

УДК 504.53.054; 504.73.054; 631.41; 631.811

**МАКРОЕЛЕМЕНТИ РОСЛИН ЗА ВПЛИВУ НАДЛИШКУ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ  
У СИСТЕМІ ҐРУНТ – РОСЛИНА****В. Самохвалова**

ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського»  
вул. Чайковського, 4, Харків 61024, Україна  
e-mail: v.samokhvalova@mail.ru

За умов проведення мікропольових дослідів на чорноземі опідзоленому Харківської області та чорноземі звичайному Донецької області досліджено вплив забруднення ґрунту важкими металами на морфологічні показники корневих систем рослин, макроелементний склад рослинної системи. Встановлено негативний вплив різних рівнів забруднення ґрунту Cd, Pb, Cr та Ni у діапазоні перевищення фонових рівнів їх вмісту у ґрунті в 3–5–10–15 разів на функцію поглинання корневих систем *Pisum sativum* і *Avena sativa*. Виявлено порушення оптимальних умов живлення за розбалансування складу, кількості та співвідношення макроелементів і забруднювачів у системі ґрунт – рослина, впливу імпаکتного та хронічного поліелементного забруднення, антагонізму катіонів важких металів і макроелементів. Доведено, що характер накопичення макроелементів у рослинах залежить від рівня забруднення ґрунту, типу культури та виду фітотоксиканта за встановлення зниження ефективності туків і з використанням <sup>15</sup>N та методи стабільної індикації.

**Ключові слова:** *Sorghum sudanense*, *Fagopyrum sagittatum*, *Pisum sativum*, *Avena sativa*, макроелементи, забруднення, важкі метали, система ґрунт–рослина, стабільна індикація <sup>15</sup>N.

Вивчення процесів надходження та накопичення макроелементів і металів – токсикантів у системі ґрунт–рослина є досить складним питанням. Беручи до уваги відсутність методології визначення надлишку та нестачі мікроелементів (МЕ) у системі ґрунт – рослина, слід зосередити увагу на питанні її створення. Така методологія слугуватиме базою для вивчення різних за механізмами процесів у системі, яка має біокосну та біологічну складові, а також для вивчення якісної та кількісної оцінки її стану. Окрім того, висока варіабельність вмісту МЕ у ґрунтах і рослинах значно ускладнює дослідження накопичення елементів у системі, яке характеризується значним діапазоном концентрацій, і подекуди унеможливує узагальнення та виявлення існуючих закономірностей за їх нестачі та надлишку.

У раніше проведених нами дослідженнях встановлено особливості динаміки накопичення, трансформації рухомих форм важких металів (ВМ) у ґрунтовій системі [13, 20, 21], вивчено вплив ВМ на вміст хімічних елементів у органічній речовині ґрунту, встановлено збільшення її рухомості за впливу константної дії джерел аеротехногенних викидів ВМ [22].

Питання впливу техногенних забруднень ґрунтів на доступність для рослин макроелементів у літературних джерелах висвітлене недостатньо. Мало вивчені процеси їх міграції і трансформації, динаміки надходження в рослини N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O за впливу різних рівнів забруднення ґрунту і рослин ВМ. Це пояснюється тим, що рівень накопичення ВМ у рослинній продукції не всі дослідники вважають головним показником погір-

шення їх якості. Питання надходження у рослини N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Ca із забрудненого ґрунту дослідниками трактується по-різному. Так, встановлено [7], що високий вміст у рослинах Pb змінює вміст N, P, Ca, а за надлишку Cd змінюється вміст K, Mn, Cu. Результати досліджень [6] показали різке зменшення кількості P, Ca, Mg при надлишку в ґрунті Zn та Pb. Існує і протилежна точка зору: при збільшенні у ґрунті вмісту Cd і Pb рівень забезпеченості рослинної продукції P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ca, K<sub>2</sub>O не змінюється [1].

Відомо, що високі концентрації ВМ (Cd, Pb, Cr і ін.) впливають на синтез і функції багатьох біологічно активних сполук (ферментів, вітамінів, гормонів), біохімічні показники ґрунту і рослин [14, 16-18].

Пряма дія металів-токсикантів у рослинних клітинах обумовлена як блокуванням реакцій за участю ферментів унаслідок заміщення первинного металу, так і коагуляцією білків [8, 16–19, 23], що супроводжується переходом макро- та МЕ у недоступний для рослин стан [8], сприяє зниженню продуктивності рослин [12].

За урахування теоретичного і практичного аспектів проблеми якості рослинної продукції, недостатньої вивченості характеру взаємодії ВМ з окремими макроелементами, відсутності інформації щодо зміни мінерального складу рослин, що вирощуються за умов різного характеру забруднення (моно- та поліелементний, імпактний, перманентний, сталий) та спектру дії забруднювачів неорганічного походження в умовах аеротехногенних викидів актуалізовано необхідність вивчення цих процесів.

Дослідження протягом перших трьох років проведено в мікропольовому досліді (МПД №1) на чорноземі опідзоленому важкосуглинковому дослідного господарства «Комунар» Харківського р-ну Харківської обл., що має таку характеристику: гумус – 3,2%, рН<sub>вод</sub> – 7,0; рН<sub>КСІ</sub> – 5,2, ємність поглинання – 23,5 мекв/100 г ґрунту, вміст фізичної глини – 50,8%.

У МПД №1 моделювалися різні рівні поліелементного імпактного забруднення ґрунту ВМ шляхом їх внесення у вигляді легкорозчинних солей Cd, Pb, Ni, Cr на фоні застосування туків (N<sub>60</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>). Азотні добрива (NH<sub>4</sub><sup>15</sup>NO<sub>3</sub>) було збагачено стабільним ізотопом <sup>15</sup>N. Ступінь збагачення нітрату амонію азотом становив 50,7 ат. %. Необхідний обсяг робіт проведено згідно з [11].

Кадмій вносили з розрахунку його вмісту в орному шарі ґрунту 3, 5, 10 і 15 мг/кг, свинець – 30, 50, 100 і 150 мг/кг, нікель – 75, 125, 250 і 375 мг/кг, хром – 156, 260, 520 і 780 мг/кг ґрунту. Така кількість металів відповідала перевищенню місцевого кларку цих металів для чорноземів Харківської обл. у 3, 5, 10 і 15 разів. ВМ вносили у перший рік досліджень. Повторність у досліді трикратна. Дослідження проводили в посудинах без дна 400x400x200 мм, які містили 18 кг ґрунту. Тестові культури – суданська трава (*Sorghum sudanense*), гречка (*Fagopyrum sagittatum*), горох (*Pisum sativum*). Схему досліду представлено в табл. 1.

Визначання морфологічних особливостей кореневих систем тест-рослин проводили за [9, 15] також і в МПД №2 на чорноземі звичайному важкосуглинковому в 1 км від умовного центру викидів в південно-західному напрямку від заводу «Укрцинк» (м. Костянтинівка Донецької обл.): гумус – 5,3%; рН<sub>КСІ</sub> – 6,5; Ca<sup>2+</sup><sub>обм.</sub> – 34,2 мекв/100 г ґрунту; N<sub>вал</sub> – 0,27%; P<sub>2</sub>O<sub>5вал</sub> – 0,13%; K<sub>2</sub>O<sub>вал</sub> – 2,3%; N за Тюрніним – 5,89 мг/100 г ґрунту, а P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> і K<sub>2</sub>O за Чіриковим – 9,6 і 14,6 мг/100 г ґрунту.

Вміст ВМ у чорноземі звичайному в 1 н HCl становив, мг/кг: Zn – 1250; Cd – 46,5; Ni – 15; Fe – 685; Co – 5,5; Mn – 800; Pb – 2100; Cu – 275; Cr – 14; в ацетатно-амонійному буферному розчині з рН 4,8 відповідно: 625; 6,3; 3, 5; Co – за межею визначення, 69; 850; 30; 2,5 мг/кг ґрунту.

Ґрунт контрольного варіанту було відібрано у 12 км від джерела забруднення з вмістом ВМ в 1 н НСІ, мг/кг: Zn – 22,5; Cd – 0,5; Ni – 15; Fe – 525; Co – 6,5; Mn – 270; Pb – 17; Cu – 5,7; Cr – 10, у ацетатно-амонійному буферному розчині з рН 4,8 відповідно: 1,6; 0,4; 0,1; Co – за межею визначення; 2,5; 9; 4,5; 0,5; 5 мг/кг ґрунту. Для техногенно забрудненого ґрунту сумарний показник забруднення ( $Z_c$ ) ґрунту ВМ становив  $Z_{C(1nHCl)}=643(8)$ ,  $Z_{C(буф.р-н)}=2478,5(6)$ , що відповідає надзвичайно небезпечному рівню забруднення. Тест-культура – овес (*Avena sativa*).

Вміст макроелементів у рослинних зразках визначали в фіксованому матеріалі, що був підданий озоленню за ГОСТ 26929-94 [5], з подальшим визначенням за методом Гінзбурга-Щеглової з подальшим використанням фотометричного методу,  $^{15}N$  – на мас-спектрометрі *МІІ-1201Э*. Відбір рослинних зразків проводили протягом вегетаційного періоду, з подальшим визначенням вмісту ВМ у тест-рослинах (після їх озолення за  $t=500^\circ C$ ) за використання методу атомно-абсорбційної спектrophотометрії згідно з [10].

У процесі мінерального живлення рослин вагоме значення належить кореневій системі. Відомо, що форма кореневої системи не є постійною біологічною особливістю рослин і залежить від екологічних умов місця існування. Отже, за умов поліелементного забруднення ґрунту (чорнозем опідзолений, чорнозем звичайний) ВМ встановлено негативний вплив різних рівнів забруднення ґрунту Cd, Pb, Cr та Ni (за перевищення фонових рівнів його вмісту у ґрунті в 10–15 разів) на розвиток, зниження накопичення кореневої маси, зменшення загальної поглинальної поверхні, отже, і на функцію поглинання кореневих систем гороху та вівса. Як наслідок негативного впливу поліелементного забруднення ВМ на розвиток кореневої системи рослин було встановлено порушення процесів поглинання окремих елементів мінерального живлення. Надлишок ВМ діє як бар'єр на шляху кореневої системи і є чинником, що обмежує її ріст і розвиток (рис. 1–2).

Визначення морфологічних характеристик кореневої системи рослин, що розвивається в умовах забруднення, має практичне і теоретичне значення, оскільки є індикатором стану ґрунтової системи, процесів, що відбуваються між кореневою системою рослин і твердою фазою ґрунту. На підставі таких досліджень розроблено новий спосіб вирішення проблеми діагностування й оцінки забруднення ВМ у системі ґрунт – рослина [6].

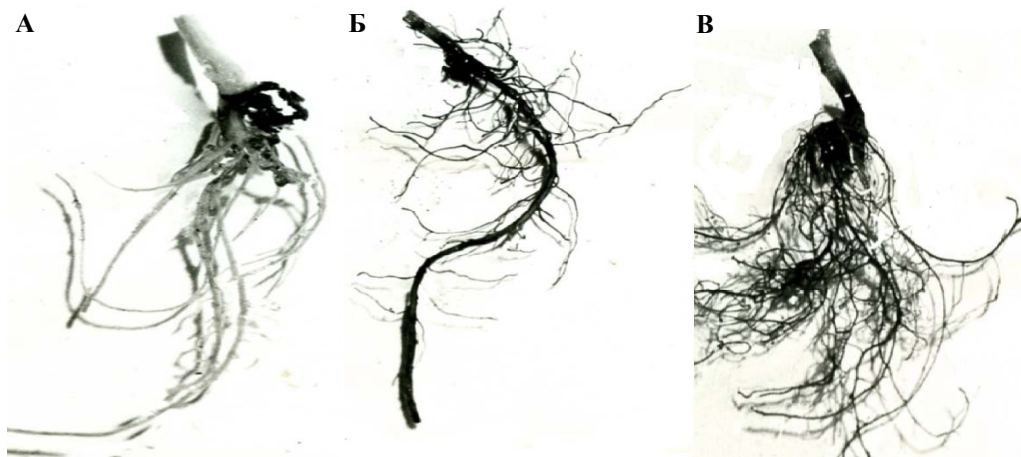


Рис. 1. Вплив поліелементного забруднення чорнозему опідзоленого ВМ на стан кореневої системи гороху (*Pisum sativum*): А – контроль; Б – забруднення ґрунту ВМ з переважанням Cd та Pb; В – забруднення ґрунту ВМ з переважанням Ni.

Обмінні катіони ґрунту, які визначають його властивості, безпосередньо впливають на рослини. Поглинання окремих макроелементів (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Ca, Mg) тісно пов'язане з їх концентрацією у ґрунтовому розчині, хоча визначальні механізми поглинання досі є предметом наукової дискусії.

Для з'ясування впливу надлишку ВМ на макроелементний склад рослин необхідно, насамперед, визначення змін складу ґрунтового розчину. Відповідно до існуючої концепції, рухомість поживних речовин у ґрунті – чинник, пов'язаний з родючістю ґрунту. Завдяки рухливості іонів вони досягають поверхні коренів, і стає можливим їх поглинання рослинами, процеси росту коренів і їх проникнення у ґрунт є взаємодоповняльними.

Відомо, що збалансованість хімічного складу живих організмів – основна умова їх нормального росту і розвитку. У МПД №1 встановлено, що високі концентрації Pb, Cd, Ni і Cr призводять до дисбалансу компонентів мінерального живлення рослин. Надлишок ВМ супроводжувався трансформацією основних елементів живлення (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Ca, Mg) в недоступний для рослин стан і порушенням надходження, розподілу макроелементів і металів у органах рослин.

Забруднення ґрунтів Cd, Cr, Ni, Pb при різкому зниженні продуктивності рослин суданки приводить до збільшення концентрації загального азоту та калію в рослинах (рис. 3), що не є позитивним за зміни співвідношення вмісту N:P:K від 1:0,2:0,6 (контроль) до 1:0,15:0,9 (варіант 13 з проявом токсичності Cr для рослин) та зменшення загального вносу макроелементів. Вміст N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> і K<sub>2</sub>O у коренях суданської трави при зростаючих дозах Cd, Pb, Ni і Cr знижується, що є доказом розбалансованості процесів транслокації і накопичення хімічних елементів у системі ґрунт-рослина за забруднення ВМ.

Зміни співвідношень основних макроелементів (N:P:K) за забруднення ВМ системи ґрунт-рослина вочевидь впливають на фізіологічні процеси і функціонування рослинної системи в цілому. Встановлено порушення процесів надходження і накопичення в рослинах суданської трави Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> за різних рівнів забруднення ґрунту металами – токсикантами (див. таблицю).

За імпактного характеру зростаючих рівнів забруднення ґрунту ВМ виявлено збільшення співвідношення макроелементів, що свідчить про порушення природної



Рис. 2. Вплив поліелементного забруднення чорнозему звичайного (район сталого техногенного впливу заводу “Укрцинк”, Донецька обл.) ВМ на рослини вівса (*Avena sativa*): 1 варіант – контроль; 14 варіант – рівень забруднення ґрунту відповідає надзвичайно небезпечній категорії забруднення ВМ.

рівноваги елементного складу рослинної системи та є доказом зниження якості рослин. Відомо, що підвищення співвідношення в кормах  $K / Ca+Mg > 2,2$  призводить до пасо-вищної тетанії у тварин [24].

Порушення генетично обумовленого елементного складу рослин може призвести до порушення кількісних співвідношень макроелементів трофічних ланцюгів, що за урахування ефекту біомагніфікації негативно вплине на здоров'я людини як вершини піраміди трофічних ланцюгів.

Встановлено [25] підвищене надходження азоту в рослини на забруднених ВМ ґрунтах, збільшення вмісту загального та білкового азоту й вільних амінокислот, що є захисною реакцією рослин на токсичну дію ВМ. Амінокислоти й інші низькомолекулярні органічні речовини можуть безпосередньо поєднуватися з ВМ, сприяти синтезові специфічних білків, які є детоксикантом ВМ на рівні клітин рослин.

Дані МПД №1 демонструють, що перевищення природного вмісту ВМ у ґрунті у 3, 5, 10, 15 разів негативно впливає на надходження N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O в рослини гречки і гороху (рис. 4).

Вміст загального азоту змінювався залежно від внесеного металу і рівня перевищення його фону. Так, перевищення природного кларку Cd у 3–5–10–15 разів знижувало вміст загального азоту рослин гречки з 0,93 до 0,2%, в зерні з 1,06 до 0,5%, збільшувало вміст азоту в корінні з 1,22 до 2%. Pb сприяв зниженню концентрації азоту в рослинах з 0,93 до 0,4%, в зерні – до 0,6%, в коренях його вміст зростав до 1,9%. Перевищення природного вмісту у ґрунті Ni більшою мірою сприяло зниженню накопичення загального азоту у вегетативній масі та зерні, збільшенню вмісту азоту в коренях гречки, порівняно з перевищенням природного фону Cr.

Досліджено, що забруднення ґрунту Cd, Pb, Ni і Cr сприяло зниженню надходження загального азоту в рослини гороху з 2,33 до 1,3%. Перевищення фонового рівня вмісту Cd і Ni у ґрунті в 5–10 разів збільшувало вміст загального азоту (захисна реакція рослин на надлишок ВМ у системі ґрунт–рослина), подальше збільшення рівня забруд-

Вплив забруднення ґрунту ВМ на вміст окремих макроелементів (%) та їх співвідношення в рослинах суданської трави

Варіанти досліджу	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	K <sup>+</sup> /(Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup> )
1. Контроль	1,49	2,57	10,48	2,58
2. НРК(60) – фон	1,89	3,32	11,63	2,23
3. Фон + Cd <sub>3</sub> Pb <sub>3</sub> Ni <sub>3</sub> Cr <sub>3</sub>	0,69	1,15	5,27	2,86
4. Фон + Cd <sub>5</sub> Pb <sub>3</sub> Ni <sub>3</sub> Cr <sub>3</sub>	0,70	1,40	16,23	2,97
5. Фон + Cd <sub>10</sub> Pb <sub>3</sub> Ni <sub>3</sub> Cr <sub>3</sub>	0,69	1,34	6,08	3,00
6. Фон + Cd <sub>15</sub> Pb <sub>3</sub> Ni <sub>3</sub> Cr <sub>3</sub>	0,67	1,16	5,83	3,24
7. Фон + Pb <sub>5</sub> Cd <sub>3</sub> Ni <sub>3</sub> Cr <sub>3</sub>	0,93	1,52	7,54	3,08
8. Фон + Pb <sub>10</sub> Cd <sub>3</sub> Ni <sub>3</sub> Cr <sub>3</sub>	0,83	1,30	6,18	3,86
9. Фон + Pb <sub>15</sub> Cd <sub>3</sub> Ni <sub>3</sub> Cr <sub>3</sub>	0,77	1,56	6,81	2,92
10. Фон + Ni <sub>5</sub> Cd <sub>3</sub> Pb <sub>3</sub> Cr <sub>3</sub>	0,74	1,69	7,16	2,95
11. Фон + Ni <sub>10</sub> Cd <sub>3</sub> Pb <sub>3</sub> Cr <sub>3</sub>	0,61	1,66	7,27	3,20
12. Фон + Ni <sub>15</sub> Cd <sub>3</sub> Pb <sub>3</sub> Cr <sub>3</sub>	0,59	1,47	6,92	3,36
13. Фон + Cr <sub>5</sub> Cd <sub>3</sub> Pb <sub>3</sub> Ni <sub>3</sub>	0,25	0,63	3,20	3,64
14. Фон + Cr <sub>10</sub> Cd <sub>3</sub> Pb <sub>3</sub> Ni <sub>3</sub>	Рослини загинули			
15. Фон + Cr <sub>15</sub> Cd <sub>3</sub> Pb <sub>3</sub> Ni <sub>3</sub>				

нення ґрунту Cd та Ni до 15 кларків сприяло зниженню вмісту загального азоту в зерні гороху, що свідчить про редукцію процесів азотного обміну.

Перевищення фонового рівня Cr знизило вміст загального азоту в зерні та коренях рослин. Cd, Pb при перевищенні у 3–5–10–15 разів і Ni та Cr за 3- і 15-кратного перевищення природного фону їх вмісту у ґрунті сприяв зменшенню вмісту азоту в коренях гороху.

Однак присутність елементів у тканинах не характеризує процес поглинання речовин рослинами унаслідок перерозподілу їх в рослинній системі. Тому в досліді протягом 3-х років визначено загальне винесення основних макроелементів рослинами суданської трави, гречки і гороху за умов забруднення ґрунту ВМ (рис. 4). Так, перевищення фону Cd, Pb, Ni і Cr в 3 рази сприяло зниженню винесення азоту, фосфору, калію суданською травою в 1,5 рази.

Cd сприяв зниженню загального винесення азоту з 2900 до 1500 мг, фосфору – з 460 до 230 мг, калію – з 2230 до 1190 мг. Pb знижував загальне винесення азоту суданською до 1720 мг, фосфору – до 240 мг, калію – до 1220 г.

ВМ знизили загальне винесення азоту, фосфору і калію рослинами гречки та гороху. Загалом, за умов забруднення ВМ, гречкою менше виносилось основних макроелементів, ніж рослинами гороху (рис. 5, а–з). Підвищення рівнів забруднення Cd знижували загальне винесення азоту з 939 до 345 мг, винесення азоту ґрунту – з 758 до 301 мг рослинами гречки і з 7170 до 3180 мг, з 6904 до 3000 мг, відповідно, рослинами гороху.

Збільшення забруднення ґрунту Pb знижувало загальне винесення азоту рослинами гречки до 474 мг, азоту ґрунту – до 433 мг, рослинами гороху – до 3000 мг загальному азоту і до 2825 мг азоту ґрунту.

Високі рівні вмісту Ni у ґрунті призвели до зниження винесення загального азоту рослинами гречки до 486 мг і до 3280 мг рослинами гороху. Параметри вмісту азоту ґрунту при цьому зменшились до 415 мг, 3083 мг відповідно. Подальше зниження загального винесення азоту ґрунту до 389 мг і до 3412 мг відповідно рослинами гречки і гороху, спостерігалось при забрудненні ґрунту Cr. При цьому зменшилося до 440 мг загальне винесення азоту рослинами гречки і до 3580 мг рослинами гороху.

За використання методу стабільної ізотопної мітки ( $^{15}\text{N}$ ) встановлено загальне винесення макроелементів рослинами з ґрунту та з добривами за забруднення ВМ, розраховано коефіцієнт його використання (рис. 5, а–б). Виявлено, що Cd, Pb, Ni, Cr негативно впливають на використання азоту добрив тестовими культурами. Найбільшою мірою на цей процес вплинули надлишок Cd і Pb у ґрунті для рослин гречки. Щодо гороху, то всі метали-токсиканти сприяли блокуванню процесу поглинання азоту добрив рослинами (рис. 5, б).

Перевищення фонових рівнів Cd в 3–5–10–15 разів у ґрунті зменшило винесення азоту добрив рослинами гречки з 181 до 44 мг, рослинами гороху – з 265 до 197 мг.

Збільшення концентрації Pb у ґрунті знижувало винесення азоту добрив до 41 мг гречкою, а горохом – до 175 мг.

Забруднення ґрунту Cr і Ni також зменшило винесення азоту добрив до 51 мг і до 77 мг відповідно по гречці, до 168 мг і до 165 мг рослинами гороху.

Виходячи з того, що разом з використанням міченого  $^{15}\text{N}$  азоту добрив рослинами частина його закріплюється в ґрунті у вигляді органічних сполук, а частина втрачається з ґрунту в газоподібній формі, втрати і закріплення азоту добрив, процеси переважно відбуваються протягом 20–30 днів за впливу гетеротрофних організмів, нітрифіку-

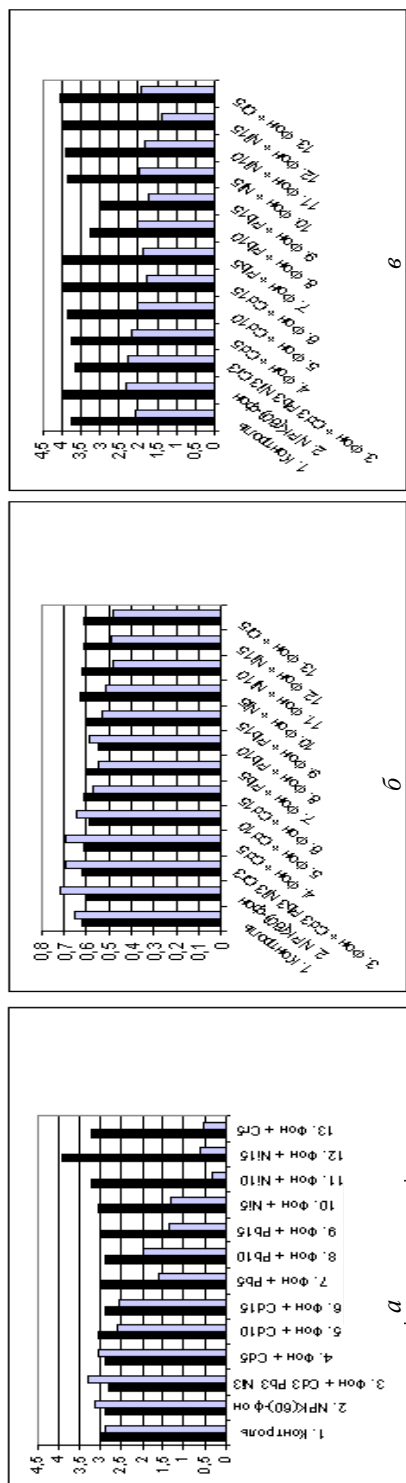


Рис. 3. Вплив поліелементного забруднення ґрунту ВМ на накопичення макроелементів вегетативною масою та коренями суданської трави.

■ вегетативна маса суданки; □ корені суданки; ▨ – вміст N; б – вміст P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; в – вміст K<sub>2</sub>O.

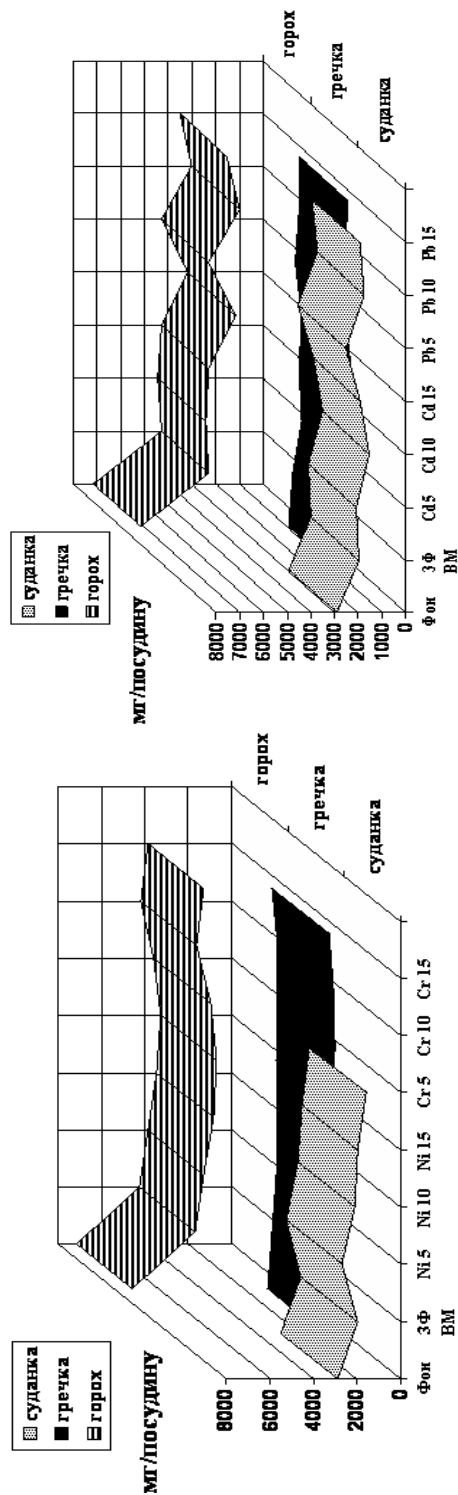


Рис. 4. Вплив рівнів забруднення ґрунту Cd та Pb Ni та Cr на загальне виведення азоту тест-рослинами.



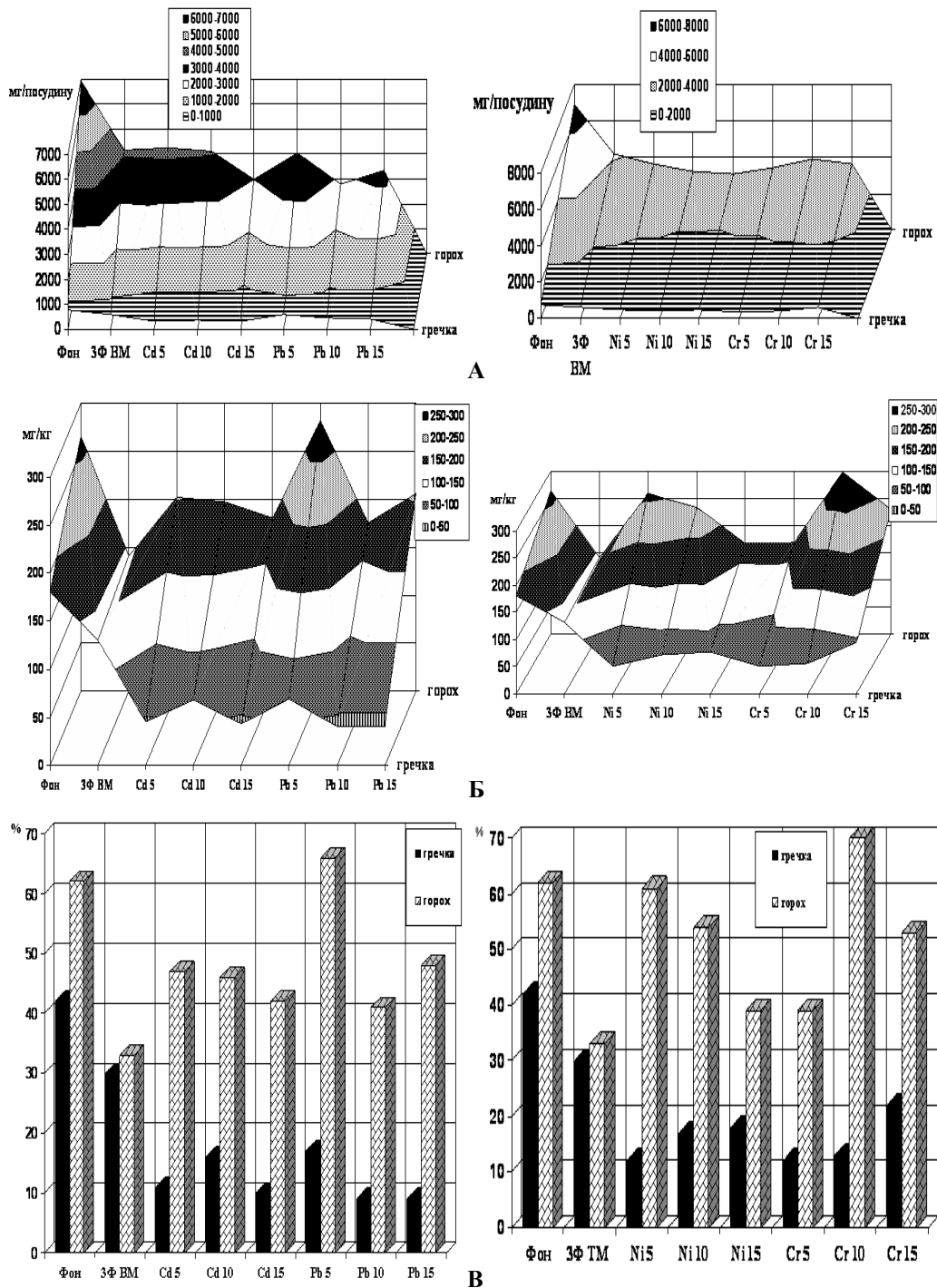


Рис. 5. Вплив забруднення ґрунту Cd, Pb, Ni та Cr на винесення азоту ґрунту (А) і азоту добрива (Б) рослинами на коефіцієнт використання азоту добрив (В).



ючих бактерій, важливим питанням є визначення коефіцієнта використання азоту добрив тест-рослинами за фітотоксичної дії ВМ.

Виявлено зниження ефективності використання азоту добрив за умов впливу поліелементного забруднення ВМ та за розрахунку коефіцієнтів використання азоту добрив у наших дослідженнях.

За урахування того, що в польових умовах засвоєння азоту туків рослинами агрофітоценозів становить 30–40% від внесеного, коефіцієнт використання азоту добрив становить 42% з коливаннями від 12 до 70% [2, 3], у досліді виявлено, що забруднення ґрунту ВМ зменшило коефіцієнт використання азоту добрив ( $K_{Nd}$ ) у середньому на 15–25%. Так, перевищення фонових рівнів Cd у ґрунті в 3–5–10–15 разів сприяло зниженню  $K_{Nd}$  з 42 (контроль) до 10%, з 62 (контроль) до 42% відповідно по гречці та гороху, Pb – до 9,5% і до 41%, Ni – до 12% і до 39%, Cr – до 12% і до 39% (рис. 5, B).

Перевищення природних кларків вмісту ВМ вплинуло на винесення загального фосфору і калію рослинами гречки, гороху (рис. 6–7). Встановлено, що з кларки Cd, Pb, Ni і Cr збільшували винесення фосфору рослинами гречки з 75,8 (контроль) до 104 мг, знижували винесення фосфору з 99,5 (контроль) до 59 мг рослинами гороху.

Зростаючі рівні Cd у ґрунті (перевищення природного його вмісту в 5, 10, 15 разів), сприяли зменшенню загального винесення фосфору рослинами гречки і гороху до 49 і 45 мг відповідно.

Забруднення ґрунту Pb також вплинуло на зниження загального винесення фосфору рослинами гречки і гороху до 51 і 44 мг, а перевищення його фонових рівнів в 15 разів збільшувало винесення фосфору рослинами гречки до 83 мг (рис. 6).

Різні рівні забруднення ґрунту Ni призвели до зниження загального винесення фосфору рослинами гречки до 65 мг, гороху – до 46 мг. Забруднення ґрунту Cr також знизило винесення фосфору рослинами гречки до 59 мг, гороху – до 41 мг.

Встановлено, що на збільшення загального винесення калію рослинами гречки впливало: перевищення фонових рівнів Cd, Pb, Ni та Cr у 3 рази, при цьому винесення збільшилося з 1328 (контроль) до 1828 мг; Cd<sub>5</sub> і Cd<sub>10</sub> – до 1443 мг; Pb<sub>10</sub> і Cr<sub>5</sub> – до 1345 та 1337 мг відповідно (рис. 7).

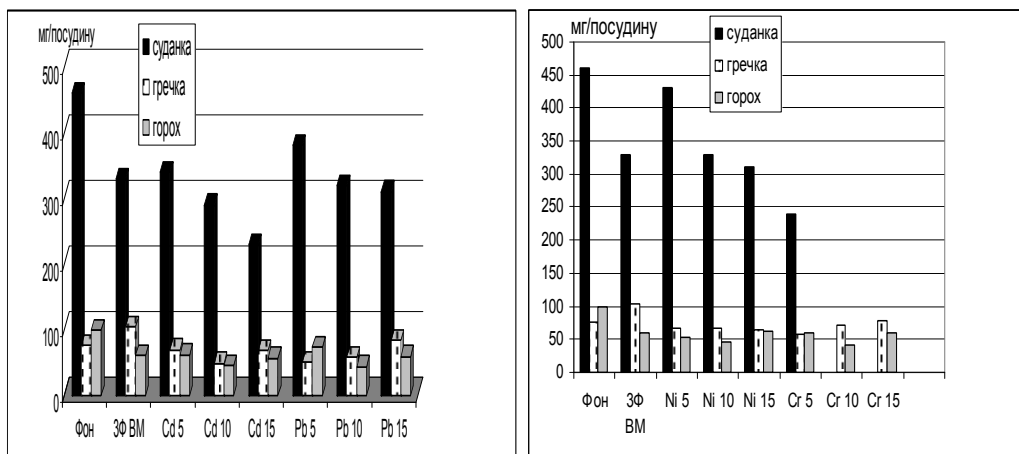


Рис. 6. Вплив забруднення ґрунту Cd, Pb, Ni та Cr на винесення загального фосфору тест-рослинами.

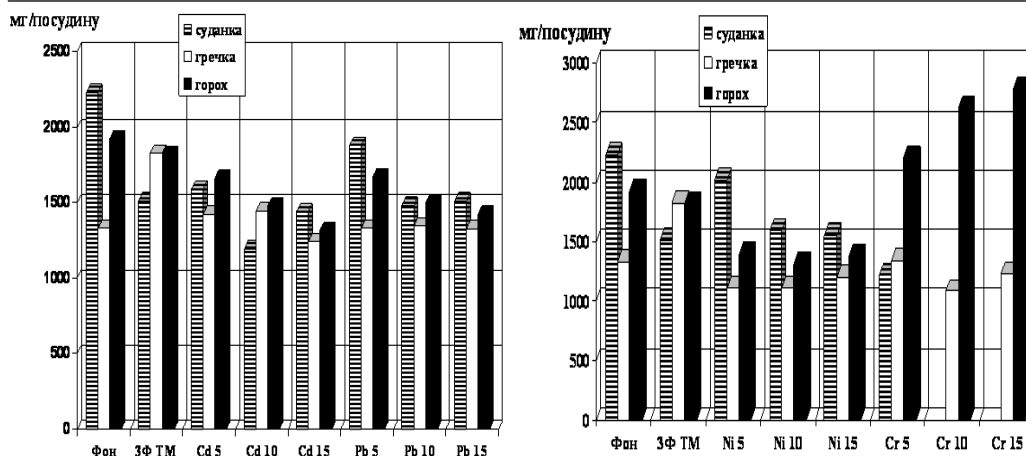


Рис. 7. Вплив забруднення ґрунту Cd, Pb, Ni та Cr на винесення загального калію тест-рослинами.

Перевищення природного вмісту Cd і Pb у ґрунті в 15 разів, Ni в 5–10–15 разів, Cr – в 10–15 разів призвело до зниження загального винесення калію рослинами гречки. З 1920 до 1315 мг зменшилося загальне винесення калію рослинами гороху за впливу забруднення ґрунту Cd, Pb і Ni (Cd – до 1420, Pb – до 1310, Ni – мг), а за зростаючих рівнів забруднення ґрунту Cr спостерігалось збільшення винесення калію з 1920 до 2780 мг.

Отже, дисбаланс у надходженні та накопиченні макроелементів за забруднення ВМ системи ґрунт–рослина пов'язаний із різною інтенсивністю їх мобілізації у ґрунтовий розчин. Доступність  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$  зменшується, вочевидь, у результаті їх вилугування з ризосфери при одночасній мобілізації в ґрунті ряду елементів, що є гео- та біохімічними антагоністами найважливіших елементів мінерального живлення рослин. Аналогічні процеси, на нашу думку, відбуваються під час транслокації до тестових культур азоту і фосфору. Підтвердженням цього є встановлений у досліді антагоністичний характер надходження в рослини таких елементів:  $\text{P}_2\text{O}_5$  і Cr,  $\text{K}_2\text{O}$  і Cd, Pb і  $\text{P}_2\text{O}_5$ , Pb і  $\text{K}_2\text{O}$ , Ca і Ni, Mg і Cd, Mg і Ni (рис. 3–7, табл.).

Таким чином, для забезпечення нормального проходження процесів метаболізму, росту і розвитку рослин необхідні оптимальні умови живлення, які створюються складом, кількістю і співвідношенням макроелементів і мікроелементів у системі ґрунт–рослина. За нестачі макроелементів і надлишку ВМ в екстремальних умовах забруднення ґрунту відбувається порушення процесів поглинання і транспорту, результатом чого є дисбаланс елементного складу рослин, який є індикатором порушення нормального їх розвитку і погіршення якості рослин.

ВМ є фактором, що обмежує ріст і розвиток кореневої системи рослин, яка виконує захисну роль як біологічний бар'єр у накопиченні металів надземною масою тест-рослин. Виявлені зміни морфологічних ознак кореневої системи рослин (зниження накопичення кореневої маси суданської трави та гречки, зменшення їх поглинальної поверхні, редукцію функції поглинання кореневої системи за забруднення Cd, Pb, Cr та збільшення показників морфологічного стану кореневої системи гороху за впливу забруднення ґрунту Ni до 5 кларків перевищення) слід використовувати при проведенні моніторингу в зонах сталих та імпульсних впливів аеротехногенного забруднення ВМ моно- та поліелементного характеру.

Характер накопичення макроелементів у рослинах за умов імпактного забруднення ВМ у діапазоні перевищення фонових рівнів вмісту у ґрунті в 3–5–10–15 разів залежить від рівня забруднення ґрунту, типу культури, виду фітотоксиканта.

За умов забруднення системи ґрунт–рослина ВМ оптимізувати хімічний склад рослин, поліпшити їх якісний склад шляхом застосування туків не є можливим. Високі концентрації Pb, Cd, Ni, Cr призводять до зниження ефективності туків і дисбалансу макроелементів (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Ca, Mg) у системі ґрунт–рослина.

Виявлено антагоністичний характер надходження у рослини ВМ та основних макроелементів: P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> і Cr, K<sub>2</sub>O і Cd, Pb і P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Pb і K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> і Ni, Ca і Ni, Mg і Cd, Mg і Ni.

1. Бансал Р. Л., Каплунова Е. В., Зырин Н. Г. Состояние Zn в почвах и транслокация его в растения при высоких концентрациях элемента // Почвоведение. 1982. № 10. С. 36–41.
2. Бобрицкая М. А., Москаленко Н. Н. Изучение степени использования азотных удобрений в полевых условиях с помощью стабильного изотопа <sup>15</sup>N // Агрохимия. 1969. № 12. С. 23–29.
3. Гамзиков Г. П., Кострик Г. И., Емельянова В. Н. Баланс и превращения азотных удобрений. Новосибирск: Наука, 1985. 161 с.
4. Гармаш Г. А. Накопление тяжелых металлов в почвах и растениях вокруг металлургических предприятий: Автореф. дис... канд. биол. наук. Новосибирск, 1985. 16 с.
5. ГОСТ 26929-94. Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов.
6. ДП на винахід № 69953UA AG01N33/24, A01G7/00 Спосіб оцінки токсичної дії важких металів / Фатєєв А.І., Самохвалова В.Л.; Опубл. від 15.09.2004. Бюл. № 9. 10 с.
7. Ильин В. Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение. Новосибирск: Наука, 1991. 150 с.
8. Ищенко Г. С., Бутник А. С. Фитотоксичность Co и Cd, их накопление в сельскохозяйственных культурах Средней Азии // Агрохимия. 1991. № 6. С. 65–69.
9. Колосов И. И. Поглощительная деятельность корневых систем растений. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 386 с.
10. Методи аналізів ґрунтів і рослин (методичний посібник). Харків, ННЦ ІГА. 1999. С. 98–126.
11. Методические указания по применению стабильной индикации в агрохимических исследованиях / Под ред. Р.А. Розумной, С.А. Гречко. Харьков: УНИИПА, 1991. 46 с.
12. Самохвалова В. Л. Влияние тяжелых металлов на урожай и качество сельскохозяйственной продукции // Вісн. ХДАУ. 2001. № 3. С. 203–205.
13. Самохвалова В. Л., Фатеев А. И. Динамика и трансформация тяжелых металлов почвенной системы при полиэлементном загрязнении // Агроеколог. журн. 2003. № 2. С. 26–30.
14. Самохвалова В. Л., Фатеев А. И., Якушко В. І., Журавльова І. М. Спосіб індикації та оцінки екологічного стану забрудненої важкими металами системи ґрунт - рослина за біохімічними показниками // Наук. вісн. Ужгород. ун-ту. Сер. біол. Вип. 24. 2008. С. 83–90.
15. Станков Н. З. Корневая система полевых культур. М.: Колос, 1964. 279 с.
16. Страд В. Л., Золотарев Б. Н. Влияние внесения водорастворимых солей Pb, Cd и Cu на их поступление в растения и урожайности некоторых сельскохозяйственных культур // Агрохимия. 1991. № 4. С. 71–76.

17. Таланова В. В. Фитогормоны как регуляторы устойчивости растений к неблагоприятным факторам среды: Автореф. дис... д-ра. биол. наук. Петрозаводск, 2009. 44 с.
18. Тарчевский И. А. Метаболизм растений при стрессе. Казань: Фэн, 2001. 448 с.
19. Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М., Лайдинен Г. Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам / Отв. ред. Н.Н. Немова; Институт биологии КарНЦ РАН. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2007. 172 с.
20. Фатеев А. И., Лысенко М. Н., Балуяк С. А., Богачёва В. Л. Проблемы использования почв, загрязненных тяжелыми металлами // Проблемы использования земли в условиях реформирования сельскохозяйственного производства и осуществления земельной реформы: Тез. докл. междунар. науч.-практ. конф., Чабаны. К., 1995. С. 87–89.
21. Фатеев А. И., Самохвалова В. Л., Лысенко М. Н. Формы соединений тяжелых металлов в почве в условиях полиэлементного загрязнения агроценозов // Агроэколог. журн. 2002. № 4. С. 26–30.
22. Фатеев А. И., Самохвалова В. Л. Вплив техногенного поліелементного забруднення важкими металами на органічну речовину ґрунту // Наук. вісн. ЧНУ. Вип. 293. Сер. біол. Чернівці: Рута, 2006. С. 152–163.
23. Чиркова Т. В. Физиологические основы устойчивости растений. СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2002. 240 с.
24. Bacci P., Brags Marcazzan G. M., Redaelli P., Ventura A. Particulate emission and elemental behaviours in a large coal power plant // 11 Nuova Cimento. 1985. Vol. 8. N 6. P. 907–923.
25. Singhal R. L., Marali L. Aspect of biochemical toxicology of cadmium // Federation proc., 1976. Vol. 35. P. 75.

#### PLANTS MACRONUTRIENTS AT SURPLUS OF HEAVY METALS INFLUENCE IN SOIL – PLANT SYSTEM

V. Samokhvalova

NSC «Institute for Soil Science and Agrichemistry Research named after O.N. Sokolovsky»  
4, Chaykovskiy St., Kharkiv 61024, Ukraine  
e-mail: v.samokhvalova@mail.ru

At the terms of the microfield tests carrying out on chernozem podzolic of the Kharkiv area and chernozem ordinary of the Donetsk area the influence of heavy metals soil contamination on the roots plants morphological indexes, macroelement composition of the plant system are investigated. The negative influence of Cd, Pb, Cr and Ni soil contamination different levels in the range of base-line levels exceeding of their maintenance in soil in 3–5–10–15 times on the function of plants roots of *Pisum sativum* and *Avena sativa* absorption were set. Feed optimum terms violation for composition of staff disbalance, amount and correlation of macronutrients and pollutants in the soil-plant system at influence of impact and chronic polyelemental contamination, antagonism of heavy metals cations and macronutrients were found out. It is well-proven that accumulation of macronutrients in plants depends on the level of soil contamination, on type of culture and phytotoxic element for establishment of mineral fertilizers decline efficiency using  $^{15}\text{N}$  and method of stable indication.

*Key words:* *Sorghum sudanense*, *Fagopyrum sagittatum*, *Pisum sativum*, *Avena sativa*, macronutrients, contamination, heavy metals, soil-plant system, stable indication of  $^{15}\text{N}$ .

**МАКРОЭЛЕМЕНТЫ РАСТЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗБЫТКА ТЯЖЕЛЫХ  
МЕТАЛЛОВ В СИСТЕМЕ ПОЧВА – РАСТЕНИЕ****В. Самохвалова**

ННЦ «Институт почвоведения и агрохимии имени А.Н. Соколовского»  
ул. Чайковского, 4, Харьков 61024, Украина  
e-mail: v.samokhvalova@mail.ru

При проведении микрополевых опытов на черноземе оподзоленном Харьковской области и черноземе обыкновенном Донецкой области исследовано влияние загрязнения почвы тяжелыми металлами на морфологические показатели корневых систем растений, макроэлементный состав растительной системы. Установлено негативное влияние разных уровней загрязнения почвы Cd, Pb, Cr и Ni в диапазоне превышения фоновых уровней их содержания в почве в 3–5–10–15 раз на функцию поглощения корневых систем *Pisum sativum* и *Avena sativa*. Выявлено нарушение оптимальных условий питания при дисбалансе состава, количества и соотношения макроэлементов и загрязнителей в системе почва–растение, влиянии импактного и хронического полиэлементного загрязнения, антагонизма ионов тяжелых металлов и макроэлементов. Доказано, что характер накопления макроэлементов растений зависит от уровня загрязнения почвы, типа культуры и вида фитотоксиканта при установлении снижения эффективности туков, использовании  $^{15}\text{N}$  и метода стабильной индикации.

*Ключевые слова:* *Sorghum sudanense*, *Fagopyrum sagittatum*, *Pisum sativum*, *Avena sativa*, макроэлементы, загрязнение, тяжелые металлы, система почва–растение, стабильная индикация  $^{15}\text{N}$ .

Стаття надійшла до редколегії 27.03.08

Надійшла після доопрацювання 14.04.09

Прийнята до друку 27.04.09