

ШЛЯХИ НАДХОДЖЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ В ДОВКІЛЛЯ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ

Р. П. Параняк, Л. П. Васильцева, Х. І. Макух

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій
імені С. З. Гжицького
Львівський національний медичний університет ім. Д. Галицького

У статті подано огляд зарубіжної літератури з проблеми забруднення навколишнього середовища сполуками кадмію і свинцю. Розглянуто питання вмісту та рухливості вказаних важких металів у ґрунтах, їх акумуляції тканинами рослин і тварин, метаболізму і токсичності.

Ключові слова: КАДМІЙ, СВИНЕЦЬ, ВМІСТ, ТОКСИЧНІСТЬ, ҐРУНТ, РОСЛИНИ, ТВАРИНИ.

Свинець і кадмій — токсичні і небезпечні для живих організмів хімічні елементи, що належать до забруднюючих речовин, моніторинг яких обов'язковий. Забруднення довкілля цими металами, досягло критично небезпечних величин, охопило всю біосферу, здійснює негативний вплив на здоров'я людини [13, 43].

Забруднення сільськогосподарських угідь важкими металами в основному відбувається за рахунок атмосферних викидів підприємств [15, 23], відходів тваринницьких ферм та внаслідок застосування мінеральних добрив і отрутохімікатів [13, 41]. Органічні добрива — гній і компост, також містять значну кількість важких металів. У результаті внесення у ґрунт органіки, в ньому зростає концентрація таких хімічних елементів як свинець, кадмій, мідь, цинк, залізо, марганець [5]. Враховуючи повільне виведення важких металів з ґрунту, при тривалому надходженні навіть відносно невеликих кількостей кадмію і свинцю, їх концентрація з часом може досягати дуже високих показників.

Значна кількість кадмію надходить у навколишнє середовище з продуктами горіння. Вміст кадмію у деревній золі коливається у межах від 2 до 30 мг/кг [3, 12], а в золі з соломи сягає 10 мг/кг [12]. Значне забруднення кадмієм атмосфери, ґрунту і води відбуваються при лісових пожежах. Оскільки зола має лужну реакцію, наявний у її складі кадмій нерозчинний у воді і погано засвоюється рослинами, проте він накопичується у ґрунті і при закисненні стає доступним для рослин [30].

Суттєву частку в забрудненні кадмієм і свинцем ґрунтів, які знаходяться вздовж автомагістралей вносять викиди автомобілів. Після припинення дії чинників, що збільшують вміст цих важких металів, їх концентрація у ґрунтах довгий час залишається високою внаслідок тривалого терміну виведення. Зокрема, у багатьох країнах, незважаючи на відмову від виробництва бензину, до складу якого входить свинець, вміст цього металу у ґрунтах вздовж доріг надалі залишається високим [43].

При оцінці ґрунтів, в основному, використовують показник загального вмісту в них важких металів, що не дає об'єктивної картини їх забруднення з агроекологічної точки зору. Коефіцієнт засвоєння кожного з хімічних елементів не є постійним, він залежить від ряду факторів: типу ґрунту, хімічних показників середовища, кліматичних умов. Для визначення ступеня забруднення ґрунту важкими металами важливо знати не лише їх вміст, а і сполуки, у складі яких вони знаходяться, а також фізико-хімічні властивості досліджуваного ґрунту.

Інтенсивність сорбції важких металів ґрунтами головним чином залежить від рН середовища, причому для кадмію і свинцю цей вплив виражений більшою мірою ніж, для інших мікроелементів, наприклад міді, значна частина якої зв'язана з органічними комплексами [37].

Таким чином, для оцінки використання наявних у ґрунті важких металів рослинами у певний часовий період, бажаним є визначення вмісту їх фракцій, доступних для рослин. Мікроелементи у ґрунтах можуть перебувати у водорозчинній формі, у складі карбонатів,

оксидів, органічних сполук та елювію. Водорозчинні форми є найбільш доступними для рослин; оксиди, карбонати і органічні сполуки доступні меншою мірою, а мікроелементи елювіальних ґрунтів не використовуються зовсім. Від співвідношення цих фракцій, яке коливається в різних ґрунтах у широких межах, а також від кислотності ґрунту, залежить інтенсивність надходження мікроелементів у тканини рослин і, в подальшому, в організм тварин і людей [9]. При поступовому зниженні рН ґрунту метали переходять у іонну форму, причому кадмій іонізується швидше ніж свинець [40].

Метали можуть адсорбуватися на поверхні ґрунтових колоїдних частинок шляхом неспецифічного зв'язування завдяки електростатичним силам, або внаслідок утворення між ними специфічних хімічних зв'язків. Ці процеси відіграють важливу роль для переміщення і використання рослинами міді, свинцю і кадмію [13, 46].

У світі проведена значна кількість досліджень з вивчення механізмів переходу кадмію і свинцю з ґрунту в рослини [8, 14, 17, 27]. Свинець засвоюється рослинами головним чином через корені. Хоча вегетативна частина рослин незначно всмоктує сполуки свинцю, вони адсорбуються на її поверхні і проявляють негативний місцевий ефект, а при споживання зеленої маси травоядними тваринами потрапляють в їх організм. На відміну від свинцю, кадмій засвоюється рослинами як через кореневу систему, так і шляхом адсорбції поверхнею вегетативної частини.

Виведення мікроелементів з агроєкосистем відбувається внаслідок збирання врожаю, вилужнювання ґрунту, вимивання, газової емісії. Видалення з ґрунтів надлишку важких металів — тривалий процес, який потребує значних матеріальних витрат. Альтернативою хімічним методам очистки ґрунту від токсичних концентрацій мікроелементів в останні роки пропонується культивування на забруднених ґрунтах рослин з підвищеною потребою у тих чи інших мікроелементах.

Показник ефективності переходу окремих важких металів у тканини рослин значно коливається залежно від їх виду [6]. Рослини здатні у великих кількостях накопичувати важкі метали можуть бути використані для біологічного очищення ґрунту [39]. Наприклад, *Thalasspi caerulescens* є ефективним гіперакумулятором цинку, вона здатна накопичувати без шкоди для себе більше 10 г цинку на 1 кг біомаси [47]. *Brassica juncea* (Індійська гірчиця) накопичує меншу концентрацію важких металів, але завдяки великій біомасі і швидкості росту також є ефективним очищувачем ґрунтів [47]. *E. splendens* — дикоростуча трава Китаю здатна у великих кількостях накопичувати мідь, внаслідок чого вона є основним видом рослинності навколо мідних копалень [48]. Інша районована у Китаї рослина *Sedum alfredii* акумулює у великих кількостях цинк [47] і кадмій [48]. При вирощуванні *Sedum alfredii* на ґрунтах з високим вмістом цинку або кадмію, їх концентрація в зеленій масі сягає 1–2 % при відсутності негативного впливу на життєдіяльність рослини [19, 48].

Зміни вмісту важких металів у ґрунтах внаслідок меліоративних заходів, коливаються в широких межах, залежно від регіону [42]. Вода екологічно чистих регіонів містить незначні кількості важких металів, переважно менше 1 мг/л для кожного з них. У густо заселених, промислових та сільськогосподарських зонах вміст важких металів у воді значно вищий. Повторне використання стічних вод без видалення солей важких металів, призводить до їх накопичення у ґрунтах [42].

Кадмій негативно впливає на ряд біохімічних процесів і фізіологічних функцій в організмі тварин [20, 24]. В організм тварин кадмій потрапляє в основному через органи травлення [28, 31], хоча в регіонах із значним забрудненням повітря його надходження через легені також може бути суттєвим [10]. Особливістю шкідливої дії кадмію є швидке його засвоєння організмом і повільне виведення, що призводить до кумуляції цього металу в тканинах. Кадмій накопичується в основному у печінці і нирках [4, 16] і має тривалий період напіввиведення (до 30 років), тобто у прикладному аспекті можна вважати, що для тварин депонування кадмію в організмі є позитивним. Токсичний ефект кадмію найбільш виражений для нирок [2] і кісткової тканини. В нирках кадмій викликає дисфункцію нефронів, що веде до пригнічення зворотнього всмоктування амінокислот, глюкози, фосфору і олігопептидів [34]. У кістковій тканині під впливом кадмію порушуються процеси кальцифікації. Кадмій викликає онкологічні захворювання [44], може бути причиною

виникнення мутацій, руйнування ланцюга ДНК, хромосомних аберацій. Кадмій впливає на трансмембранну передачу гормональних сигналів у клітинах [25, 26], репродуктивну функцію і процеси пероксидного окиснення в організмі. Він змінює активність протеїнкінази С і мітоген-протеїнкінази, порушує метаболізм циклічної АМР [11, 32, 33, 35]. Низькі дози кадмію в організмі тварин стимулюють апоптоз клітин, при збільшенні дози кадмію у клітинах починаються некротичні зміни [21].

У метаболізмі кадмію в органах і тканинах тварин важливу роль відіграють металотіонеїни — низькомолекулярні білки, в яких третина амінокислот представлена цистеїном. Вони містять значну кількість сульф-гідрильних груп, причому внаслідок відсутності внутрішньомолекулярних SH-зв'язків, ці групи перебувають у вільній формі [1, 7, 36]. Кожна молекула металотіонеїну здатна приєднати сім молекул кадмію. У тканинах тварин і людини кадмій може перебувати у складі металотіонеїнів або у вільній формі. Лише не зв'язаний з металотіонеїнами кадмій токсичний для організму. Металотіонеїни значним чином знижують токсичну дію кадмію у нирках і печінці. При отруєнні кадмієм порушується обмін кальцію в кістковій тканині, а зв'язування його з металотіонеїном попереджує ці патологічні зміни.

Тривале надходження помірних кількостей кадмію дає можливість клітинам перевести його у зв'язану форму, яка є дуже стабільною сполукою і може у невеликих кількостях розщеплюватися лише у ниркових канальцях, чим пояснюється більша чутливість нирок до дії кадмію, порівняно до інших тканин організму [4, 18, 34, 35]. У досліджах на щурах було виявлено, що при короткотерміновому згодовуванні їм великих доз кадмію ниркова недостатність спостерігається при досягненні його концентрації у клітинах від 100 до 250 мкг на грам сирової тканини. Проте при згодовуванні щурам невеликих доз кадмію протягом восьми місяців негативного впливу на функцію нирок не виявлено, хоча кінцева концентрація кадмію у клітинах нирки була приблизно такою ж [38]. При надходженні у організм значної кількості кадмію створюється дефіцит металотіонеїнів, що призводить до накопичення вільної форми металу і викликає порушення обміну речовин.

Свинець токсично діє на ряд систем організму: нервову, гемопоетичну, ендокринну, сечовидільну, репродуктивну, епітеліальну, кісткову [2, 10, 16, 20, 25, 29, 45]. Основна частина свинцю, яка надходить в організм тварин і людини (до 90%), депонується у кістковій тканині, де може акумулюватися у значних кількостях внаслідок тривалого періоду напіввиведення (5–20 років). У інших тканинах і крові обмін свинцю перебігає значно швидше, тривалість його перебування у них після надходження у організм не перевищує декількох днів.

При отруєнні свинцем пригнічується метаболізм кальцію, інтенсивність перебігу процесів дихання і окиснювального фосфорилування у мітохондріях нирок, серця, мозку. Основною ланкою взаємного впливу кальцію і свинцю в клітинах є їх конкуренція за зв'язування з вторинними меседжерами клітинних сигналів. Трансклітинні кальцієві сигнали приймаються декількома рецепторами білкової природи, серед яких кальмодулін і протеїнкіназа С мають високу спорідненість до свинцю. Високий вміст кальцію у раціоні тварин зменшує всмоктування свинцю стінкою кишечника. Свинець і кадмій знижують активність лужної і кислої фосфатаз. Свинець гальмує вихід кальцію з клітин, замінюючи його у кальцієво-натрієвій АТР транспортуючій системі [2]. Цей же механізм веде до зменшення всмоктування в кишечнику свинцю при високому вмісті кальцію у раціоні.

Як і кадмій, свинець токсично діє на нирки, зокрема в процесі реабсорбції у них. Проте при одночасному навантаженні організму обома металами їх патологічна дія на ниркові канальці суттєво знижується [2].

Свинець і кадмій виявляють виражений вплив на імунну систему. Короткочасна дія цих елементів посилює проліферацію лейкоцитів і продукцію імуноглобулінів [5]. При цьому відмічено також посилення алергічної та автоімунної функцій організму. При хронічному отруєнні, як кадмій, так і свинець пригнічують активність імунної системи, причому при одночасному навантаженні організму тварин обома металами, їх імунодепресивна дія посилюється [22].

Свинець і кадмій стимулюють пероксидні процеси в організмі тварин. Під впливом свинцю і кадмію знижується активність супероксиддисмутази, на активність каталази свинець впливає мало, а кадмій її посилює [32]. Механізми впливу свинцю і кадмію на процеси пероксидного окиснення мають певні відмінності, про що свідчить відсутність взаємного впливу елементів на коригування каталітичної функції ферментів пероксидного окиснення.

Свинець і кадмій значно знижують зв'язування гонадотропіну, лютеїнізуючого та фолікулостимулюючого гормонів з рецепторами мембрани яєчників, в результаті чого змінюється інтенсивність синтезу стероїдних гормонів [25, 33].

Останнім часом багато дослідників зосереджують увагу на з'ясуванні механізмів засвоєння рослинами важких металів з ґрунту з метою його ефективного очищення. Це питання є надзвичайно актуальним для України, оскільки значна частина земель сільськогосподарського призначення знаходиться в зонах функціонування підприємств металургійної, гірничо-видобувної промисловості. Тому питання підбору ефективних рослин-поглиначів для таких регіонів має важливе наукове і практичне значення.

R. P. Paranyak, L. P. Vasylyseva, K. Makukh

PATHWAYS OF HEAVY METALS ENTRANCE TO ENVIRONMENT AND THEIR EFFECTS ON LIVING ORGANISMS.

S u m m a r y

In the review are observed the problems of environmental contamination by cadmium and lead. The special attention gives to the contents and mobility of these heavy metals in soil, their uptake and accumulation by plants, metabolism and toxicity effects in the organism of animals.

Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies named after S. Z. Gzhytskyj

Lviv National University of Medicine named after D. Galytskyj

1. Interactions between toxic and essential trace metals in cattle from a region with low levels of pollution. / Alonso M. L., Benedito J. L., Miranda M. et al. // Arch. Environ. Contam. Toxicol. — 2002. — 42 (2). — P. 165–172.

2. Antonio G. T, Corredor L. Biochemical changes in the kidneys after perinatal intoxication with lead and/or cadmium and their antagonistic effects when coadministered // Ecotoxicol Environ Saf. — 2004. — 57 (2). — P. 184–189.

3. Aronsson K. A., Ekelund N. G. A. Biological effects of wood ash application to forest and aquatic ecosystems // J. Environ. Qual. — 2004. — 33. — P. 1595 — 1605.

4. Effect of heavy metals on, and handling by, the kidney. / Barbier O., Jacquillet G., Tauc M., Cougnon M., Poujeol P. // Nephron Physiol. — 2005. — 99 (4). — P. 105–110.

5. Heavy metal aspects of compost use. / Chaney R. L., Ryan J. A., Kukier U., Brown S. L. et al // In: Stoffella PJ, Khan BA, editors. Compost utilization in horticultural cropping systems. — Boca Raton, FL: CRC Press LLC; 2001. — P. 324–359.

6. Transfer of metals from soil to vegetables in an area near a smelter in Nanning, China. / Cui Y. L., Zhu Y. G., Zhai R. H., Chen D. Y., et al. // Environment International. — 2004. — 30. — P. 785–791.

7. Davis S. R., Cousins R. J. Metallothionein expression in animals: A physiological perspective on function // J. Nutr. — 2000. — 130. — P. 1085–1088.

8. Deng H., Ye Z. H., Wong M. H. Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China // Environmental Pollution . — 2004. — 132. — P. 29–40.

10. Fageria N. K., Baligar V. C., Clark R. B. Micronutrients in crop production // Adv Agron. — 2002. — 77. — P. 185–268.

11. Metal mixture inhalation (Cd-Pb) and its effects on the bronchiolar epithelium. An ultrastructural approach. / Fortoul T. I., Avila-Costa M. R., Espejel-Maya G., et al. // Toxicol Ind Health. — 2004. — 20 (1–5). — P. 69–75.

12. Oxidative stress induced by lead, cadmium and arsenic mixtures: 30-day, 90-day, and 180-day drinking water studies in rats: an overview. / Fowler B. A., Whittaker M. H., Lipsky M. et al. // *Biometals*. — 2004. — 17(5). — P. 567–568.
13. Speciation and mobility in straw and wood combustion fly ash. / Hansen K. H., Pedersen A. J., Ottosen L. M., Villumsen A. // *Chemosphere*. — 2001. — 45 — P. 123–128.
14. *Hea Z. L., Yanga X. E., Stoffellab P. J.* Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment // *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. — 2005. — 19. — P. 125–140.
15. *Kabata-Pendias A.* Soil–plant transfer of trace elements — an environmental issue // *Geoderma*. — 2004. — 122. — P. 143–149.
16. *Komarnicki G. J. K.* Lead and cadmium in indoor air and the urban environment // *Environmental Pollution*. — 2001. — 136. — P. 47–61.
17. Distribution of cadmium and lead in liver and kidney of some wild animals in Slovakia. / Kramarova M., Massanyi P., Slamecka J. et al. // *J. Environ. Sci. Health. A. Tox. Hazard Subst. Environ. Eng.* — 2005. — 40 (3). — P. 593–600.
18. Predicting heavy metal transfer from soil to plant: potential use of Freundlich–type functions. / Krauss M., Wilfgang W., Kobza J., Zech W. // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. — 2002. — 165. — P. 3–8.
19. *Ljubojevic M., Herak-Kramberger C. M., Brown D.* Cd-MT cause's endocytosis of brush-border transporters in rat renal proximal tubules // *Am. J. Physiol. Renal. Physiol.* — 2002. — 283. (6) — P. F1389–F1402.
20. Assessing zinc thresholds for phytotoxicity and potential dietary toxicity in selected vegetable crops. / Long X. X., Yang X. E., Ni W. Z., et al // *Commun. Soil Sci. Plant Analy.* — 2003. — 34. — P. 1421–1434.
21. Cadmium and lead accumulation in cattle in NW Spain. / Lopez A. M., Prieto M. F., Miranda M., et al. // *Vet. Hum. Toxicol.* — 2003. — 45 (3). — P. 128–130.
22. Apoptosis and necrosis: two distinct events induced by cadmium in cortical neurons in culture. / Lopez E., Figueroa S., Oset-Gasque M. J., Gonzalez M. P. // *Br. J. Pharmacol.* — 2003. — 138 (5). — P 901–911.
23. *Massadeh A. M., Al-Safi S.* Analysis of cadmium and lead: their immunosuppressive effects and distribution in various organs of mice // *Biol. Trace Elem. Res.* — 2005. — 108 (1–3). — P. 279–286.
24. Temporal and spatial variations of metal content in TSP and PM10 in Mexico City during 1996–1998. / Mugica V., Maubert M., Torres M., Munoz J., Rico E. // *Journal of Aerosol Science*. — 2002. — 33. — P. 91–102.
25. *Nam D. H., Lee D. P.* Monitoring for Pb and Cd pollution using feral pigeons in rural, urban, and industrial environments of Korea // *Sci. Total Environ.* — 2006. — 15. — 357 (1–3). — P. 288–295.
26. *Nampoothiri L. P., Gupta S.* Simultaneous effect of lead and cadmium on granulosa cells: a cellular model for ovarian toxicity // *Reprod. Toxicol.* — 2006. — 21 (2). — P. 179–185.
27. Effect of cadmium on the interaction of 17 beta-estradiol with the rainbow trout estrogen receptor. / Nesatyy V. J., Ammann A. A., Rutishauser B. V., Suter M. J. // *Environ Sci Technol.* — 2006. — 15. — 40 (4) — P. 1358–1363.
28. Heavy metal concentrations in a soil-plant-snail food chain along a terrestrial soil pollution gradient. / Notten M. J., Oosthoek A. J., Rozema J., Aerts R. // *Environ. Pollut.* — 2005. — 138 (1). — P. 178–190.
29. Cadmium in food chain and health effects in sensitive population groups. / Oskarsson A., Widell A., Olsson I. M., Grawe K. P. // *Biometals*. — 2004. — 17 (5). — P. 531–4.
30. *Ozmen O., Mor F.* Acute lead intoxication in cattle housed in an old battery factory // *Vet. Hum. Toxicol.* — 2004. — 46 (5). — P. 255–256.
32. *Perkiömäki J., Fritze H.* Does simulated acid rain increase the leaching of cadmium from wood ash to toxic levels to coniferous forest humus microbes? // *FEMS Microbiol. Ecol.* — 2002. — P. 1481.

33. *Phillips C. J., Chiy P. C., Omed H. M.* The effects of cadmium in feed, and its amelioration with zinc, on element balances in sheep // *J. Anim. Sci.* — 2004. — 82 (8). — P. 2489–2502.
34. *Pillai A., Gupta S.* Antioxidant enzyme activity and lipid peroxidation in liver of female rats co-exposed to lead and cadmium: effects of vitamin E and Mn^{2+} // *Free Radic. Res.* — 2005. — 39 (7). — P. 707–712.
35. *Priya P. N., Pillai A., Gupta S.* Effect of simultaneous exposure to lead and cadmium on gonadotropin binding and steroidogenesis on granulosa cells: an in vitro study // *Indian J. Exp. Biol.* — 2004. — 42 (2). — P. 143–148.
36. Cd-MT causes endocytosis of brush-border transporters in rat renal proximal tubules. / *Sabolic I., Ljubojevic M., Herak-Kramberger C. M., Brown D.* // *Am. J. Physiol. Renal. Physiol.* — 2002. — 283 (6). — P. F1389–F1402.
37. Kidney dysfunction and hypertension: role for cadmium, p450 and heme oxygenases? / *Satarug S., Nishijo M., Lasker J. M., Edwards R. J., Moore M. R.* // *Tohoku J. Exp. Med.* — 2006. — 208 (3). — P. 179–202.
38. *Sato M., Kondoh M.* Recent studies on metallothionein: Protection against toxicity of heavy metals and oxygen free radicals // *Tohoku J. Exp. Med.* — 2002. — 196.— P. 9–22.
39. *Sauvé S., Hendershot W., Allen H. E.* Solid–solution partitioning of metals in contaminated soils: Dependence of pH, total metal burden, and organic matter // *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* — 2000. — 34. — P. 1125–1131.
40. Relationship between toxicity and cadmium accumulation in rats given low amounts of cadmium chloride or cadmium-polluted rice for 22 months. / *Shibutani M., Mitsumori K., Satoh S., et al* // *J. Toxicol. Sci.* — 2001. — 26. — P. 337–358.
41. Copper uptake by *Elsholtzia splendens* and *Silene vulgaris* and assessment of copper phytoavailability in contaminated soils. / *Song J., Zhao F. J., Luo Y. M., McGrath S. P., Zhang Hao.* // *Environmental Pollution.* — 2004. — 128. — P. 307–315.
42. pH Dependent release of cadmium, copper, and lead from natural and sludge–amended soils. / *Sukreeyapongse O., Holm P. E., Strobel B. W., et al.* // *J. Environ. Qual.* — 2001. — 31. — P. 1901–1909.
43. *Timmer L. W., Childers C. C., Nigg H. N.* Pesticides registered for use on Florida citrus. Gainesville, FL: 2004. // *Florida Citrus Pest Management Guide, SP–43, University of Florida.* — 2004.
44. US Environmental Protection Agency. // *Effluent limitations guidelines, pretreatment standards, commercial hazardous waste combustor subcategory. Federal Register: vol. 65. N 18.* — 40 CFR Part 444, Washington DC: EPA–Water. — 2000.
45. Integrated assessment of heavy metal (Pb, Zn, Cd) highway pollution: bioaccumulation in soil, Gramineae and land snails. / *Viard B., Pihan F., Promeprat S., Pihan J. C.* // *Chemosphere.* — 2004. — 55. — P. 1349–1359.
46. *Waalkes M. P.* Cadmium carcinogenesis in review. // *J. Inorg. Biochem.* — 2000. — 79. — P. 241–244.
47. Thyroid toxicity due to subchronic exposure to a complex mixture of 16 organochlorines, lead, and cadmium. / *Wade M. G., Parent S., Finnon K. W., et al* // *Toxicol Sci.* — 2002. — 67 (2). — P. 207–218.
48. Adsorption–desorption characteristics of lead in variable charge soils. / *Yang J. Y., Yang X. E., He Z. L., et al.* // *J. Environ. Sci. Health.* — 2004. — 39(8). — P. 1083–1087.
49. *Sedum alfredii* H — a new zinc hyperaccumulating plant species native to China. / *Yang X. E., Long X. X., Ni W. Z., Fu C. X.* // *Chinese Sci. Bulletin.* — 2002. — 47. — 1003 — 1006.
50. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn–hyperaccumulating plant species (*Sedum Alfredii* Hance). / *Yang X. E., Long X. X., Ye H. B., et al.* // *Plant Soil.* — 2004. — 259. — P. 181–189.