić, Z. (2016). Oxidative stress biomarkers, cholinesterase activity and biotransformation enzymes in the liver of dice snake (*Natrix tessellata* Laurenti) during pre-hibernation and post-hibernation: A possible correlation with heavy metals in the environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 138, 154–162.
- Gavrić, J., Despotović, S., Prokić, M., Gavrilović, B., Radovanović, T., Andelković, M., Tomović, L., Borković-Mitić, S., Pavlović, S., & Saičić, Z. (2019). Do different diets affect oxidative stress biomarkers and metal bioaccumulation in two snake species? *Comparative Biochemistry and Physiology, Part C: Toxicology & Pharmacology*, 223, 26–34.
- Havezov, I., & Tsalev, D. (1983). *Atomno-absorbtsionnyi analiz [Atomic absorption analysis]*. Chemistry, Leningrad. (in Russian).
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60–72.
- Jan, A. T., Azam, M., Siddiqui, K., Ali, A., Choi, I., & Haq, Q. M. R. (2015). Heavy metals and human health: mechanistic insight into toxicity and counter defense system of antioxidants. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(12), 29592–29630.
- Jung, K., Pergande, M., Graubau, H. J., Fels, L. M., Endl, U., & Stolte, H. (1993). Urinary proteins and enzymes as early indicators of renal dysfunction in chronic exposure to cadmium. *Clinical chemistry*, 39(5), 757–765.
- Kotenko, T. I., Shaitan, S. V., Starkov, V. G., Zinenko, O. I. (2011). The northern range limit of the dice snake (*Natrix tessellata*) in Ukraine and the Don river basin in Russia. *Mertensiella*, 18, 311–325.
- Kryzhanivskiy, Ye. I., & Koshlak H. V. (2016). *Ekologichni problemy enerhetyky [Environmental problems of energy]*. *Naftohazova Enerhetyka*, 25(1), 80-90 (in Ukrainian).
- Misyura, A. N., Marchenkovskaya, A. A., Chernyshenko S. V. (2008). *Kharakteristika pokazatelej nakopleniya mikroelementov v organizme amfibij iz biotopov, nakhodyashchikhsya pod vliyaniem otkhodov predpriyatij razlichnykh vidov promyshlennosti [Characteristic of Indices of Microelements Accumulation in Amphibians from Biotopes Being under Influence of Different Industrial Wastes]*. *Proceeding of the Ukrainian Herpetological Society*, (1), 47–54 (in Russian).
- Nekrasova, O. D., Gavris, G. G., & Kuybida, V. V. (2013). Changes in the northern border of the home range of the dice snake, *Natrix tessellata* (Reptilia, Colubridae), in the Dnipro basin (Ukraine). *Vestnik Zoologii*, 47(5), 475–479.
- Ostrovskaya S. S. (2014). *Toksicheskie efektyi kadmiya [Toxic Effects of Cadmium (Literature Review)]*. *Bulletin of Problems Biology and Medicine*, 3(2), 33–37. (in Russian)
- Schwabenlander, M., Buchweitz, J. P., Smith, C. E., & Wünschmann, A. (2019). Arsenic, cadmium, lead, and mercury concentrations in the livers of free-ranging common garter snakes (*Thamnophis sirtalis*) from Minnesota, USA. *Journal of Wildlife Diseases*, 55(4), 973–976.
- Sharif, R., Thomas, P., Zalewski, P., & Fenech, M. (2012). The role of zinc in genomic stability. *Mutation Research. Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 733(1), 111–121.
- Sharpilo, V. P. (1983). *Reptilii fauny SSSR kak promezhutochnyie i rezervuarnyie hozyaeva gelmintov [Reptiles of the fauna of the USSR, intermediate and reservoir hosts of helminths]*. *Parazitologiya*, 17(3), 177–183 (in Russian).
- Perfus-Barbeoch, L., Leonhardt, N., Vavasseur, A., & Forestier, C. (2002). Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. *The Plant Journal*, 32(4), 539–548.
- Timonin, A.S. (2003). *Inzhenerno-ekologicheskii spravochnik. T. 2 [Engineering and Environmental Handbook. Vol. 2]*. *Izdatelstvo N. Bochkarevoy, Kaluga* (in Russian).
- Snizhko, S.I., Shevchenko, O.G. (2011). *Istochniki postupleniya tyazhelykh metallov v atmosferu [Emission sources of heavy metals to the atmosphere]*. *Proceedings of*

- the Russian State Hydrometeorological University, 18, 35–37 (in Russian).
- Verderame, M., Scudiero, R. (2019). Health status of the lizard *Podarcis siculus* (Rafinesque-Schmaltz, 1810) subject to different anthropogenic pressures. *Comptes Rendus Biologies*, 342 (3-4), 81–89.
- Waalkes, M. P., Poirier, L. A. (1984). In vitro cadmium-DNA interactions: cooperativity of cadmium binding and competitive antagonism by calcium, magnesium, and zinc. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 75(3), 539–546.
- Wani, A. L., Ara, A., & Usmani, J. A. (2015). Lead toxicity: a review. *Interdisciplinary Toxicology*, 8(2), 55–64.