

## ОСОБЛИВОСТІ МІГРАЦІЇ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ В СИСТЕМІ ҐРУНТ→РОСЛИНА НА ПРИКЛАДІ *LOTUS CORNICULATUS* L. (FABACEAE)

Анжела КОЛЕСНИК<sup>1</sup>, Каріна КИШКО<sup>1</sup>, Олег КОЛЕСНИК<sup>2</sup>, Тетяна ГЕДЗУР<sup>1</sup>, Антоніна СІКУРА<sup>1</sup>

*Робота присвячена дослідженням міграції важких металів (ВМ) у системі ґрунт–рослина на модельному об’єкті лядвенець рогатий (*Lotus corniculatus* L.). Головним шляхом надходження ВМ у рослини є вбирання їх коренями. Дослідні ділянки були закладені у ботанічному саду Ужгородського національного університету. Встановлена взаємозалежність вмісту ВМ у надземних частинах рослини від вмісту рухомих форм ВМ у ґрунті. Виявлено, що концентрація всіх досліджених ВМ у ґрунті наростає більше, ніж у рослині, що можна пояснити наявністю механізмів регулювання постачання токсичних речовин в організм. Авторами встановлена залежність вмісту міді, цинку та свинцю в надземних частинах лядвенцю рогатого від валового вмісту в ґрунті. Досліджено поведінку у системі ґрунт–рослина одночасно декількох елементів, що мають аналогічні властивості.*

**Ключові слова:** важкі метали, ґрунт, *Lotus corniculatus*, концентрація, валовий вміст.

<sup>1</sup>Кафедра генетики, фізіології рослин і мікробіології, Ужгородський національний університет, вул. А. Волошина, 32, Ужгород, 88000, Україна; e-mail: [angela.kolesnyk@uzhnu.edu.ua](mailto:angela.kolesnyk@uzhnu.edu.ua), [karina.kishko@uzhnu.edu.ua](mailto:karina.kishko@uzhnu.edu.ua), [tetjana.hedzur@uzhnu.edu.ua](mailto:tetjana.hedzur@uzhnu.edu.ua), [antonina.sikura@uzhnu.edu.ua](mailto:antonina.sikura@uzhnu.edu.ua)

<sup>2</sup>Кафедра ботаніки, Ужгородський національний університет, вул. А. Волошина, 32, Ужгород, 88000, Україна; e-mail: [oleg.kolesnyk@uzhnu.edu.ua](mailto:oleg.kolesnyk@uzhnu.edu.ua)

**Features of hard metal migration in the soil→plant system on the example of *Lotus corniculatus* L. (Fabaceae). Kolesnyk A.<sup>1</sup>, Kyshko K.<sup>1</sup>, Kolesnyk O.<sup>2</sup>, Hedzur T.<sup>1</sup>, Sikura A.<sup>1</sup>**

*The paper is devoted to studies of the migration of heavy metals (HM) in the soil–plant system on the model object *Lotus corniculatus* L. The main way of transfer of HM to plants is absorption by their roots. Experimental plots were established in the botanical garden of the Uzhhorod National University. The interdependence of the content of HM in the aerial parts of the plant with the content of mobile forms of HM in the soil was established. It was found that the concentration of all investigated HM in the soil increases more strongly than in the plant, which can be explained by the presence of mechanisms for regulating the entry of toxic substances into the body. The authors established the dependence of the content of copper, zinc and lead in the above-ground parts of the hornwort on the gross content in the soil. The behavior of several elements with similar properties in the soil–plant system was studied simultaneously.*

**Key words:** heavy metals, soil, *Lotus corniculatus*, concentration, gross content.

<sup>1</sup>Department of Genetics, Plant Physiology and Microbiology, Uzhhorod National University, 32, A. Voloshyna str., Uzhhorod, 88000, Ukraine; e-mail: [angela.kolesnyk@uzhnu.edu.ua](mailto:angela.kolesnyk@uzhnu.edu.ua), [karina.kishko@uzhnu.edu.ua](mailto:karina.kishko@uzhnu.edu.ua), [tetjana.hedzur@uzhnu.edu.ua](mailto:tetjana.hedzur@uzhnu.edu.ua), [antonina.sikura@uzhnu.edu.ua](mailto:antonina.sikura@uzhnu.edu.ua)

<sup>2</sup>Department of Botany, Uzhhorod National University, 32, A. Voloshyna str., Uzhhorod, 88000, Ukraine; e-mail: [oleg.kolesnyk@uzhnu.edu.ua](mailto:oleg.kolesnyk@uzhnu.edu.ua)

### Вступ

Внаслідок індустріального прогресу невинно зростає емісія важких металів (ВМ) та інших потенційно токсичних органічних і неорганічних сполук у біосферу, що зумовлює часто катастрофічне збільшення їх концентрації в природних екосистемах. Багато цих сполук є настільки токсичними для живих організмів, що навіть незначні концентрації призводять до тотального знищення основних представників місцевої біоти.

Крім того, проникнення отруйних сполук у людський організм через «трофічні ланцюги» зумовлює серйозні порушення здоров’я (Fateiev 1999, Tamás 2002, Charlygin 2018).

Надходження поллютантів відбувається часто по складній системі: ґрунт→рослина→людина, ґрунт→рослина→тварина→людина, ґрунт→вода→людина, ґрунт→повітря→людина, ґрунт→водойма→мешканці водойм→людина (Kozlovskyi et al. 2005; Kolesznik, Kolesznik A. 2007; Kolesnyk et

al. 2007; Kolesnyk, Kolesnyk 2008; Kramer 2010; Macedo-Miranda et al. 2016; Chaplygin et al. 2018).

Важливе положення ґрунту в біогеохімічних циклах і в трофічних ланцюгах диктує необхідність контролю за його станом, зокрема, вмістом важких металів і ряду інших хімічних елементів. Важкі метали впливають на ферментативну активність ґрунтів. Іони металів інгібують ферментативні реакції, утворюючи комплекс із субстратом шляхом сполучення з активною групою ферментів або шляхом реакції з комплексом фермент-субстрат (Stefurak 1999).

Головним шляхом надходження ВМ у рослини є всмоктування їх коренями. Є різні механізми міграції поживних речовин у кореневу систему із ґрунту: кореневий перехват, масовий потік, дифузія. Залежно від концентрації іонів металів у ґрунті співвідношення і відносна роль кожного механізму може змінюватись (Antoniak et al. 2015). На першому етапі поглинання, крім дифузії, велике значення надається обмінній адсорбції іонів між активною поверхнею кореневої системи і ґрунтом. Кореневий перехват є суттєвим лише для тих сполук, які у середовищі знаходяться в надлишку порівняно з потребами рослин (Hryshko 2015). У такому випадку в рослинних організмах спрацьовують механізми неспецифічної стрес-адаптації. Вони обмежують проникнення поллютантів у надземні органи та включення їх у метаболічні реакції рослин (Madzhd 2009). Кінцевий характер поглинання та акумуляції ВМ рослинами залежить від багатьох чинників, головними з яких є рівень забруднення, селективна здатність рослин, агрохімічні особливості ґрунту тощо (Antoniak et al. 2015).

Все це зумовлює необхідність проведення глибоких теоретичних досліджень, спрямованих на з'ясування показників трансформації і біоконверсії токсичних сполук біологічними системами різних рівнів організації з метою розв'язання екологічних проблем шляхом розробки відповідних технологій знешкодження токсичних речовин і окремих хімічних елементів через регуляцію їх міграції організмами.

#### Матеріал та методи

Як модельна рослина був використаний *Lotus corniculatus* L. (Fabaceae) – лядвенець рогатий. Здебільшого гола або рідкоопушена рослина з чисельними сланками та висхідними пагонами 15–40 см заввишки, нижні листки пагона здебільшого видовжено яйцеподібні, загострені, 7–10 мм завдовжки та 4–6 мм завширшки; три верхівкові листки обернено яйцеподібні, на верхівці заок-

руглені, 10–15 мм завдовжки, 6–10 мм завширшки; середні листки ланцетні, загострені. Квітконоси міцні, довгі, завдовжки 5–10 см, суцвіття – 5-квіткові зонтики. Квітки завдовжки 10–15 мм, жовті, іноді з оранжевим прапорцем; чашечка заввишки 5–6 мм, гола або тонковолосиста, із зубцями, що рівні за розміром трубочці; прапорець 10–15 мм завдовжки, з широкоокруглим відгином, що швидко переходить у клиноподібний нігтик; крила 10 мм завдовжки, майже рівної довжини з човником, із обернено яйцеподібною пластинкою, що в чотири рази довша за нігтик; човник зігнутий під прямим кутом. Боби лінійні, циліндричні, 15–25 мм завдовжки, 2–3 мм завширшки; цвіте із травня по листопад (Nikolaychuk 2002).

З метою дослідження міграції важких металів (ВМ) у системі ґрунт→рослина та їх дії на морфологічні ознаки *L. corniculatus* при надмасивних концентраціях плумбуму, купруму та цинку, згідно з методикою Кадар (1997), нами були закладені дослідні ділянки у ботанічному саду Ужгородського національного університету. Для цього викопували траншеї розміром 1x2 м і глибиною 0,5 м. Знизу у траншеї укладали листовий шифер та гідроізолювали щільною поліетиленовою плівкою. Це робилося з метою захисту від кротів та запобігання вимивання солей важких металів з дослідних ділянок у ґрунтові води. Вийнятий ґрунт перемішували, розпушували, звільняли від каміння і повертали назад у підготовлені траншеї. На підготовлені ділянки висівали рівну кількість насіння лядвенцю рогатого. Після вносили водні розчини солей  $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  і  $\text{PbSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . Ділянки знаходилися у напівзатіненних місцях. Ґрунт намулистий алювіальний.

Під час відбору варіантів експерименту користувалися оціночними таблицями максимально допустимих рівнів вмісту ВМ у ґрунтах і рослинній продукції (табл. 1) (Fateiev 1999; Fateiev 2003).

Схема вегетаційного дослідження передбачала внесення ВМ у ґрунт дозами:

- Pb – 1, 5, 10 МДК (валового вмісту), що в перерахунку на елемент становило 30, 150 та 300, мг/кг ґрунту;
- Cu – 1, 5, 10 МДК, що в перерахунку на елемент становило 100, 500 та 1000 мг/кг ґрунту;
- Zn – 1, 5, 10 МДК, що в перерахунку на елемент становило 300, 1500, та 3000 мг/кг ґрунту.

Дослід ставили в трикратній повторюваності, контролем служили ділянки без внесення ВМ. Полив здійснювали у міру потреби відстояною дощовою водою.

Таблиця 1. Максимально допустимі рівні вмісту ВМ у ґрунтах і рослинній продукції

Table 1. Maximum permissible levels of HM content in soils and plant products

Метал	МДК, мг/кг	МДК валового вмісту у рослинній продукції, мг/кг сухої речовини
Цинк	300	≤ 10
Купрум	100	≤ 0,5
Плюмбум	32	≤ 0,3

Вміст металів визначали атомно-абсорбційним методом на спектрофотометрі С115М1 у пропан-бутановому полум'ї з використанням дейтерієвого коректора неселективної абсорбції. Визначення проводили у трьох повторностях. Вміст ВМ у тканинах рослин визначали у середній пробі, яку утворювали, залежно від маси, із 10–15 пагонів, відібраних рендомним методом. Проби повітряно сухого рослинного матеріалу озолювали за температури 450 °С, точно дотримуючись технології спалювання з метою попередження втрат елементів (Smilde 1981, Kozlovsky 2002).

#### Результати

Результати дослідження вмісту важких металів у пагонах лядвенцю рогатого наведені у таблиці 2.

Дослідження характеру залежності вмісту всіх досліджуваних ВМ у рослині від їх концентрації в ґрунті виявили високий рівень кореляції між цими параметрами. Для купруму та цинку можна допустити, що в межах досліджуваних концентрацій спостерігається нелінійний характер залежності, тоді як для плюмбуму чітко простежується лінійний характер взаємозв'язку між ознаками (рис. 1).

Однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA) вказує на те, що концентрація всіх досліджених ВМ у ґрунті наростає сильніше, ніж у рослині,

що можна пояснити наявністю механізмів у рослині, які намагаються регулювати надходження токсичних речовин (рис. 2, 4, 6). На рисунках 3 та 5 чітко видно, що вміст купруму та цинку в рослині досягає певного насичення і надалі піднімається повільніше. Для плюмбуму (рис. 7) помітно, що динаміка накопичення в рослині має майже лінійний характер, але також наростає повільніше ніж у ґрунті.

#### Обговорення

Дослідження місту ВМ в рослинній сировині, залежно від валового в ґрунті, не завжди відбивають дійсну міграційну рухомість у ланцюгу ґрунт→рослина. Це насамперед пов'язане з наявністю різних форм елементів, що мають різну силу зв'язку та по-різному поглинаються рослинами. Для більшої точності оцінок використовують коефіцієнти нагромадження залежно від рухомої форми елементів (Denchilya-Sakal et al. 2012). Але треба мати на увазі, що внаслідок дії ґрунтових мікроорганізмів, процесів розкладання гумусу та рослинних решток, кислотності атмосферних опадів, вилуговування тощо баланс між розчинною і нерозчинною формами елементів може суттєво змінюватися як у різні роки, так і протягом одного вегетаційного сезону. Врахування всіх факторів значно ускладнює проведення експерименту, тому використання валового

Таблиця 2. Валовий вміст ВМ у ґрунті дослідних ділянок та надземних частинах лядвенцю рогатого

Table 2. The gross content of HM in the soil of experimental plots and the above-ground parts of the hornwort

Досліджуваний метал	Варіанти дослідів, МДК	Валовий вміст у ґрунті, мг/кг	Валовий вміст у рослині, мг/кг
Cu	Контроль	17,1 ± 0,6	8,5 ± 0,3
	1	117,0 ± 2,6	45,4 ± 1,9
	5	516,3 ± 1,5	65,3 ± 2,1
	10	1017,3 ± 2,5	70,6 ± 0,65
Zn	Контроль	54,0 ± 2,7	32,1 ± 4,2
	1	357,8 ± 3,6	156,1 ± 8,4
	5	1558,7 ± 9,8	238,4 ± 3,1
	10	3053,8 ± 3,7	306,6 ± 8,5
Pb	Контроль	15,0 ± 1,8	3,0 ± 0,5
	1	44,1 ± 1,8	8,9 ± 0,4
	5	161,7 ± 1,1	27,1 ± 3,5
	10	315,0 ± 3,1	45,1 ± 1,8

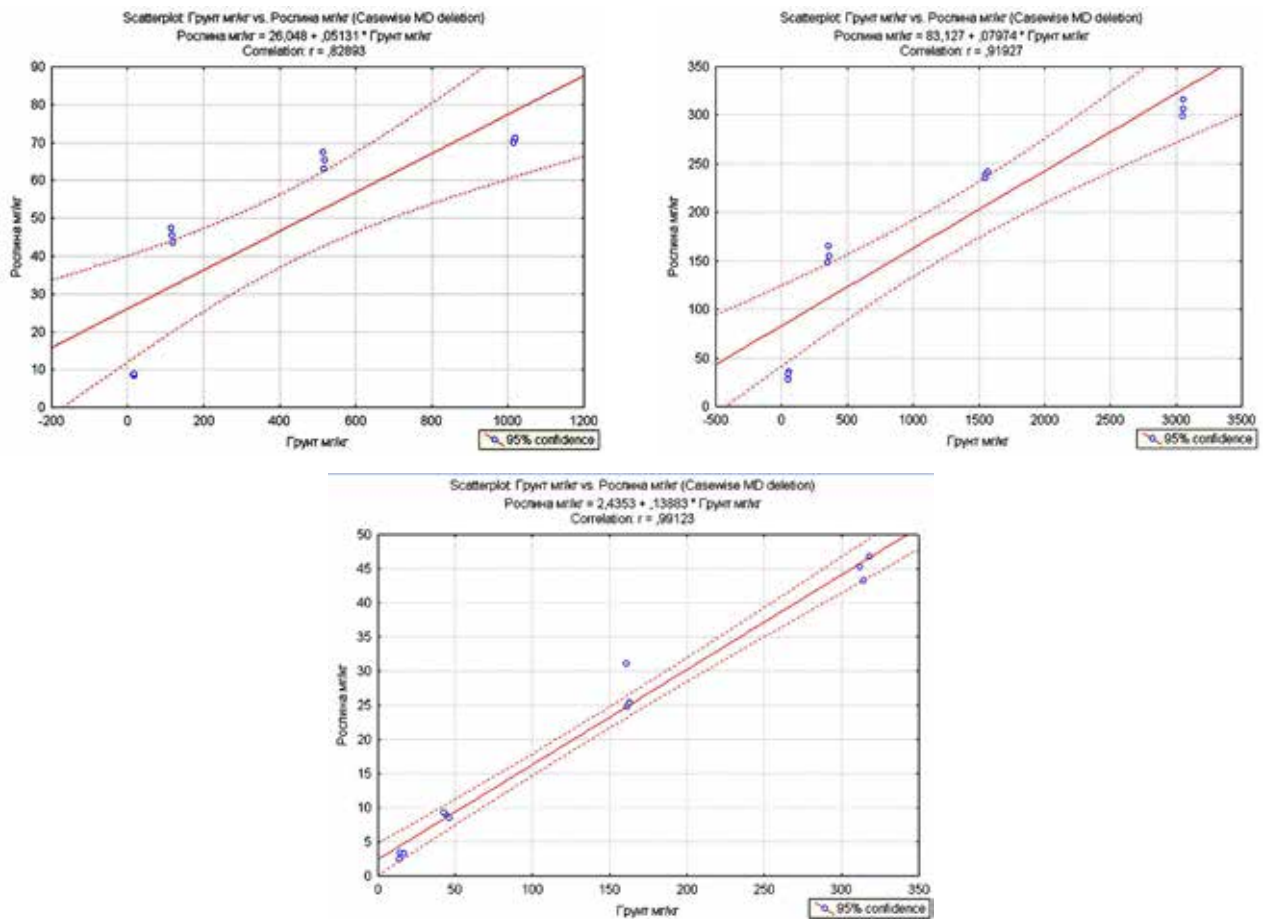


Рис. 1. Діаграми розсіювання залежності вмісту купруму (а), цинку (б) та свинцю (в) в надземних частинах лядвенцю рогатого від валового вмісту в ґрунті

Fig. 1. Scatter diagram of the dependence of the content of copper (a), zinc (b) and lead (c) in the above-ground parts of the hornwort from the gross content in the soil

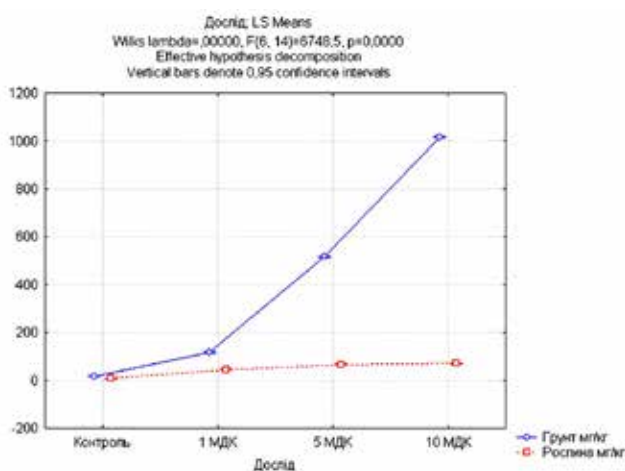


Рис. 2. Граф однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) валового вмісту купруму в ґрунті та рослині

Fig. 2. Graph of one-way analysis of variance (ANOVA) gross copper content in soil and plant

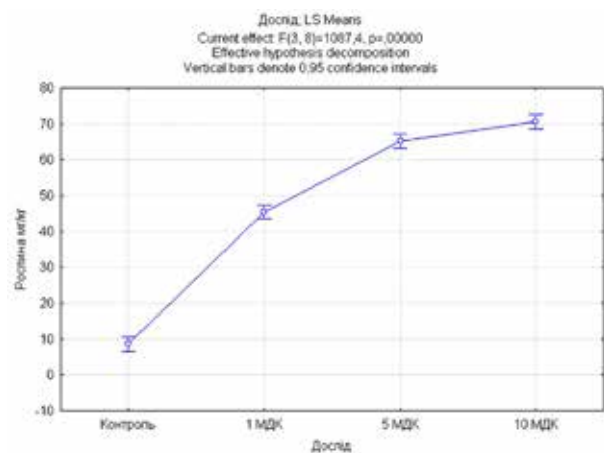


Рис. 3. Граф однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) валового вмісту купруму в рослині залежно від варіанту дослідження

Fig. 3. Graph of univariate analysis of variance (ANOVA) of the total copper content in the plant depending on the variant of the experiment

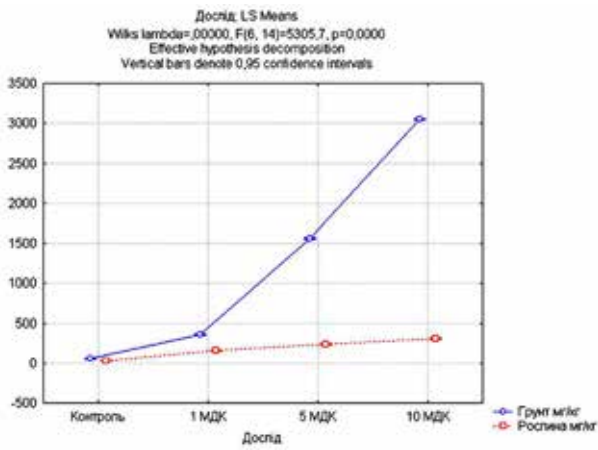


Рис. 4. Граф однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) валового вмісту цинку в ґрунті та рослині  
 Fig. 4. One-factor analysis (ANOVA) graph of gross zinc content in soil and plant

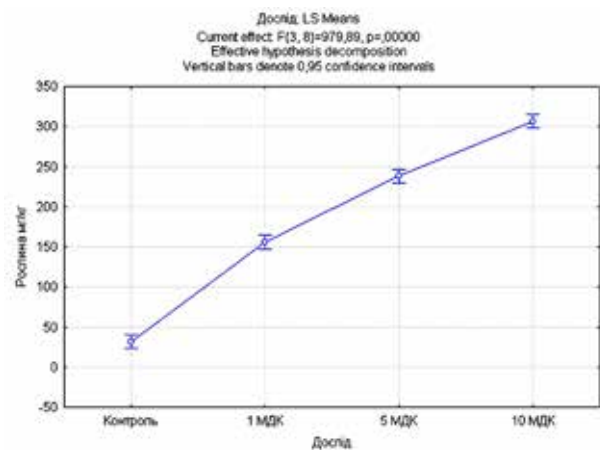


Рис. 5. Граф однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) валового вмісту цинку в рослині залежно від варіанту досліджу  
 Fig. 5. Graph of univariate analysis of variance (ANOVA) of gross zinc content in the plant depending on the variant of the experiment

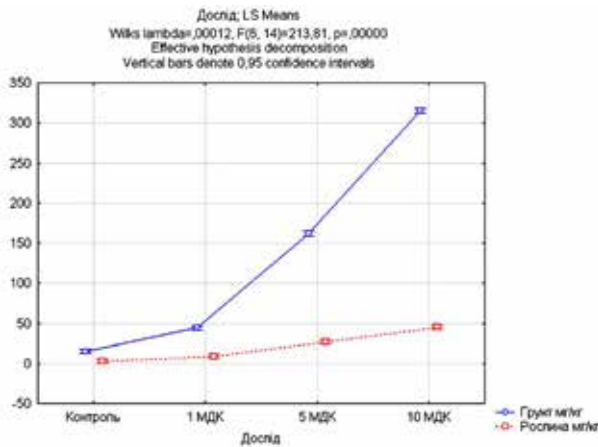


Рис. 6. Граф однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) валового вмісту плумбуму в ґрунті та рослині  
 Fig. 6. Graph of one-way analysis of variance (ANOVA) gross lead content in soil and plants

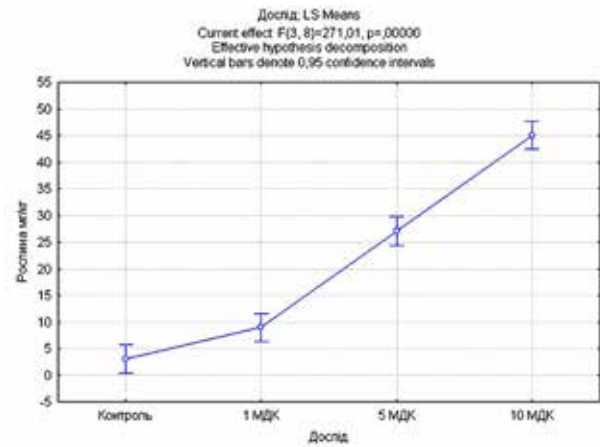


Рис. 7. Граф однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) валового вмісту плумбуму в рослині залежно від варіанту досліджу  
 Fig. 7. Graph of univariate analysis of variance (ANOVA) of the gross content of lead in the plant depending on the variant of the experiment

вого вмісту може служити для оцінки загальної тенденції цих процесів.

Дослідження поведінки у системі ґрунт→рослина одночасно декількох елементів, що мають аналогічні властивості, дозволило виявити як загальні закономірності, так і особливості поглинання цих елементів бобовою рослиною лядвенцем рогатим. Спорідненість поведінки цих елементів у різних ланцюгах міграції дає змогу виявити загальні закономірності їх переходу з однієї ланки трофічного ланцюга в іншу. Зі збільшенням концентрації елементів у ґрунті

їх концентрація в рослинах також збільшується, але до певної межі. При малих концентраціях ВМ у ґрунті їх вміст у рослинах зростає майже лінійно. Але наближення до границі токсичності змінює характер накопичення ВМ, а перевищення цього порогу поступово гальмує надходження елементів у рослину.

#### Висновок

Проведені на сьогодні дослідження дозволяють зробити висновок про достовірну взаємозалежність вмісту ВМ у надземних частинах *L. corniculatus* від вмісту рухомих форм

ВМ у ґрунті. Також у разі досягнення границі токсичності змінюється характер накопичення

ВМ, перевищення порогу гальмує надходження в рослину.

- ANTONIAK, H.L., MAMCHUR, Z.I., PERSHYN, O.I. BUBYS, O.E., KORDOSH, T.V. (2015) Biologichna dostupnist metaliv ta yikh akumulatsiia v tkanynakh roslin. *Visnyk problem biologii i medytsyny*, 3(2), 11–16 (in Ukrainian).
- CHAPLYGIN, V., MINKINA, T., MANDZHIEVA, S., BURACHEVSKAYA, M., POLUEKTOV, E., ANTONENKO, E., KUMACHEVA, V. (2018) The effect of technogenic emissions on the heavy metals accumulation by herbaceous plants. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(3), 124–128 (in Ukrainian).
- DENCHILIA-SAKAL, H.M., NIKOLAYCHUK, V.I., KOLESNYK, A.V., VAKERYCH, M.M., TKACH, O.P. (2012) Osoblyvosti akumulatsiy vazhkykh metaliv v roslinakh *Trifolium pratense* L. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Seriya Biologiya*, 33, 189–191 (in Ukrainian).
- FATEIEV, A.I. (2003) *Fonovyi vmist mikroelementiv u gruntakh Ukrainy*. Kharkiv, 117 (in Ukrainian).
- FATEIEV, A.I., MIROSHNYCHENKO, M.M. (1999) Zabrudnennia gruntiv vazhkymy metalamy yak faktor yikh dehradatsii. *Visnyk KhDAU*, 1, 206–209 (in Ukrainian).
- HRYSHKO, V.M., ZUBROVSKA, O.M. (2015) Nakopychennia vazhkykh metaliv ta perebih vilnoradykalnykh reaktsii v asimiliatsiinykh orhanakh derevnykh roslin v umovakh zabrudnennia. *Fiziologiya rastenii i hetetika*, 47(1), 47–57 (in Ukrainian).
- KADAR, I. (1997) *A növény táplálás alapelvei és módszerei*. Magyar Tudományos Akadémia Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézete, Budapest, 210 (in Hungarian).
- KOLESNYK, O.B., KOLESNYK, A.V. (2008) Kharakterystyka flory Verkhnoho Potyssia ta dynamichni tendentsii yii transformatsii vnaslidok antropohennoho vplyvu. In: *Zabrudniuvachi ta yikh vplyvy na ekolohichno vrazlyvi ekosystemy Verkhnoho Potyssia*. Nyiregyháza, 103–146 (in Ukrainian).
- KOLESNYK, O.B., KOLESNYK, A.V., KOZLOVSKYI, V., BOIKO, N.V., BOLASHI, Sh. (2007) Vychennia akumulatsii vazhkykh metaliv vyshchymy roslinamy v zalezhnosti vid zhyttievoi formy v umovakh polielementnogo zabrudnennia zaplavy r. Tysa v Ukraini ta Uhorshchyni. *Promyslova botanika: stan ta perspektyvy rozvytku. Materialy V mizhnarodnoi naukovoï konferentsii*. Donetsk, 2007, September, 24–26, 211–214 (in Ukrainian).
- KOLESZNIK, O., KOLESZNIK, A.A (2007) Felső-Tisza-vidék botanikai jellemzése. In: *Szennyeződések, szennyezők, natások a Felső-Tisza-vidék. Ökológiailag érzékeny területein*. Nyiregyháza, 53–98 (in Hungarian).
- KOZLOVSKYI, V.I. (2002) *Vazhki metaly v ekosystemakh vysotnoho profilu Chornohory (Ukrainski Karpaty)*. Dysertatsiia kandydata biologichnykh nauk: 03.00.16, 148 (in Ukrainian).
- KOZLOVSKYI, V., ROMANIUK, N., TEREK, O., CHONKA, I., KOLESNYK, O., BOLASHI, Sh., BOIKO, N. (2005) Vazhki metaly u gruntakh ta roslinakh zaplavy riky Tysa. *Visnyk Lvivskoho universytetu, Seriya biologichna*, 40, 35–50 (in Ukrainian).
- KRAMER, U. (2010) Metal hyperaccumulation in plants. *Annual Review Plant Biology*, 61, 517–534.
- MACEDO-MIRANDA, G., AVILA-PÉREZ, P., GIL-VARGAS, P. ZARAZÚA, G., SÁNCHEZ-MEZA, J.C., ZEPEDA-GÓMEZ, C., TEJEDA, S. (2016) Accumulation of heavy metals in mosses: a biomonitoring study. *Springerplus*, 5(1), 715.
- MADZHD, S.M. (2009) Akumulatsiia vazhkykh metaliv u roslinnykh asotsiatsiakh na terytoriiakh, prylyhlykh do aviaremontnykh ta ekspluatatsiinykh pidpriemstv [Accumulation of heavy metals in plant associations in the territories adjacent to aircraft repair and maintenance enterprises], *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia*, 3, 76–82 (in Ukrainian).
- NIKOLAICHUK, V.I. (2002) *Liadvenets (Lotus L.): biologiya, hetetyka, ekolohiya*. Uzhhorod, 208 (in Ukrainian).
- SMILDE, K.W. (1981) Heavy metal accumulation in crops grown on sewage sludge amended with metal salts. *Plant and Soil*, 63, 3–14.
- STEFURAK, V.P. (1999) Zmina deiakykh pokaznykiv fermentatyvnoi aktyvnosti hruntu pid vplyvom tekhnohennoho navantazhennia. *Naukovi zapysky Ternopilskoho peduniversytetu. Seriya Biologiya*, 1(4), 84–90 (in Ukrainian).
- TAMÁS, J. (2002) *Talajremediáció*. Debreceni Egyetem Agrártudományi Centrum, Debrecen: Mezőgazdaságtudományi Kar, Debrecen, 154 (in Hungarian).