

## БІОГЕОХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ АГРОЕКОСИСТЕМ ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

І.В. Шумигай, В.В. Коніщук, П.М. Душко

*Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)*

*e-mail: innashum27@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0432-2651*

*e-mail: konishchuk\_vasyl@ukr.net; ORCID: 0000-0003-4115-5642*

*e-mail: pdushko@hotmail.com; ORCID: 0000-0002-1408-0342*

*На думку В.І. Вернадського, життя на Землі існувало вічно. Значну увагу академік приділив вивченню ґрунтів. Останні здатні акумулювати та перерозподіляти хімічні елементи, що надходять у біосферу, між елементами ландшафту. Важкі метали (ВМ) та інші пріоритетні токсиканти з різних джерел потрапляють у верхні горизонти ґрунтів, де їх наступна трансформація визначається властивостями ґрунту. Час перебування важких металів у ґрунті значно триваліший, ніж в інших компонентах ландшафту; також вони повільно видаляються за вилуговування, поглинання рослинами та в результаті екзогенних процесів. Завдяки унікальній ролі, що виконується хімічними елементами у біосфері, їх уміст у ґрунті є одним із істотних та рівноцінних екологічних чинників, що визначають розвиток живих організмів у екосистемах. У зв'язку з доволі інтенсивним розвитком сільського господарства в Лісоствепу особливо увагу було звернено на розподіл  $Zn^{2+}$  та  $Cu^{2+}$  у ґрунтового покриві цієї зони. Зважаючи на те, що важкі метали виступають одним із головних джерел забруднення навколишнього середовища, зокрема на території України, комплексне вивчення їх ореолів міграції у ґрунті є необхідним для розробки ефективних природоохоронних заходів. Добрива — найефективніший засіб підвищення родючості ґрунтів, урожайності й поліпшення якості продукції рослинництва. Однак, істотним недоліком багатьох мінеральних добрив є наявність токсичних важких металів. Так, деякі з цих елементів у невеличких кількостях можуть надавати позитивну дію на ріст і розвиток рослин. Досліджено вплив систематичного внесення добрив на показники родючості чорнозему типового та сірого опідзоленого, а також їх вплив на вміст рухомих сполук елементів у ґрунтах. Згідно з даними, за систематичного внесення підвищених доз добрив елементи можуть нагромаджуватися в ґрунті в значних кількостях, що негативно впливає на властивості та родючість ґрунту, на урожай і його якість.*

**Ключові слова:** кореляційний аналіз, цинк, купрум, загальний вміст гумусу, рН, родючість ґрунтів, добрива, пшениця озима, урожайність зернових культур.

### ВСТУП

Біогеохімія є науково-практичною частиною вчення В.І. Вернадського про біосферу [1], що остаточно сформувалася у 80-х р. ХХ ст. та визначає фундаментальну теорію і методологію природничих наук, пов'язаних із живою речовиною довкілля. Саме взаємодія біогенної (живої) і абіогенної (косної) речовин підтримує «геохімічну організованість біосфери» та відповідну її стабільність. Вчений наголошував, що лише біогеохімічні цикли (міграції хімічних елементів між живою і косною речовиною) можуть пояснити поширення, зокрема у ґрунтах, більшості хімічних

елементів Землі, в т. ч. важких металів [2–4].

Важкі метали (ВМ) виконують унікальні функції у біосфері, в зв'язку з чим, проблема забруднення довкілля, є однією з найважливіших проблем сучасності та найближчого майбутнього. Сполуки цих елементів характеризуються високою токсичністю, рухомістю і здатністю до біоаккумуляції, що несе небезпеку для всього живого на Землі. Їх особливістю також є те, що вони, на відміну від органічних токсикантів, не розкладаються, один раз включившись у біогеохімічні цикли можуть зберігати свою біологічну активність необмежений час. Маючи властивості міг-

рації, також забруднюють усі компоненти біосфери, зокрема ґрунт [5; 6].

Однак, слід зауважити, що у ВМ упродовж останнього десятиліття сформувався стійкий дефіцит у ґрунті, зумовлений їхнім значним винесенням сільськогосподарськими культурами. Загальновідомо, що в процесі споживання цілої низки елементів рослина основну їхню частину засвоює з ґрунту. Один елемент виконує, як правило, декілька функцій, разом із тим одну фізіологічну функцію можуть виконувати різні елементи, отже вони до певної міри можуть замінювати один одного. До того ж, сумісне знаходження різних елементів у живих організмах може підсилювати (синергізм) або послабляти (антагонізм) дію одного з них (рис. 1).

Загалом, елементи живлення, які містяться в ґрунті, є складовими його поживного режиму і запорукою родючості та продуктивної мікробіологічної діяльності. Однак здатність ґрунту забезпечити рослини елементами живлення залежить не тільки від фактичної наявності останніх, а й від їхнього вмісту, доступності та необхідної кількості для рослин [7; 8].

Сучасний етап розвитку суспільства характеризується активним втручанням людини в природні процеси локального та регіонального рівнів із метою підвищення

біопродуктивності ландшафтів. До того ж, у геохімічні потоки речовини та енергії залучаються нові складові, не характерні для природних процесів, у результаті може змінюватися їхній напрям, що зумовлює серйозні порушення функціонування природно-територіальних систем. Це проявляється у накопиченні в ландшафтах ксенобіотиків, які викликають значні зміни геохімічних циклів елементів в окремих компонентах системи, а також відбувається порушення рівномірності розподілу хімічних речовин. Так, за внесення у ґрунт органічних добрив у ньому збільшується вміст таких хімічних елементів, як цинк та купрум. Дослідженнями більшості вчених питання щодо надходження хімічних елементів у агроєкосистеми ґрунтово-кліматичних зон України доведено, що найбільша їх кількість надходить із добривами у зоні Лісостепу України [9–13].

Наразі проблема вивчення токсичної дії та виведення ВМ на території Лісостепу стоїть особливо гостро у зв'язку з тим, що для регіону характерна інтенсивна сільськогосподарська діяльність, яка відрізняється високим ступенем антропогенних змін природних ландшафтів. Загальні біогеохімічні особливості ландшафтів лісостепової зони донині не можна вважати повністю розкритими, а основні екологічні

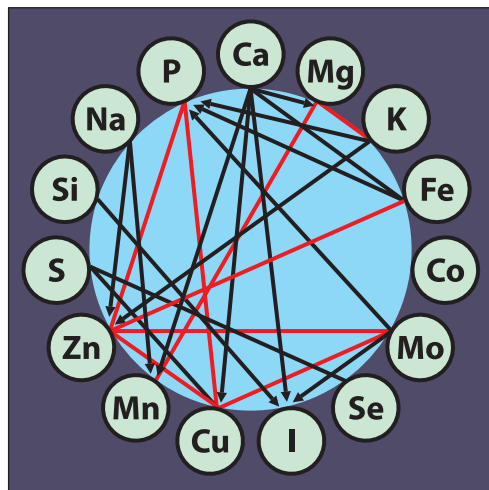
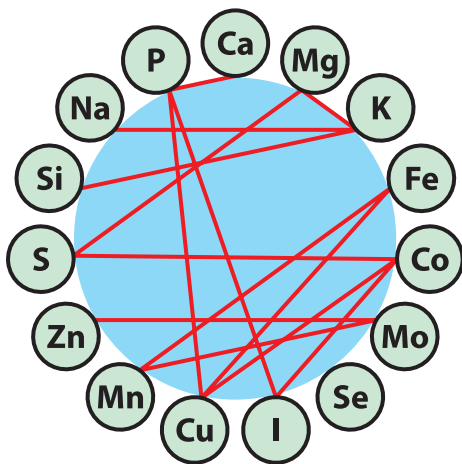


Рис. 1. Основні тенденції дії елементів живлення

принципи вивчення до кінця розробленими, хоча еколого-геохімічні дослідження на цій території здійснювалися впродовж останнього десятиліття. Крім того, за дослідження активності міграції ВМ під впливом антропогенних чинників виникають певні проблеми. Одна з них пов'язана з тим, що кількість ВМ, яка надходить у агроєкосистеми з антропогенних джерел, порівняно з їх природним фоновим вмістом, незначна, і тому важко піддається ідентифікації.

Для вивчення можливості міграції ВМ були закладені дослідні ділянки у ДГ «Чабани» (Київська обл.) та НДГ «Агрономічне» (Вінницька обл.) та проведені спостереження в умовах тимчасових польових дослідів на чорноземі типовому і сірому опідзоленому ґрунті в умовах Лісостепу.

Екологічна ситуація, що склалася у цій зоні, зобов'язує населення розробити комплекс заходів щодо зниження техногенного навантаження на природні комплекси, що трансформуються. Для цього необхідно вивчати основні закономірності міграції, концентрації та трансформацію хімічних елементів у ландшафтах, обумовлені природними умовами, чинниками, процесами та їх раціонального використання у тропічному ландшафті, що і було **метою нашого дослідження**.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Фундаментальні теоретичні основи щодо геохімічної міграції елементів були закладені ще О.П. Виноградим, Б.Б. Полиновим, О.І. Перельманом. Екологічні аспекти негативного впливу важких металів на навколишнє середовище представлено в працях як вітчизняних, так і зарубіжних науковців: Ю.В. Алексєєва, М.Ф. Реймерса, А. Кабати-Пендіас, С.П. Мальованого, І.В. Кармазиненко, А.І. Кураєва, Ю.Ю. Самчук, Ю.Ю. Войтюк, В.Й. Манічев.

Вивченню міграції ВМ у ґрунтового профілі присвячено багато робіт, однак повного усвідомлення цих процесів і визначення їх кількісних параметрів на сьогодні немає.

Один із кроків у пізнанні біогеохімічних циклів на суші пов'язано з дослідженнями видатного німецького хіміка Ю. Лібиха, який визначив два головних шляхи надходження хімічних елементів у рослини — через газовий обмін та з водних розчинів. Він довів експериментально вибірковість поглинання хімічних елементів рослинами, чим було закладено основу теорії мінерального живлення рослин, та започаткував вивчення циклічної міграції елементів у системі «ґрунт–рослина–ґрунт», яка в подальшому отримала назву біологічного колообігу [3].

Як свідчить О.Б. Бондарєва із співавт. (2012), близько 90% важких металів, від їх загального надходження в агроєкосистеми з мінеральними добривами, накопичується у ґрунті. Решта здатна включатися в колообіг та мігрувати у рослинницьку продукцію, а потім в організм людини [14].

Також за даними Л.О. Жеребної (2001), значна частина важких металів, що знаходиться у мінеральних добривах, перебуває у потенційно рухомій формі (кислоторозчинній). У певних умовах йони важких металів, які присутні в мінеральних добривах і мають високу рухомість у ґрунті, переходять до рослин, накопичуються у великих кількостях і за тропічними ландшафтами живлення надходять до організму тварин та людини [15].

Як вважає Н.О. Козьякова (2000), мінеральні добрива, змінюючи кислотно-лужні умови, також впливають на доступність важких металів рослинами. Фізіологічно кислі азотні добрива мають здатність за довготривалого застосування підвищувати доступність важких металів рослинам. Таким чином, сукупність дії біотичних та абіотичних чинників визначають екотоксикологічні критерії небезпечності застосування агрохімікатів [16].

Загалом, питанню щодо токсичних елементів та використання мінеральних добрив в агроєкосистемах у вітчизняній і зарубіжній літературі приділено достатньо уваги. Однак більшість із них залишаються актуальними на сучасному етапі розвитку та потребують подальшої розробки.

## МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Методологія екологічного нормування вмісту ВМ у системі «грунт–рослина» передбачає використання структурно-функціонального аналізу, встановлення певної шкали впливів, що відображає їх шкодочинність на ґрунти і суміжні середовища та розподіляє стан об'єкта нормування на нормальний, або ненормальний.

Були здійснені спостереження в умовах тимчасових польових дослідів у двох об'єктах. Дослідження були спрямовані на визначення вмісту сполук цинку і міді у ґрунтах Лісостепу в період максимального поглинання елементів живлення пшеницею озимою.

Для досліджень було обрано два об'єкти. Перший об'єкт – чорнозем типовий, середньосуглинковий, добре гумусований на території ДГ «Чабани», що знаходиться у Фастівському р-ні, Київської обл.

Другий об'єкт – сірий опідзолений ґрунт, легкосуглинковий, гумусований, який знаходиться у межах науково-дослідного господарства «Агрономічне» (Вінницький р-н, Вінницька обл.).

Проби ґрунту на обох об'єктах відбирали у 2022 р. у третій декаді травня – першій декаді червня. Відбирання ґрунтових проб та підготування їх до аналізу здійснювалося згідно з вимогами ДСТУ 4287:2007 [3].

У ґрунтових зразках визначали: загальний вміст гумусу за методом І.В. Тюріна за ДСТУ 4289:2004; кислотність ґрунту  $pH_{\text{сол}}$  за ДСТУ ISO 10390-2001; рухомі сполуки  $Cu^{2+}$  і  $Zn^{2+}$  у буферній амонійно-ацетатній витяжці з  $pH$  атомно-абсорбційним методом на спектрофотометрі за ДСТУ 4770:2007 [4; 17; 18].

Здобуті результати обробляли математично дисперсійним методом із використанням кореляційного аналізу та програми Statgraf.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Циклічні процеси синтезу і трансформації органічної речовини в агроєкосистемі є основою біогеохімічного кругообігу всіх

біофільних елементів. Ґрунти, що використовуються в сільськогосподарському виробництві, різноманітні за своїми властивостями, і дія ґрунтових чинників, безперечно, впливає на процеси рухомості елементів і їх доступності до сільськогосподарських культур [19].

Наразі у сільському господарстві інтенсивне застосування добрив, особливо мінеральних і хімічних меліорантів, спричиняє зміни в кількісному складі важких металів. Останні містяться в мінеральних добривах є природними домішками, їх величина залежить від вихідної сировини й технологій її переробки.

Загальновідомо, що в агропромисловому виробництві на значних територіях спостерігається проблема надмірної кислотності ґрунтів, до того ж, підкисленню піддаються навіть чорноземи та сірі лісові, які за своєю природою мають нейтральну і навіть слабколужну реакцію ґрунтового середовища. Якісні показники родючості ґрунтів частково знижуються, тому бажано постійно здійснювати відповідні ґрунтоохоронні заходи. Ця проблема стосується і ґрунтів Лісостепу України, які також потребують проведення меліоративних заходів, насамперед внесення органічних та мінеральних добрив (*табл. 1*).

Отримані дані показують, що низький вміст у контрольному варіанті може бути викликаний природними процесами мінералізації органічної речовини за недостатнього надходження свіжих органічних залишків. Дефіцит гумусу, зумовлений щорічною мінералізацією речовини, втратою гумусу з поверхневим стоком і його вививанням з орного шару, наразі може бути компенсований шляхом внесення значних кількостей річних видів добрив.

Внесення мінеральних добрив посилює процеси мінералізації. Так, внаслідок органічних добрив у дозі 40 т/га відзначено зниження вмісту гумусу на 0,36%. Найнижчі показники щодо вмісту гумусу відзначені на досліджуваних ділянках «Чабани» та «Агрономічне» із внесенням мінеральних добрив на фоні післядії гною. Цьому сприяє збільшення маси кореневих і

Таблиця 1. Вміст у ґрунтах гумусу та важких металів за внесення добрив

Схема досліду	Вміст гумусу, %	рН	Вміст важких металів, мг/кг	
			Zn <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>
<b>Чорнозем типовий (Київська обл.)</b>				
Контроль (без добрив)	4,16	5,6	0,90	1,33
N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	4,27	5,5	1,01	1,30
Гній 40, т/га	4,27	5,8	1,45	1,11
N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> + гній 40, т/га	4,53	5,9	1,80	1,02
<b>Сірий опідзолений (Вінницька обл.)</b>				
Контроль (без добрив)	3,0	4,9	1,05	1,36
N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	2,96	5,1	1,40	0,26
Гній 40, т/га	2,82	5,5	1,88	0,20
N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> + гній 40, т/га	2,87	5,8	1,56	0,17

поживних залишків за рахунок зростання врожайності.

Також відомо, що найбільший вплив на вміст рухомих сполук у ґрунті, крім наявності тонкодисперсних частинок, кількості та якісного вмісту гумусу, має реакція середовища (рН). Аналізуючи показники кислотності ґрунту на досліджуваних ділянках Лісостепу, можна зробити висновок, що залежно від насиченості добривами, їх величина коливалася у межах 5,5–5,8 (на ділянці Київської обл.) та 4,9–6,1 (на ділянці Вінницької обл.) (див. *табл. 1*). Згідно з класифікацією, ґрунти з обох ділянок за реакцією середовища можна віднести до слабокислих. Також помічено тенденцію, що збільшення доз мінеральних добрив (особливо азотних) сприяє підкисленню ґрунтового середовища та їх перехід від нейтральних до слабокислих.

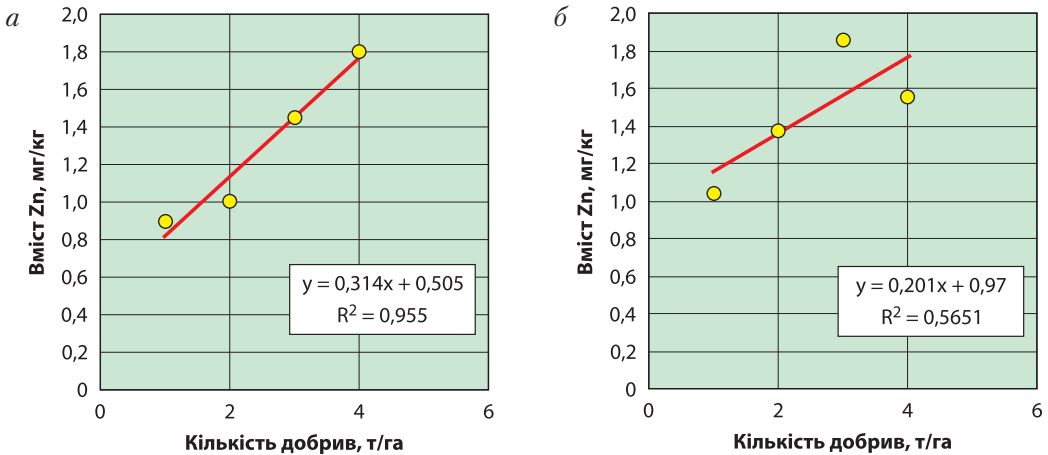
Позитивний вплив щодо зміни реакції ґрунтового середовища відбувся за дії сумісного внесення органічних і мінеральних добрив на фоні післядії гною. Так, післядія 40 т/га гною наблизилася значення реакції ґрунтового розчину до нейтральної. Отже, мінеральні добрива сприяють підкисленню реакції ґрунтового середовища, а органічні добрива стабілізують цей показник.

Результати проведеного дослідження дають підстави стверджувати, що загалом

у Лісостепу орний шар ґрунтів за вмістом купруму та цинку відповідає відповідно низькому та дуже низькому рівню забезпеченості. Крім того, варто зазначити, що рухливість металів у ґрунті впливає на ступінь небезпеки елемента: чим більше останній рухливий, тим легше він надходить у ґрунтовий розчин і проникає у рослини. Рухливість металів великою мірою зумовлена хімічними властивостями самих елементів. Наприклад, цинк більш рухливіший, ніж купрум.

Згідно з проведеними дослідженнями в агроландшафтах Лісостепу, встановлено, що внесення різних доз мінеральних добрив змінює вміст рухомих сполук Zn<sup>2+</sup> та Cu<sup>2+</sup> у ґрунтах. Одним із високотоксичних елементів земної кори, який у ґрунті становить не значну частку, є цинк (*рис. 2*).

Дослідженнями встановлено, що вміст цинку у варіантах без внесення добрив був найнижчим і становив 0,9–1,05 мг/кг і відповідно його кількість зростала зі збільшенням дози внесення мінеральних добрив. Так, у варіантах дослідів, де вносилися N<sub>90</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>, вміст цинку збільшувався і становив 1,01 мг/кг у чорноземі типовому та 1,4 мг/кг у сірому опідзоленому ґрунті. Це підтверджують дані інших учених [20], які встановили, що за низького показника кислотності рухомість цинку



**Рис. 2.** Кореляційна залежність вмісту  $Zn^{2+}$  у ґрунтах Лісостепу від внесення мінеральних добрив:

*a* – чорнозем типовий (Київська обл.); *б* – сірі опідзолені (Вінницька обл.)

зростає, що зумовлює його вилучення. Модель залежності вмісту  $Zn^{2+}$  від кислотності ґрунту у досліджуваних ландшафтах можна описати лінійним рівнянням регресії:

$$y = 0,213x - 10,851 \text{ (Київська обл.)}; \quad (1)$$

$$y = 0,6333x - 1,9 \text{ (Вінницька обл.)}, \quad (2)$$

де  $y$  – вміст рухомих сполук цинку в ґрунті, мг/кг;  $x$  – обмінна кислотність ґрунту, од. рН.

Множинний коефіцієнт детермінації регресії вказує на значну та помірну залежність вмісту рухомих сполук цинку від кислотності ґрунту, який становить для дослідних ділянок Київської та Вінницької обл. відповідно  $R^2 = 0,879$  та  $R^2 = 0,547$ .

До важливих елементів у живленні рослин належить мідь, яка бере участь у процесах окиснення, інтенсивності дихання, сприяє синтезу білків. Дослідженнями встановлено, що вміст рухомих сполук купруму у варіантах досліду без вапнування становив 1,33–1,36 мг/кг ґрунту і зменшувався за внесення мінеральних добрив (рис. 3).

Також цю залежність можна описати рівнянням регресії:

$$y = -0,78x + 5,636 \text{ (Київська обл.)}; \quad (3)$$

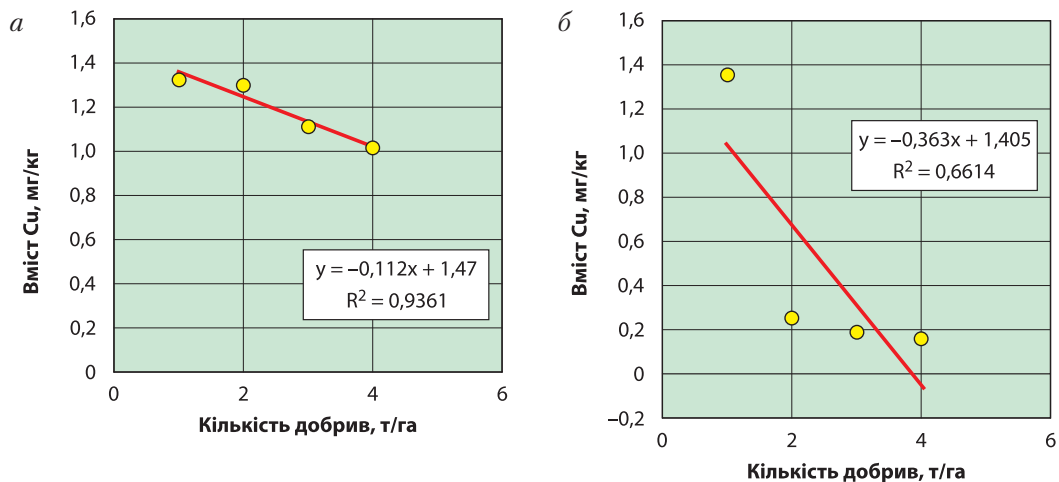
$$y = -1,682x + 6,1857 \text{ (Вінницька обл.)}, \quad (4)$$

де  $y$  – вміст рухомих сполук купруму в ґрунті, мг/кг;  $x$  – обмінна кислотність ґрунту, од. рН. Множинний коефіцієнт детермінації регресії, який сягає  $R^2 = 0,9081$  та  $R^2 = 0,5585$  для досліджуваних ділянок відповідно, вказує на значну й помірну відповідно залежність між цими показниками.

Отже, потреба у застосуванні мікродобрив набуває дедалі більшого значення, але, розраховуючи обсяги їх внесення, важливо враховувати винос хімічних елементів сільськогосподарськими культурами і їх баланс у сівозміні. Відомо, що лише за умови збалансованого внесення макро- і мікроелементів у ґрунт, забезпечуючи рослини необхідними елементами живлення, можна розраховувати на отримання високого врожаю.

Лісостеп, зокрема Київська та Вінницька обл. є одними із найбільших регіонів – виробників зерна в Україні.

На формування врожайності пшениці озимої великий вплив мають природно-кліматичні умови, культура землеробства, агротехніка та технологія вирощування культури, внесення добрив тощо. Визначальним чинником за отримання високих стабільних урожаїв зерна культури є, на-



**Рис. 3.** Кореляційна залежність вмісту  $\text{Cu}^{2+}$  у ґрунтах Лісостепу від внесення мінеральних добрив: а – чорнозем типовий (Київська обл.); б – сірі опідзолені (Вінницька обл.)

самперед, забезпечення рослин елементами живлення та водою [21; 22].

У зоні Лісостепу спостерігається доволі висока ефективність внесення добрив. Норми та співвідношення елементів живлення у них залежать від типу ґрунту, його зволоження та попередника. Найкраще на всіх ґрунтах зони вносити повне мінеральне добриво. Так, на чорноземах та сірих опідзолених ґрунтах у складі повного добрива доцільно вносити стільки ж азоту, скільки й фосфору, або трохи більше, ніж фосфору і калію.

У табл. 2 наведено результати досліджень залежності врожайності пшениці озимої від доз добрив, що застосовуються.

Як показують дослідження, на врожайність пшениці озимої впливають дози вне-

сених мінеральних добрив і післядія органічних добрив, а також погодні умови.

На контрольному варіанті Київської обл. (чорнозем типовий) врожайність пшениці озимої сягала 36,7 ц/га, за внесення  $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{60}$  – 44,7 т/га, збільшення контролю становило 8,0 ц/га. Післядія від внесення органічних добрив у дозі 40 т/га підвищила врожайність у 1,1 раза порівняно з контролем.

Внесення мінеральних добрив і натомисть післядії гною найефективніше позначається на врожайності пшениці озимої. Так, за внесення одинарної дози мінеральних добрив ( $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{60}$ ) на фоні післядії 40 т/га гною приріст сягав 8,6 ц/га.

У Вінницькій обл. (сірий опідзолений ґрунт) урожайність пшениці озимої була

**Таблиця 2. Результати врожайності пшениці озимої за внесення добрив**

Схема дослідю	Київська обл.		Вінницька обл.	
	урожайність, ц/га	приріст, ц/га	урожайність, ц/га	приріст, ц/га
Контроль (без добрив)	36,7	–	38,0	–
$\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{60}$	44,7	8,0	53,0	15,0
Гній 40, т/га	41,3	4,6	43,0	5,0
$\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{60}$ + гній 40, т/га	45,3	8,6	63,0	25,0

вищою і на контрольному варіанті сягала 38,0 ц/га. Внесення мінеральних добрив підвищувало врожайність до 53,0 ц/га. Післядія органічного добрива мало впливало на підвищення врожайності культури щодо варіанта без добрива, де прирости становили 5,0 ц/га за врожаю 43,0 ц/га. Також застосування одинарної дози мінеральних добрив на фоні післядії гною дало змогу отримати 63,0 ц/га.

Загалом, інтенсивна технологія вирощування пшениці озимої передбачає використання разом із добривами хімічних засобів захисту рослин. Комбіноване їх застосування посилює дію кожного з елементів технології і сприяє одержанню стабільних урожаїв високоякісного зерна.

### ВИСНОВКИ

У всіх досліджуваних локалітетах не зафіксовані перевищення гранично допустимих концентрацій для важких металів. Установлено, що в компонентах систем «грунт–рослина» вміст металів зменшується в ряду:  $Zn^{2+} > Cu^{2+}$ .

Спостерігалася лінійна залежність вмісту важких металів від кількості добрив у ґрунтах. Коефіцієнти кореляції для  $Zn^{2+}$  та  $Cu^{2+}$  у ґрунтах Київської та Вінницької обл. різняться, що, вочевидь, пов'язано з різним ступенем антропогенного навантаження на території дослідження.

Однією із незмінних культур зернового клину Лісостепу України залишається пшениця озима. Внесення мінеральних добрив призводить до збільшення вмісту токсичних елементів у зерні пшениці озимої, але їхній рівень менший від гранично допустимої концентрації. Доведено, що зростання рівнів урожайності пшениці озимої зумовлена постійним підвищенням норм внесення мінеральних добрив, яка може викликати накопичення токсикантів у зерні, і відповідно, погіршити їх екологічну безпечність. Тому для усунення наслідків нестачі ВМ у ґрунтах і для отримання зерна пшениці озимої з оптимальним вмістом  $Zn^{2+}$  та  $Cu^{2+}$  необхідно забезпечити систематичне надходження елементів із добривами у позакореневе живлення.

Встановлено, що загальна врожайність досліджуваних культур залежала передусім від системи удобрення і менше — від обробітки ґрунту. Найменший вихід зернових одиниць і врожайність отримано на варіанті без добрив, при цьому різниця між обробітками ґрунту не перевищувала 5%. Застосування органо-мінеральної системи удобрення підвищує загальну врожайність порівняно з контролем на 41–46%, а істотної різниці від використання різних обробіток ґрунту не отримано.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Вибрані наукові праці акад. В.І. Вернадського. Т. 7., кн. 1. Праці з геохімії та радіогеології / за ред. Соболевич Е.В., Долін В.В. Київ, 2012. 824 с.
2. Гришко В.М. Важкі метали: надходження в ґрунти, транслокація у рослинах та екологічна безпека. Донецьк: Донбас, 2012. 304 с.
3. Сторова Т.М. Біогеохімічні пріоритети агроекологічних досліджень. *Агроекологічний журнал*. 2017. № 1. С. 28–35. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2017.174214>
4. Добровольский В.В. Основы биогеохимии: учеб. пособ. Москва: Высш. шк., 1998. 413 с.
5. Макаренко Н.А. Агроекологічна оцінка мінеральних добрив за впливом на ґрунтову систему: автореф. дис. ... д-ра с.-г. наук: 03.00.16. Київ, 2002. 28 с.
6. Топчій Н.М. Вплив важких металів на фотосинтез. *Фізіологія і біохімія культурних рослин*. 2010. Вип. 42 (2). С. 95–106.
7. Копілевич В.А., Войтенко Л.В. Методичні рекомендації щодо одержання та використання нових комплексних сполук, що містять аміачний азот, фосфати та мікроелементи (мідь, цинк, кобальт, нікель) для живлення рослин і тварин. Київ: НУБіП, 2009. 33 с.
8. Дмитрук Ю.М., Бербець М.А. Основи біогеохімії: навч. посіб. Чернівці: Книги–XXI, 2009. 288 с.
9. Шервуд М.А. Применение удобрений. Киев: Пресс-Курьер Украина, 2014. 154 с.
10. Лихочвор В.В. Мінеральні добрива та їх застосування. Львів: НВФ «Українські технології», 2008. 312 с.
11. Марчук Г.П., Біла Т.А. Геохімія довкілля: навч. посібн. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2013. 242 с.
12. Ткачук О.П., Яковець Л.А. Динаміка виробництва зерна та внесення мінеральних добрив під зернові культури у Вінницькій області. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграр-*



- ного університету. 2017. Вип. 6 (1). С. 141–148.
13. Патики В.П., Макаренко Н.А., Моклячук Л.І. та ін. Агроекологічна оцінка мінеральних добрив та пестицидів: моногр. / за ред. В.П. Патики. Київ: Основа, 2005. 300 с.
  14. Бондарева О.Б., Коноваленко Л.І., Мілігула О.М. Міграція та накопичення свинцю і кадмію у ґрунті і рослинах під впливом добрив. *Агроекологічний журнал*. 2012. № 3. С. 20–23.
  15. Жеребна Л.О. Вплив важких металів, що містяться в мінеральних добривах, на якість рослиницької продукції. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2001. Вип. 61. С. 193–197.
  16. Козьякова Н.О., Макаренко Н.А., Кавецький В.М. Міграція важких металів у системі «ґрунт–рослина» — екотоксикологічний критерій їх небезпечності. *Науковий вісник НАУ*. 2000. Вип. 32. С. 365–370.
  17. Войтенко Л.В. Хімія з основами біогеохімії: навч. посіб. Київ: Наукова столиця, 2019. 400 с.
  18. Єгорова Т.М. Фоновий уміст важких металів як екологічна характеристика ґрунтів Лісостепу. *Агроекологічний журнал*. 2014. № 1. С. 28–34.
  19. Скрильник Є.В., Кутова А.М., Гетманенко В.А. Значення показників родючості ґрунту в оптимізації мікроелементного живлення рослин. *Екологічні науки*. 2020. № 1 (20). Т. 2. С. 65–68.
  20. Нестерова А.Н. Действие тяжелых металлов на корни растений. *Биологические науки*. 1989. № 9. С. 72–86.
  21. Гришко В.М., Сыщиков Д.В. Функционирование глутатионзависимой антиоксидантной системы и устойчивость растений при действии тяжелых металлов и фтора. Киев: Наукова думка, 2012. 238 с.
  22. Гуральчук Ж.З. Механизмы устойчивости растений к тяжелым металлам. *Физиология и биохимия культурных растений*. 1994. № 26 (2). С. 107–117.

## REFERENCES

1. Sobotovych, E.V. & Dolin, V.V. (Eds.) (2012). *Vybrani naukovi pratsi akad. V.I. Vernadskoho [Selected scientific works of acad. V.I. Vernadskiy]*. (T. 7, kn. 1). Kyiv [in Ukrainian].
2. Hryshko, V.M. (2012). *Vazhki metaly: nadkhodzhennia v ґrunty, translokatsiia u roslynakh ta ekolohichna bezpeka [Heavy metals: entry into soils, translocation in plants and environmental safety]*. Donetsk: Donbas [in Ukrainian].
3. Egorova, T.M. (2017). Bioheokhimichni priorityety ahroekolohichnykh doslidzhen [Biogeochemical priorities of agroecological research]. *Ahroekolohichnyi zhurnal — Agroecological journal*, 1, 28–35. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2017.174214> [in Ukrainian].
4. Dobrovolsky, V.V. (1998). *Osnovy biogeokhimii [Fundamentals of biogeochemistry]*. Moscow [in Russian].
5. Makarenko, N.A. (2002). Ahroekolohichna otsinka mineralnykh dobryv za vplyvom na ґruntovu systemu [Agro-ecological evaluation of mineral fertilizers according to the impact on the soil system]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
6. Topchii, N.M. (2010). Vplyv vazhkykh metaliv na fotosyntezy [Influence of heavy metals on photosynthesis]. *Fiziologiya i biokhimiya kulturnykh rastenyi — Physiology and biochemistry of cultivated plants*, 42 (2), 95–106 [in Ukrainian].
7. Kopilevich, V.A. & Voitenko, L.V. (2009). *Metodychni rekomendatsii shchodo oderzhannia ta vykorystannia novykh kompleksnykh spolyk, shcho mistiat amiachnyi azot, fosfaty ta mikroelementy (mid, tsynk, kobalt, nikel) dlia zhyvlyennia roslyn i tvaryn [Methodical recommendations for obtaining and using new complex compounds containing ammonia nitrogen, phosphates and trace elements (copper, zinc, cobalt, nickel) for plant and animal nutrition]*. Kyiv: NUBiP [in Ukrainian].
8. Dmytruk, Yu.M. & Berbets, M.A. (2009). *Osnovy biogeokhimii [Basics of biogeochemistry]*. Chernivtsi: Knyhy–XXI [in Ukrainian].
9. Sherwood, M.A. (2014). *Primenenie udobreniy [Application of fertilizers]*. Kyiv: Press-Kurer Ukraina [in Russian].
10. Lyochvor, V.V. (2008). *Mineralni dobryva ta yikh zastosovannia [Mineral fertilizers and their application]*. Lviv: Ukrainski tekhnolohii [in Ukrainian].
11. Marchuk, H.P. & Bila, T.A. (2013). *Heokhimiia dovkillia [Geochemistry of the environment]*. Kherson: OLDI-PLYUS [in Ukrainian].
12. Tkachuk, O.P. & Yakovets, L.A. (2017). Dynamika vyrobnytstva zerna ta vnesennia mineralnykh dobryv pid zernovi kultury u Vinnytskii oblasti [Dynamics of grain production and application of mineral fertilizers to grain crops in Vinnytsia region]. *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho ahroaranoho universytetu — Collection of scientific works of the Vinnytsia National Agrarian University*, 6 (1), 141–148 [in Ukrainian].
13. Palyka, V.P. (Ed.), Makarenko, N.A., Moklyachuk, L.I. et al. (2005). *Ahroekolohichna otsinka mineralnykh dobryv ta pestytsydiv [Agroecological assessment of mineral fertilizers and pesticides]*. Kyiv: Osнова [in Ukrainian].
14. Bondareva, O.B., Konovalenko, L.I. & Miligula, O.M. (2012). Migrantsiia ta nakopychennia svyntsiu i kadmiu u ґrunty i roslynakh pid vplyvom dobryv [Migration and accumulation of lead and cadmium in soil and plants under the influence of fertilizers]. *Ahroekolohichnyi zhurnal — Agroecological journal*, 3, 20–23 [in Ukrainian].
15. Zherebna, L.O. (2001). Vplyv vazhkykh metaliv, shcho mistiatsia v mineralnykh dobryvakh, na yakist roslynnytskoi produktsii [The influence of heavy metals contained in mineral fertilizers on the quality of crop production]. *Ahrokhimiia i ґruntovnavstvo — Agrochemistry and soil science*, 61, 193–197 [in Ukrainian].
16. Kozyakova, N.O., Makarenko, N.A. & Kavetskyi, V.M. (2000). Migrantsiia vazhkykh metaliv u systemi «ґрунт–roslyna» — ekotoksykolohichnyi kryterii yikh nebez-

- pechnosti [Migration of heavy metals in the «soil-plant» system is an ecotoxicological criterion of their danger]. *Naukovyi visnyk NAU — Scientific Bulletin of NAU*, 32, 365–370 [in Ukrainian].
17. Voytenko, L.V. (2019). *Khimiia z osnovamy bioheokhimii [Chemistry with the basics of biogeochemistry]*. Kyiv: Naukova stolitsia [in Ukrainian].
18. Egorova, T.M. (2014). Fonovyi umist vazhkykh metaliv yak ekolohichna kharakterystyka gruntiv Lisostepu [The background content of heavy metals as an ecological characteristic of forest-steppe soils]. *Ahroekolohichniy zhurnal — Agroecological journal*, 1, 28–34 [in Ukrainian].
19. Skrylnyk, E.V., Kutova, A.M. & Hetmanenko, V.A. (2020). Znachennya pokaznykiv rodyuchosti gruntu v optymizatsiyi mikroelementnoho zhyvlennya roslin [The value of soil fertility indicators in the optimization of plant micronutrient nutrition]. *Ekolohichni nauky — Environmental sciences*, 1 (20), 2, 65–68 [in Ukrainian].
20. Nesterova, A.N. (1989). Deystvie tyazhelykh metallov na korni rasteniy [Effect of heavy metals on plant roots]. *Biologicheskie nauki — Biological Sciences*, 9, 72–86 [in Russian].
21. Grishko, V.M. & Syshchikov, D.V. (2012). *Funktsionirovanie glutationzavisimoy antioksidantnoy sistemy i ustoychivost rasteniy pri deystvii tyazhelykh metallov i flora [Functioning of the glutathione-dependent antioxidant system and plant resistance to the action of heavy metals and fluorine]*. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].
22. Guralchuk, Zh.Z. (1994). Mekhanizmy ustoychivosti rasteniy k tyazhelym metallam [Mechanisms of plant resistance to heavy metals]. *Fiziologiya i biokhimiya kulturnykh rasteniy — Physiology and biochemistry of cultivated plants*, 26 (2), 107–117 [in Russian].

Стаття надійшла до редакції журналу 17.10.2022

---