

БІОГЕОХІМІЧНА, ФІЗІОЛОГІЧНА АДАПТИВНІСТЬ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ (*TRITICUM L.*) ЗА ВПЛИВУ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

І.В. Шумигай¹, В.В. Конішук¹, В.В. Мороз², Н.М. Манішевська³

¹ Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: innashum27@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0432-2651
e-mail: konishchuk_vasy@ukr.net; ORCID: 0000-0003-4115-5642

² Львівський національний університет природокористування (м. Львів, Україна)
e-mail: vera_toroz@ukr.net; ORCID: 0000-0002-1457-4641

³ Відокремлений структурний підрозділ «Боярський фаховий коледж
Національного університету біоресурсів і природокористування України»
(м. Боярка-2, Київська обл., Україна)
e-mail: manishevskan@ukr.net

В останні десятиліття основними об'єктами біогеохімічних досліджень стали території агроекосистем, промислових міст та прилеглих до них сільськогосподарських земель. Проблема забруднення довкілля полутантами, хімічними сполуками мікроелементного складу є однією з найважливіших проблем екологічної безпеки. Наразі сучасними дослідженнями вчених токсичні важкі метали розглядаються як найнебезпечніші забруднювачі ґрунтів, води і рослинної продукції сільського господарства. До того ж, найактивнішими агентами забруднення є їх рухомі хімічні форми, які здатні переходити з твердих фаз у ґрунтові, водні розчини і поглинатися рослинами та іншими організмами. Зернові культури мають здатність вбирати поживні елементи як через кореневу систему, так і листковий апарат, поверхню стебла. Крім того, мікроелементи беруть участь у багатьох фізіологічних і біохімічних процесах у рослин, зокрема прискоренні розвитку, цвітінні, заплідненні та плодоутворенні, обміні речовин тощо. Оцінено кількісні характеристики міграції важких металів із ґрунту в рослини впродовж 2022 р. для досліджуваних територій Лісостепу України, зокрема у Київській та Вінницькій обл. Були здійснені комплексні дослідження з визначення впливу Zn^{2+} та Cu^{2+} на фітокомпоненти екосистем. При цьому отримано дані щодо впливу солей цинку й міді на проростання насіння та ріст проростків пшениці озимої. Доведено залежність концентрації солей на проростання насіння зернових культур. Досліджені важкі метали мають мутагенну, токсичну дію та впливають на інтенсивність біохімічних процесів. Встановлено, що за екотоксикологічним критерієм біокумуляції у системі «ґрунт — рослина» досліджувані мікроелементи можна розташувати у такий ряд: $Cu^{2+} > Zn^{2+}$. Отже, під час проведення експериментальних і теоретичних досліджень представлено порівняльний аналіз щодо накопичення важких металів у органах *Triticum aestivum* (*vulgare*) L. (пшениця м'яка (звичайна)). За результатами польового досвіду встановлені відмінності у розподілі Zn^{2+} та Cu^{2+} по органах пшениці озимої форми, вирощеної на чорноземі типовому та сірому опідзоленому ґрунтах. З'ясовано, що основну бар'єрну функцію інактивації досліджуваних важких металів виконують коріння рослин.

Ключові слова: *Triticum aestivum* (*vulgare*) L., Zn^{2+} , Cu^{2+} , біокумуляція, міграція хімічних елементів, ґрунт, озима рослина.

ВСТУП

Постійний рух і переміщення хімічних елементів, сполук у природі відбувається за певними періодами, завершується циклом етапів накопичення, переходу у процесі міграції. Остання у ландшафтах має

біогенний і механічний характер, обумовлений біогенною концентрацією поживних елементів і механічним розсіюванням хімічних елементів, у т. ч. важких металів [1; 2].

Наразі у ґрунтознавстві та агрохімії, фізіології інших наук велику увагу приді-

ляють вивченню вмісту і форм сполук хімічних елементів у ґрунтах і живих об'єктах, вивченню їх впливу на розвиток живих організмів і розробці прийомів регулювання режиму у ґрунтах. Важкі метали (ВМ) мають важливе значення за формування рослин та впливають на розвиток живих організмів загалом. Так, цинк є каталізатором у багатьох ферментних системах, а мідь є редокс-активним перехідним металом, який також необхідний для рослин [3].

У процесі еволюції рослин у кожного виду сформувалися певні генетично закріплені потреби в концентрації хімічних елементів. Біологічна вибірковість у поглинанні й накопиченні елементів, передусім, визначає елементний хімічний склад рослин, який вважають важливою систематичною ознакою. Разом із тим, ґрунт, як основа екотопу, значною мірою впливає на вміст макроелементів (С, О, Н, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe) та мікроелементів (Mn, Cu, B, Co, Zn, Mo, J) у рослинах, які на ньому зростають. Однак ступінь забезпеченості рослин поживними речовинами залежить не лише від кількості їх у ґрунті, але й від форми, в якій вони перебувають. З формою поживних елементів пов'язана їх доступність рослинам. Для біоти велике значення має не весь ґрунтовий фонд хімічних елементів, а вміст їх рухомих фізіологічно важливих форм (водорозчинні, кислоторозчинні та ін.).

Надходження хімічних елементів у рослини відбувається за рахунок активного контакту коренів із частками і мінералами ґрунту шляхом так званого контактного поглинання. Його сутність полягає в обміні виділених коренями рослин йонів водню — органічних кислот на йони металів. Інтенсивність поглинання рослинами йонів металів із твердої фази може змінюватись в сотні і тисячі разів. Залежить вона від фізико-хімічних властивостей ґрунту (типу і гранулометричного складу, вмісту органічних речовин, рН та ін.) і особливостей рослини (морфоанатомічних, фізіолого-біохімічних тощо) [4–6].

Слід зазначити, що поглинуті з ґрунту хімічні елементи розподіляються в організ-

мі рослини не рівномірно, що зумовлено фізіологічною роллю кожного з них, специфікою біохімічних процесів у різних частинах рослини та концентрацією в ґрунті. Негативні ефекти підвищеного вмісту ВМ у ґрунтах посилюються тривалими періодами їх напіввиведення, які вимірюються у низці випадків сотнями та тисячами років. Нестача мікроелементів у ґрунті, як і надлишок, пригнічує ріст і розвиток рослин, знижує їх стійкість до несприятливих умов навколишнього природного середовища та хвороб. Виділяють кілька біологічних груп рослин, що характеризуються підвищеною потребою в тих або інших мікроелементах. Так, зернові насамперед реагують на мідь, кукурудза — на цинк, соняшник — на бор і мідь, ріпак — на бор та марганець.

Мета роботи — екологічна оцінка фітотоксичності важких металів у системі «ґрунт — рослина», визначення особливостей накопичення важких металів у різних органах пшениці озимої (*Triticum aestivum* (*vulgare*) L.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Біогеохімія є науково-практичною частиною вчення В.І. Вернадського про біосферу [7], що остаточно сформувалася у 80-х рр. 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 їй 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.

Загалом, екологічні аспекти негативного впливу важких металів на довкілля 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. Учні В.І. Вернадського

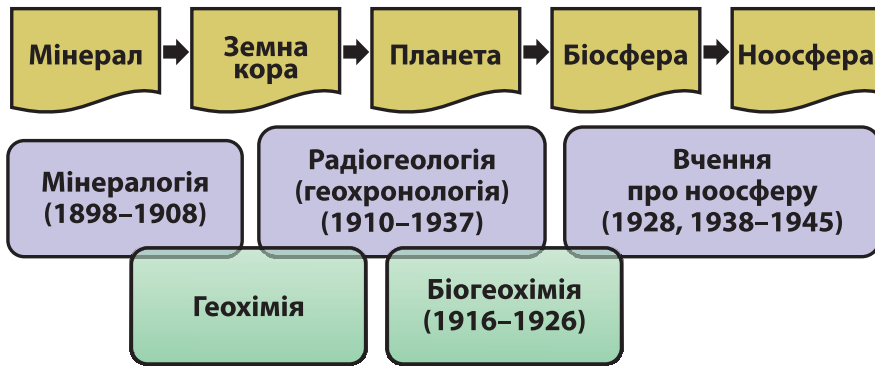


Рис. 1. Генезис наукових інтересів В.І. Вернадського [8]

обґрунтували і розвинули прикладні напрями біогеохімії, в основу яких покладено взаємообумовленість ланцюга, зазначеного на рис. 1 [9–11].

Сучасне рослинництво неможливе без регулювання кількості поживних хімічних речовин, що надходять у трофічних ланцюгах до культурних рослин. Нормальний розвиток рослинних організмів потребує наявності як макро-, так і мікроелементів. Вищеназвані хімічні елементи мають між собою тісний взаємний зв'язок. Їх важливе фізіологічне значення для життєдіяльності рослин висвітлено і в сучасних наукових роботах, наприклад, Погорелова М.Г. та Господаренка Г.М. [12; 13].

Щодо міграції важких металів у ґрунтового профілі та переходу у зернові культури присвячено багато наукових робіт, однак повного усвідомлення, пояснення причинно-наслідкових зв'язків цих процесів і визначення їх кількісних параметрів, зокрема в умовах Лісостепу України, на жаль, нині недостатньо.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Методологія екологічного нормування вмісту ВМ у системі «ґрунт–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 Лісостепу, зокрема на території ДГ «Чабани», що знаходиться у Фастівському р-ні Київської обл., а також у межах науково-дослідного господарства «Агрономічне» (Вінницький р-н, Вінницька обл.).

Для прогнозу транслокації, біокумуляції та вивчення впливу концентрацій важких металів на рослини, у 2022 р. було проведено серію вегетаційних і нульових дослідів із зерновими культурами, які передбачають штучне внесення Zn^{2+} та Cu^{2+} у чорнозем типовий та сірий опідзолений у різних кількостях.

Вважається, що культурні злаки загалом менш стійкі до дії важких металів, ніж дикорослі, проте і серед них виділяються види із високим ступенем стійкості. Як тест-культура розглядалася пшениця озима. Повторність варіантів дослідів — чотирикратна.

Підготовку ґрунту та наповнення посудин здійснювали згідно з методикою для вегетаційних дослідів за [14].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Стійкість рослин до важких металів прийнято розглядати як їхню здатність рости, розвиватися та формувати насіння у присутності високих концентрацій цих елементів у навколишньому середовищі. Численними дослідженнями доведено, що

адаптація рослин до впливу ВМ пов'язана з певними змінами, що відбуваються на різних рівнях організації рослинного організму, серед яких важливу роль відіграють зміни, що відбуваються на рівні фізіологічних процесів. До того ж, багато фізіологічних показників є добрими критеріями при оцінці металостійкості окремих видів (сортів, генотипів) рослин.

Також було встановлено низку фітооб'єктів із лісостепової біокліматичної зони України (в середньому 25–30 зразків одного виду рослинності), які підлягали техногенному впливу. Оскільки Pb, Sr, Zn є індикаторами техногенного впливу різних галузей промисловості, основну увагу нами було зосереджено саме на Zn^{2+} та Cu^{2+} .

Проростання насіння є вкрай важливим вегетативним етапом у житті рослин, це перехід від початкової фази розвитку до наступної. Супроводжується активацією геному та різних фізіолого-біохімічних процесів. Проростання насіння та початкове зростання проростків багато в чому визначають подальший розвиток рослин і, зрештою, їх продуктивність [15].

У результаті дослідження було встановлено, що на 3-тю добу після посіву відсоток пророслого насіння вивчених злаків (пшениці озимої) помітно зменшувався (порівняно з контрольним варіантом) зі збільшенням концентрації ВМ у субстраті. Однак уповільнення проростання мала тимчасовий характер, і на 7-му добу схо-

жість насіння злаків і в контрольному, і в дослідних варіантах становила 100% чи наближалася до цього значення.

Зростання кореня та пагона. Відомо, що у високих концентраціях важкі метали надають інгібуючу дію на зростання рослин, ступінь якого залежить від токсичності металу, його концентрації, а також видової приналежності рослин [2; 16]. У наших дослідженнях також виявився негативний вплив Cu^{2+} та Zn^{2+} на зростання культурних злаків, яке посилювалося зі збільшенням їх концентрації у субстраті. До того ж, переважно в *Triticum aestivum* (*vulgare*) L. відбулося зростання коріння (рис. 2). Це зумовлене тим, що останній є першим бар'єром на шляху транспорту ВМ із ґрунту в рослину і саме корінь бере на себе основну функцію по їх акумуляції та детоксикації.

Уповільнення зростання пагона було виражено меншою мірою (рис. 3). Зокрема, під час дії міді у концентрації 160 мг/кг субстрату довжина кореня пшениці озимої у Київській обл. знижувалася більш ніж на 80% щодо контролю та на 70% у Вінницькій обл., тоді як висота пагона лише на 60 і 50% відповідно. Аналогічні дані отримані за вмісту цинку.

Отже, захисні механізми та бар'єри, що функціонують на рівні клітин та тканин кореня, не в змозі повністю запобігти попаданню ВМ у пагони рослин. Однак вплив ВМ на зростання листків пагонів злаків, що формуються на початку вегетації, та

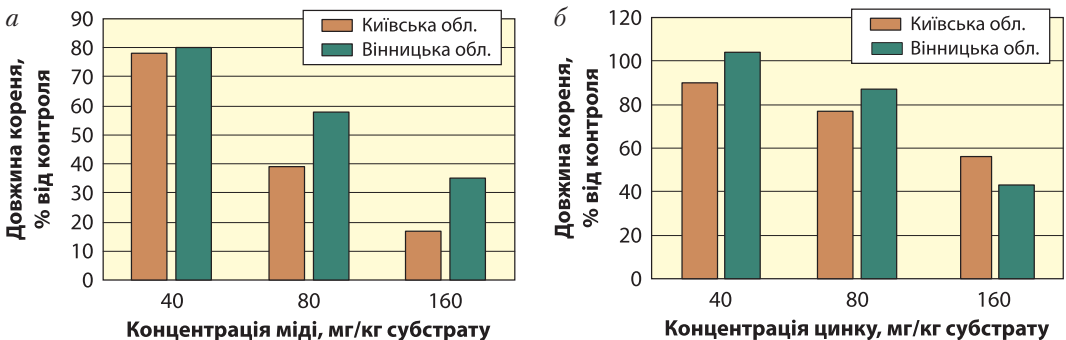


Рис. 2. Графічні моделі впливу важких металів на довжину кореня проростків пшениці озимої: *a* — мідь; *б* — цинк

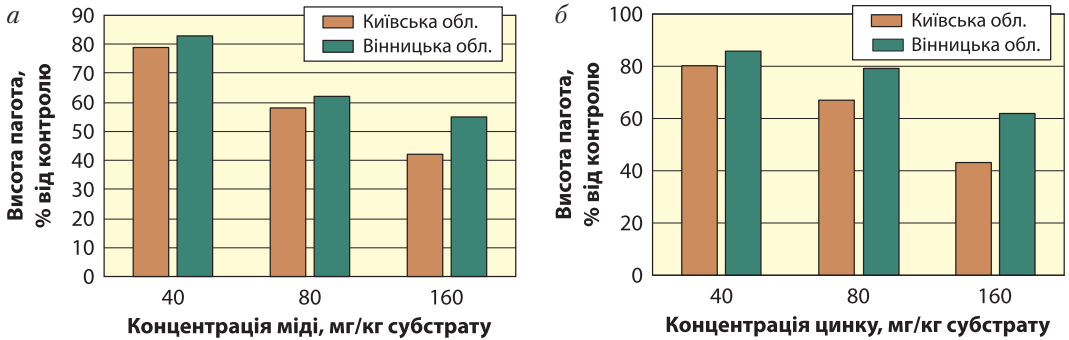


Рис. 3. Графічні моделі впливу важких металів на висоту пагонів проростків пшениці озимої: *а* – мідь; *б* – цинк

становлять більшу частину надземної біомаси, забезпечує високу продуктивність рослин.

Наші дослідження засвідчили, що за наявності ВМ площа листкової пластинки зменшувалася значно меншою мірою, ніж довжина кореня або висота пагона (рис. 4).

У цьому видових відмінностей спостерігалось мало.

Причини уповільнення зростання листкової пластинки пшениці озимої за наявності надлишку важких металів у середовищі, ймовірно, пов'язані з безпосереднім впливом металів на фізичний розподіл клітин листків, інгібуванням клітинного метаболізму, а також з їхньою опосередкованою дією на фізіологічні процеси. Так, більшість вчених вважає, що зменшення розмірів листків за наявності ВМ є ре-

зультатом інтегральних змін низки фізіологічних процесів, і насамперед, фотосинтезу.

На поглинання, міграцію та фізико-хімічний вплив ВМ у зернових культурах впливають також погодно-кліматичні, едафічні чинники.

Фенологічний розвиток. Здійснені нами фенологічні спостереження свідчать, що за наявності міді на 10-ту добу після посіву візуальних відмінностей між рослинами контрольного та дослідних варіантів у регіонах із використанням концентрації міді 40 і 80 мг/кг субстрату немає: всі рослини знаходяться у фазі проростків. І лише при дії металу у найбільшій концентрації (160 мг/кг субстрату) виявилось деяке відставання у термінах настання фенофази: 60% рослин пшениці озимої у Київській обл. та 70% у Вінницькій обл. перебували

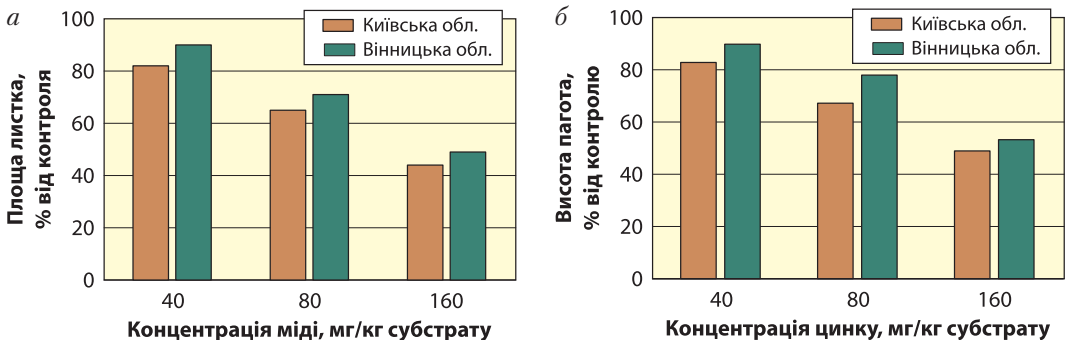


Рис. 4. Графічні моделі впливу важких металів на площу листкової пластинки 1-го листка у проростків пшениці озимої: *а* – мідь; *б* – цинк

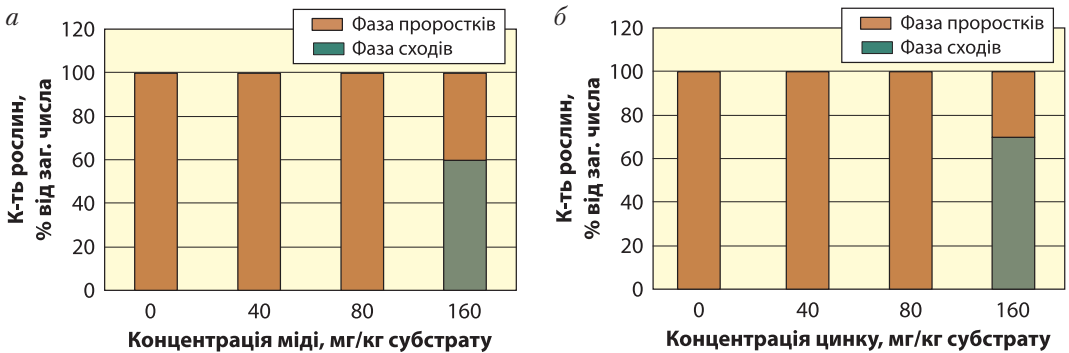


Рис. 5. Графічні моделі впливу Cu^{2+} на темпи фенологічного розвитку пшениці озимой: а – Київська обл.; б – Вінницька обл.

Примітка: 10-та доба після посіву.

у фазі проростків, тоді як інші – ще у фазі сходів (рис. 5).

Цинк у вивчених нами концентраціях не впливав на фенологічний розвиток рослин. На підставі проведених дослідів можна зробити висновок, що у використаних нами концентраціях ВМ візуально визначити уповільнення темпів розвитку злаків доволі важко, а ґрунтуючись лише на фенологічних спостереженнях не можна отримати достовірних, аргументованих даних впливу хімічних елементів на онтогенез рослин.

Насіннева продуктивність. Негативна дія ВМ на рослини проявляється у зниженні врожаю насіння (плодів). Однак такі дані маловивчені, хоча саме здатність рослин формувати насіння у несприятливих умовах довкілля є однією з найважливіших складових їхньої стійкості. Більш стійкими можуть вважатися ті рослини, які здатні не тільки виживати в екстремальних умовах, але й успішно завершувати повний цикл розвитку [4; 17].

У наших дослідженнях *Triticum aestivum* (*vulgare*) L. у Ліостепу навіть за наявності найбільш високих концентрацій ВМ змогли сформувати насіння. До того ж, було виявлено негативний вплив ВМ на деякі елементи насінневої продуктивності культури. Так, за дії металів у рослин знижувалися довжина та біомаса суцвіття, зменшувалися число зерен у колосі (волоті)

та маса зернівки. Крім того, за наявності Cu^{2+} (рис. 6) зниження біомаси суцвіття в обох дослідних варіантах більшою мірою визначалося зменшенням маси зернівки, тоді як за наявності та Zn^{2+} (рис. 7) – числом зерен.

Вищі концентрації накопичення міді в насінні зернових культур, ймовірно, зумовлені тим, що цей мікроелемент здатний зв'язуватися з білковими фракціями, і має тенденцію до нагромадження в репродуктивних органах рослин.

Вміст цинку в пшениці озимій не перевищував ГДК – 50 мг/кг і також як і мідь у більшості випадків накопичувався у насінні.

Загалом за вмістом ВМ в органах рослин утворюється наступний ряд за спаданням: «корінь > стебло > листок > плід або насіння». Однак для різних рослин цей порядок може дещо відрізнятись, оскільки більшість видів накопичує ВМ переважно в корінні.

Згідно із спостереженнями за ходом процесів росту та розвитку культурних злаків за наявності високих концентрацій міді та цинку в субстраті, виявили їхню високу стійкість до ВМ. Незважаючи на негативний вплив цих хімічних елементів на зростання апікальної меристеми стебла, значне зменшення в їх присутності розмірів кореня та пагона, а також утримання темпів органогенезу на ранніх етапах роз-

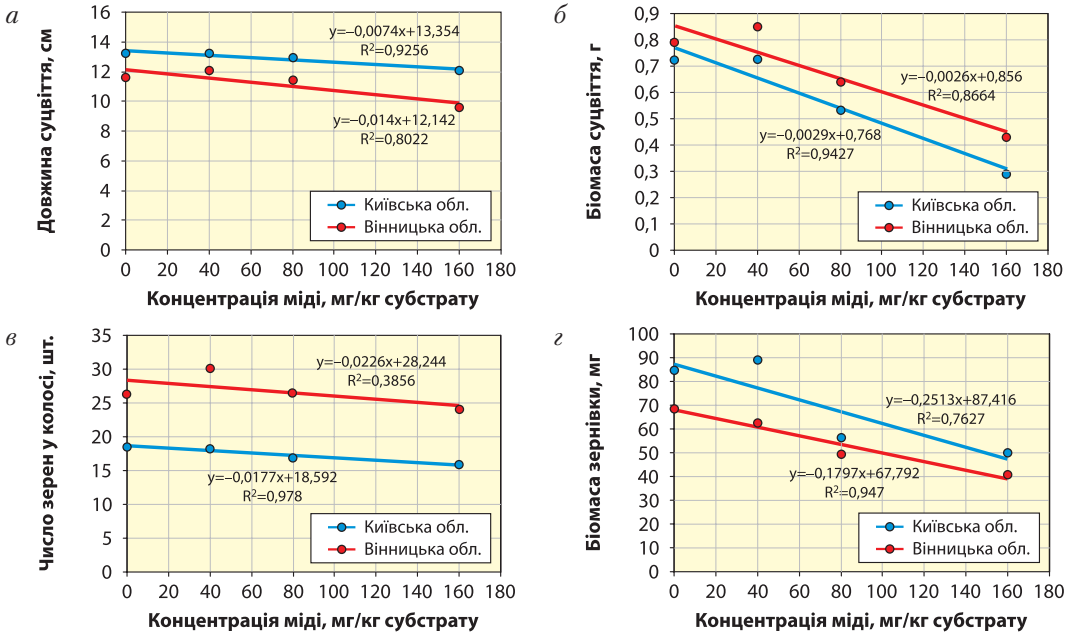


Рис. 6. Кореляційна залежність впливу Cu^{2+} на елементи насінневої продуктивності пшениці озимої: *а* – довжина суцвіття; *б* – біомаса суцвіття; *в* – кількість зерен у колосі; *г* – біомаса зернівки

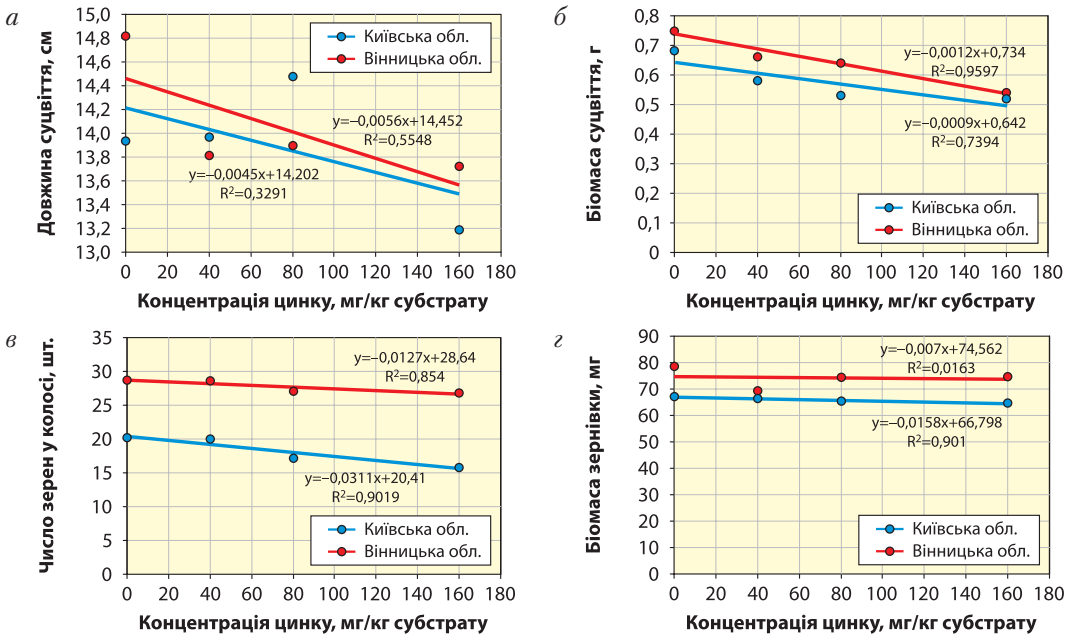


Рис. 7. Кореляційна залежність впливу Zn^{2+} на елементи насінневої продуктивності пшениці озимої: *а* – довжина суцвіття; *б* – біомаса суцвіття; *в* – кількість зерен у колосі; *г* – біомаса зернівки

витку, злаки виявилися здатними адаптуватися до цих умов і не тільки виростати тривалий час в умовах підвищених концентрацій металів у субстраті, а й переходити до генеративного розвитку та формувати насіння.

ВИСНОВКИ

Особливе значення у вуглеводному, білковому, фосфорному метаболізмі, каталітичних і регуляторних процесах належить важким металам, які є функціональними елементами, що входять до складу ферментів, вітамінів та інших біологічно активних речовин. Окрім того, важкі метали сприяють підвищенню імунітету рослин і беруть участь у формуванні врожайності та покращенні якості товарної продукції агропромислового комплексу, зокрема пріоритетної культури зернових — пшениці озимої. Недостатність Cu^{2+} , Zn^{2+} у ґрунті не викликає загибелі, відмирання рослин, але є причиною зниження швидкості й збалансованості протікання життєвих процесів. До того ж, зернові культури не можуть повністю, ефективно реалізувати свій потенціал, що девальвує кількісні та якісні показники врожаю пшениці. Надмірна концентрація важких металів нега-

тивно впливає на ріст, розвиток зернових рослин та їх екобезпечність споживання.

Доведено, що в умовах забруднення агроecosистеми найінтенсивнішою біокумуляцією характеризується Cu^{2+} , а меншою — Zn^{2+} , що дає змогу прогнозувати рухомість металів у системі «ґрунт — рослина». Так, на обох досліджуваних ґрунтах Лісостепу, зокрема чорнозему типового та сірого опідзоленого в області переходу від контролю до забруднення інтенсивність біокумуляції Cu^{2+} і Zn^{2+} зменшується. Встановлено ряд інтенсивності поглинання металів пшениці озимої, що має такий вигляд: $\text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$.

Отже, заходи щодо планування внесення мікродобрив доцільно проводити з урахуванням забезпеченості ґрунтів мікроелементами. Згідно з діючими нормативними документами, оцінка вмісту рухомих форм Zn^{2+} та Cu^{2+} у ґрунті дасть можливість визначити дефіцит певних хімічних елементів на сільськогосподарських землях і своєчасно організувати їх внесення. Важливим аспектом еко-, біобезпеки є постійний фоновий моніторинг вмісту, фіксація закономірностей міграції та накопичення важких металів як у ґрунті, так і в рослинах (зокрема пшениці) агроecosистем Лісостепу України.

ЛІТЕРАТУРА

1. Марчук Г.П., Біла Т.А. Геохімія довкілля: навч. посібн. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2013. 242 с.
2. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. Third edition. CRC Press. 2001. 412 p.
3. Шумигай І.В., Єрмішев О.В., Манішевська Н.М. Біогеохімічна специфіка у Лісостеповій зоні країни. *Збалансоване природокористування*. 2022. № 4. С. 82–90. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2022.275036>
4. Єгорова Т.М., Шумигай І.В., Сапсай Т.П. Біогеохімічні ланцюги поживних елементів та система оцінки їх агротехногенних деформацій: метод. реком. / за ред. О.І. Фурдичка. Київ: ТОВ «ДІА», 2020. 26 с.
5. Шумигай І.В., Коніщук В.В., Душко П.М. Біогеохімічні особливості важких металів агроecosистем Лісостепу України. *Агроecологічний журнал*. № 4. 2022. С. 105–114. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2022.273256>
6. Разумова С.Т. Екологія рослин з основами ботаніки та фізіології: конспект лекцій. Одеса, 2013. 197 с. URL: http://coe.osenu.org.ua/wp-content/uploads/2014/04/14-/Razumova_Ekologiya_roslin.pdf
7. Вибрані наукові праці акад. В.І. Вернадського. Т. 7., кн. 1. Праці з геохімії та радіогеології / за ред. Соботович Е.В., Долін В.В. Київ, 2012. 824 с.
8. Войтенко Л.В. Хімія з основами біогеохімії: навч. посіб. Київ: Наукова столиця. 2019. 400 с., іл.
9. Гришко В.М. Важкі метали: надходження в ґрунти, транслокація у рослинах та екологічна безпека. Донецьк: Донбас, 2012. 304 с.
10. Єгорова Т.М. Біогеохімічні пріоритети агроecологічних досліджень. *Агроecологічний журнал*. № 1. 2017. С. 28–35. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2017.174214>
11. Дмитрук Ю.М., Бербець М.А. Основи біогеохімії: навч. посіб. Чернівці: Книги—XXI, 2009. 288 с.
12. Погорелов М.В., Бумейстер В.І., Ткач Г.Ф. та ін. Макро- та мікроелементи. Суми: СумДУ. 2010. 147 с.
13. Господаренко Г.М. Практикум з агрохімії. Київ. 2020. 689 с.
14. Малієнко А.М., Коломієць М.В., Брухаль Ф.Й. та ін. Методика польових досліджень з обробітку ґрунту. Вінниця: ТОВ «Твори», 2020. 84 с.

15. Козьякова Н.О., Макаренко Н.А., Кавецький В.М. Міграція важких металів у системі «грунт–рослина» — екотоксикологічний критерій їх небезпечності. *Науковий вісник НАУ*. 2000. Вип. 32. С. 365–370.
16. Єгорова Т.М. Екологічна геохімія агроландшафтів України: моногр. / за ред. О.І. Фурдичка. Київ: ДІА, 2018. 264 с.
17. Клос В.Р., Жовинский Э.Я. Биогеохимические индикаторы зон экологического риска городских агломераций. *Пошукова та екологічна геохімія*. 2014. № 1–2 (14–15). С. 8–12.

REFERENCES

1. Marchuk, H.P. & Bila, T.A. (2013). *Heokhimiya dovkillya: navchal'nyy posibnyk [Geochemistry of the environment: textbook]*. Kherson: OLDIE PLUS [in Ukrainian].
2. Kabata-Pendias, A. (2001). Trace elements in soils and plants. Third edition. CRC Press [in English].
3. Shumyhai, I.V., Yermishev, O.V. & Manishevskaya, N.M. (2022). Bioheokhimichna spetsyfika u Lisostepoviy zoni krayiny [Biogeochemical specificity in the forest-steppe zone of the country]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannya — Balanced nature management*, 4, 82–90. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2022.275036> [in Ukrainian].
4. Yehorova, T.M., Shumyhai, I.V., Sapsai, T.P. & Furdychko, O.I. (Ed.). (2020). *Bioheokhimichni lantsyuyh pozhyvnykh elementiv ta systema otsinky yikh ahroekhnohennykh deformatsiy (metodychni rekomendatsiyi) [Biogeochemical chains of nutrient elements and the system of evaluation of their agrotechnological deformations (methodical recommendations)]*. Kyiv [in Ukrainian].
5. Shumyhai, I.V., Konishchuk, V.V. & Dushko, P.M. (2022). Bioheokhimichni osoblyvosti vazhkykh metaliv ahroekosystem Lisostepu Ukrayiny [Biogeochemical features of heavy metals in agro-ecosystems of the forest-steppe of Ukraine]. *Ahroekolohichnyy zhurnal — Agroecological journal*, 4, 105–114. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2022.273256> [in Ukrainian].
6. Razumova, S.T. (2013). *Ekolohiya roslyn z osnovamy botaniky ta fiziolohiyi: konspekt lektsiy [Plant ecology with the basics of botany and physiology: lecture notes]*. Odesa [in Ukrainian].
7. Sobotovych, E.V. & Dolin, V.V. (Eds.) (2012). *Vybrani naukovi pratsi akad. V.I. Vernadskoho [Selected scientific works of acad. V.I. Vernadskyi]*. (T. 7, kn. 1). Kyiv [in Ukrainian].
8. Hryshko, V.M. (2012). *Vazhki metaly: nadkhodzhennia v grunty, translokatsiia u roslynakh ta ekolohichna bezpeka [Heavy metals: entry into soils, translocation in plants and environmental safety]*. Donetsk: Donbas [in Ukrainian].
9. Voytenko, L.V. (2019). *Khimiia z osnovamy bioheokhimi [Chemistry with the basics of biogeochemistry]*. Kyiv: Naukova stolitsia [in Ukrainian].
10. Yehorova, T.M. (2017). Bioheokhimichni priorityety ahroekolohichnykh doslidzhen' [Biogeochemical priorities of agroecological research]. *Ahroekolohichnyy zhurnal — Agroecological journal*, 1, 28–35 [in Ukrainian].
11. Dmytruk, Yu.M. & Berbets, M.A. (2009). *Osnovy bioheokhimi [Basics of biogeochemistry]*. Chernivtsi: Books—XXI [in Ukrainian].
12. Pogorelov, M.V., Bumeister, V.I., Tkach, G.F. et al. (2010). *Makro- ta mikroelementy [Macro- and microelements]*. Sumy: Sumy State University [in Ukrainian].
13. Gospodarenko, H.M. (2020). *Praktykum z ahrokhimi [Workshop on agrochemistry]*. Kyiv [in Ukrainian].
14. Malienko, A.M., Kolomiets, M.V., Brukhal, F.Y. et al. (2020). *Metodyka pol'ovykh doslidzhen' z obrobitku gruntu [Methods of field research on soil cultivation]*. Vinnytsia: Tvorі LLC [in Ukrainian].
15. Kozyakova, N.O., Makarenko, N.A. & Kavetskyi, V.M. (2000). Mhratsiia vazhkykh metaliv u systemi «grunt–roslyna» — ekotoksykologichnyi kryterii yikh nebezpechnosti [Migration of heavy metals in the «soilplant» system is an ecotoxicological criterion of their danger]. *Naukovyi visnyk NAU — Scientific Bulletin of NAU*, 32, 365–370 [in Ukrainian].
16. Yehorova, T.M. & Furdychko, O.I. (Ed.). (2018). *Ekolohichna heokhimiya ahrolandafyv Ukrayiny [Ecological geochemistry of agricultural lands of Ukraine]*. Kyiv [in Ukrainian].
17. Klos, V.R. & Zhovinsky, E.Ya. (2014). Biogeochemicheskiye indikatory zon ekologicheskogo riska gorodskikh aglomeratsiy [Biogeochemical indicators of ecological risk zones of urban agglomerations]. *Poshukova ta ekolohichna heokhimiya — Research and environmental geochemistry*, 1–2 (14–15), 8–12 [in Russian].

Стаття надійшла до редакції журналу 16.01.2023