

СТРАТЕГІЇ З АДАПТАЦІЇ ДО ЗМІН КЛІМАТУ

CLIMATE CHANGE ADAPTATION STRATEGIES

УДК 633.11"324":631.576.331.2/.416.9/.5(292.486)(1-17)(477)

Особливості накопичення Cu, Zn і Mn зерном пшениці озимої залежно від технологічних прийомів вирощування у північному Степу України

О. Ю. Подобед^a , В. І. Чабан^b

Державна установа Інститут зернових культур НААН України, м. Дніпро, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 26.06.2025 Отримано після доопрацювання 17.07.2025 Затверджено до видання 26.12.2025 Доступно онлайн 30.12.2025	Представлено результати дослідження впливу попередників (пар і кукурудза МВС) та систем удобрення (органічна, орґано-мінеральна і мінеральна) на вміст міді (Cu), цинку (Zn) та мангану (Mn) у зерні пшениці озимої в умовах Північного Степу України. Дослідження проводили на чорноземі звичайному малогумусному легкоглинистому (Calcic Chernozem) у зерно-паро-просапній сівозміні впродовж IV ротації (2013–2019) у багаторічному стаціонарному польовому досліді на Розівській дослідній станції ДУ ІЗК НААН у Запорізькій області України. Встановлено, що накопичення Cu і Zn у зерні інтенсивних сортів пшениці озимої в умовах Північного Степу значною мірою зумовлюється впливом сукупності досліджуваних чинників, тоді як вміст Mn менше залежить від них. Виявлено зв'язок мікроелементного складу зерна з попередником і системою удобрення. За розміщення пшениці озимої по чорному пару вміст Cu у зерні пшениці був на 20 % нижчим, ніж після кукурудзи на силос у контрольному (без добрив) варіанті та за органічного удобрення, а внесення мінеральних і орґано-мінеральних добрив нівелювало різницю, спричинену попередником. Унесення добрив незалежно від попередника зумовлювало достовірно нижчий вміст Zn (на 20–24 %) та більш високий вміст Mn (на 5–7 %) порівняно з контролем. За збільшення урожаю на 1000 кг/га вміст Zn у зерні був нижчим на 1,49 мг/кг. Формування високої урожайності пшениці озимої, передусім за умов мінерального удобрення, на малозабезпечених міддю і цинком чорноземах звичайних супроводжується, згідно з розробленою авторами шкалою, низьким вмістом цих елементів у зерні, за збереження середнього вмісту Mn. Отримані дані підтверджують, що технологічні та агрохімічні заходи можуть слугувати ефективним інструментом керування мікроелементним складом продукції. Ці чинники дають змогу цілеспрямовано регулювати вміст есенціальних мікроелементів у зерні пшениці озимої, що є важливим для вдосконалення агротехнологій, спрямованих не лише на підвищення урожайності, а й на поліпшення якості продукції.

Ключові слова:

пшениця озима;
зерно;
мікроелементи;
попередник;
система удобрення oksanapodobed@gmail.comORCID: ^a0000-0001-9993-7052; ^b0000-0002-4763-0689

Форма цитування: Подобед О. Ю., Чабан В. І. Особливості накопичення Cu, Zn і Mn зерном пшениці озимої залежно від технологічних прийомів вирощування у північному Степу України. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків: 2025. Вип. 99. С. 13–21. doi: 10.31073/acss99-02

1. Вступ

Конкурентоспроможність сучасного аграрного виробництва значною мірою залежить від якості продукції та її відповідності екологічним стандартам. Пшениця озима (*Triticum aestivum* L.) є однією з найважливіших зернових культур у світі та вагомим джерелом поживних речовин, включно з мікроелементами. В Україні, і особливо в Степовій зоні, ця культура займає значні площі посівів та має провідне значення для продовольчої безпеки, оскільки близько 60–70 % її валового збору використовується в харчових цілях.

Мікроелементний (МЕ) склад сільськогосподарської продукції є одним із показників її біологічної цінності та екологічної безпеки. З огляду на подвійну роль мікроелементів (біологічну та екотоксикологічну), відхилення вмісту МЕ від оптимальних значень, як у бік дефіциту, так і надлишку можуть мати серйозні наслідки для людства. Як зазначають [1] поживні мікроелементи, як показники якості зерна пшениці, досліджуються доволі обмежено, що пов'язано з відсутністю їх у переліку офіційних критеріїв товарної якості цієї культури.

Цинк, мідь і манган належать до есенціальних елементів, відомих як «елементи життя», оскільки їхня фізіологічна роль у рослинах тісно пов'язана з ключовими метаболічними процесами, такими як дихання, фотосинтез, вуглеводний і білковий обмін [2]. Пшениця озима, порівняно з іншими зерновими культурами характеризується найвищим вмістом цинку та марганцю, що пояснюється винятковою роллю елементів, як у стартових процесах росту (проростання насіння), так і протягом усього онтогенезу рослин. Дефіцит есенціальних мікроелементів у рослинах може призвести до зниження урожайності культур та якості продукції, що є особливо важливим за їх вирощування на ґрунтах із низьким природним вмістом цих елементів, а також за несприятливих екологічних умов [3–6].

Важливе значення в цьому контексті має оптимальне живлення рослин, яке безпосередньо впливає на рівень урожайності та сприяє поліпшенню якості продукції. Численні дослідження показали, що мікроелементний склад сільськогосподарських культур, і зокрема пшениці озимої, можна суттєво коригувати, змінюючи умови ґрунтового живлення. Тенденція до підвищення вмісту Zn, Cu, Mn, Co, Ni в основній та побічній продукції пшениці озимої внаслідок використання різних видів добрив підтверджується даними [7, 8, 9]. Поряд із цим, іншими вченими [10, 11] відмічено, що застосування мінеральних і органічних добрив не збільшувало, а, як правило, знижувало концентрацію мікроелементів у продукції рослинництва. Результати численних іноземних досліджень також показали, що зі збільшенням урожайності концентрація елементів у зерні знижується [4, 6]. Встановлено, що інтенсивність їх надходження в рослини багато в чому залежить і від попередника. Так, бобові багаторічні трави, як попередник пшениці озимої, сприяли зниженню у зерні вмісту Cu (у 2,2–4,6 раза) та Zn (у 1,6–1,9 раза) порівняно з попередником кукурудза на силос [12]. В іншій роботі констатується, що вміст Mn та Zn суттєво зростав за вирощування пшениці озимої після пшениці ярої, а рівень Fe в зерні значно підвищувався за її розміщення після гороху та люпину синього [9]. Основна продукція сучасних високоврожайних сортів пшениці часто містить недостатню кількість мікроелементів, що зумовлює глобальну проблему мікронутрієнтної недостатності, яку Всесвітня Організація Охорони Здоров'я відносить до пріоритетних у сфері здорового харчування [13, 14, 15]. Роботою індійських учених [16] доведено, що за останні 50 років, у зв'язку з упровадженням сортів інтенсивного типу, в зерні пшениці озимої спостерігається зниження (на 39–49 %) концентрації Zn та Cu порівняно з традиційними сортами, виведеними у 1960-х роках. Навпаки, дослідженнями, проведеними у Китаї [17], виявлено, що низький вміст Zn у зерні переважно зумовлювався надмірним внесенням фосфору або дефіцитом азотного живлення, а не зміною сортового складу в період «Зеленої революції». Отже, науковці вважають необхідним упровадження інтегрованої стратегії, що поєднує використання цинк-ефективних генотипів із раціональним внесенням цинку та оптимальним управлінням азотним і фосфорним живленням.

Агротехнічні чинники дозволяють цілеспрямовано впливати на концентрацію есенціальних елементів у зерні. Дослідження у цьому напрямі залишаються актуальними для удосконалення технологій вирощування, які направлені не тільки на підвищення продуктивності рослин, але й підвищення якості продукції. Сукупна дія попередника та добрив на накопичення мікроелементів у зерні вивчена недостатньо, особливо це стосується зон з природним дефіцитом рухомих форм цинку і міді в чорноземах Північного Степу України.

Мета статті — оприлюднення визначених у польовому досліді особливостей накопичення есенційних елементів — міді (Cu), цинку (Zn) та мангану (Mn), у зерні пшениці озимої залежно від попередників і систем удобрення.

2. Об'єкти та методи досліджень

Дослідження проведено в умовах польового стаціонарного досліді (атестат № 044) на Розівській дослідній станції ДУ ІЗК НААН у Запорізькій області, закладеного у 1991 році на чорноземі звичайному малогумусному легкоглинистому (Calcic Chernozem). Ґрунт дослідного поля характеризувався умістом гумусу 4,6–4,8 %, нейтральною реакцією ґрунтового розчину ($\text{pH}_{\text{вод}}$ 7,1–7,5), підвищеною нітрифікаційною здатністю (45,0 мг/кг ґрунту); підвищеним умістом P_2O_5 (140–150 мг/кг) і високим K_2O (150–160 мг/кг) (за Чириковим). Вміст Zn (0,30–0,35 мг/кг) та Cu (0,10–0,15 мг/кг) у ґрунті відповідав низькому рівню забезпеченості рослин, а Mn (29–37 мг/кг) — високому згідно з градацією І. Г. Важеніна (ААБ pH 4,8) [18].

У зерно-паро-просапній 7-пільній сівозміні (чорний пар – пшениця озима – кукурудза на зерно – ячмінь ярий – кукурудза МВС – соняшник) упродовж IV ротації (2013–2019) попередниками пшениці озимої були чорний пар і кукурудза молочно-воскової стиглості (МВС). У схемі досліді передбачено такі системи удобрення: 1. Без добрив (контроль); 2. Органічна (гній, 14,3 т/га); 3. Органо-мінеральна (гній 7,1 т/га + $\text{N}_{34}\text{P}_{21}\text{K}_{20}$); 4. Мінеральна ($\text{N}_{58}\text{P}_{41}\text{K}_{42}$). Площа посівної ділянки 105 м², облікової — 36 м², повторність — чотириразова. З добрив використовували напівперепрілий гній ВРХ, нітроамофоску та аміачну селітру. За час проведення досліді висівали сорти пшениці озимої інтенсивного типу: Бунчук (у 2013–2017) і Місія Одеська (у 2018–2019).

В зерні пшениці озимої визначали вміст мікроелементів (Zn, Mn, Cu) після мінералізації рослинних зразків методом сухого озолення за (ДСТУ 7670:2014)¹ з подальшою обробкою розчином азотної кислоти. Концентрацію мікроелементів визначали на атомно-абсорбційному спектрофотометрі С-115М1. Експериментальні дані обробляли за допомогою прикладних програм математичної статистики в складі Excel 2010 та Statistica (version 6).

3. Результати дослідження

3.1. Накопичення міді, цинку й мангану зерном пшениці озимої

Елементний склад репродуктивних органів вищих рослин, порівняно з вегетативними, як правило, є більш стабільним. Водночас, фактори навколишнього середовища значно впливають на формування урожайності пшениці озимої, а вміст мікроелементів у зерні варіює у широкому діапазоні, що зумовлено як генетичними особливостями рослин, так і екологічними умовами.

Упродовж років проведення польових досліджень визначено, що діапазон концентрацій Cu, Zn, Mn, в зерні пшениці озимої знаходився в межах видових, характерних для культури, параметрів. Середні значення, а також основні статистичні характеристики вмісту Cu, Zn і Mn у зерні, залежно від попередників, з урахуванням варіантів удобрення, представлено в таблиці 1. Встановлено, що зерно пшениці озимої, за розміщення по чорному пару, мало нижчий вміст міді, цинку, ніж після кукурудзи МВС. Зокрема, використання парового попередника сприяло достовірному зниженню вмісту міді на 13 %.

¹ ДСТУ 7670:2014 Сировина і продукти харчові. Готування проб. Мінералізація для визначання вмісту токсичних елементів. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015.

Таблиця 1

Статистичні характеристики вмісту мікроелементів у зерні пшениці озимої після різних попередників у період 2013–2019 рр. ($n = 28$ по кожному попереднику)

Попередник	$M \pm m$, мг/кг	Me, мг/кг	lim, мг/кг	As	C_v , %
<i>Cu</i>					
Чорний пар	2,58±0,06	2,51*	2,18-3,13	0,65	11
Кукурудза МВС	2,95±0,10	2,91*	2,06-4,11	0,42	17
Середнє	2,76±0,06	2,70	2,06-4,11	0,90	16
<i>Zn</i>					
Чорний пар	18,5±0,76	18,1	13,9-26,8	0,63	18
Кукурудза МВС	19,7±0,80	19,7	14,4-25,3	0,12	18
Середнє	19,1±0,55	18,4	13,9-26,8	0,35	18
<i>Mn</i>					
Чорний пар	26,5±0,46	26,2	22,9-32,4	0,72	9
Кукурудза МВС	26,1±0,33	25,8	23,6-31,2	1,49	6
Середнє	26,2±0,28	25,9	22,9-32,4	1,01	8

Примітка. $M \pm m$ – середнє арифметичне і помилка середнього; Me – медіана; lim – межі величин; As – коефіцієнт асиметрії; C_v – коефіцієнт варіації; * – значні відмінності між попередниками, $p < 0,05$;

Наведені максимальні і мінімальні значення концентрації, а також коефіцієнти варіації демонструють можливе варіювання елементного складу зерна пшениці озимої, що вирощують в умовах низької забезпеченості ґрунтів Північного Степу України Zn і Cu. Діапазон варіювання вмісту елементів у зерні, незалежно від попередників, характеризувався низьким рівнем мінливості вмісту Mn ($C_v < 10\%$) і середньою мінливістю Cu та Zn (C_v — 10–20 %).

Тобто, незалежно від умов року й сортового складу, накопичення Cu і Zn у зерні пшениці озимої значною мірою визначається комбінацією фіксованих і випадкових екологічних факторів, на відміну від Mn. Крім того, достовірна позитивна асиметрія у розподілі досліджуваних мікроелементів свідчить про зміщення їхнього вмісту в бік нижчих значень, що своєю чергою, вказує на вплив об'єктивних факторів, які обмежують потенційну здатність озимої пшениці накопичувати ці елементи в зерні. Варто зазначити, що наведені дані відображають лише основні тенденції у зміні внеску систем удобрення та попередників у загальній сукупності детермінованих і стохастичних чинників.

Отримані середні концентрації узгоджуються з даними вітчизняних дослідників, відповідно яким, вміст мікроелементів у зерні сучасних сортів пшениці озимої за вирощування в умовах Західного Полісся та Лісостепу такий: Cu — 2,1 мг/кг, Zn — 19,0 мг/кг, Mn — 30,0 мг/кг. Водночас, варіабельність вмісту Cu і Mn в зерні була суттєво вищою [19], ніж у наших дослідженнях.

3.2. Вплив попередника та добрив на вміст міді, цинку й мanganу в зерні пшениці озимої

За вирощування на високому агрофоні, пшениця озима, за потребою у мікроелементах, належить до рослин із високим виносом і підвищеною здатністю до їх засвоєння. Відомо, що хімічний склад рослини виступає своєрідним індикатором рівня живлення. Результати досліджень свідчать, що на мікроелементний склад зерна впливали такі важливі елементи технології вирощування, як добрива та попередники. На неудобреному фоні, середній вміст Cu у зерні озимини становив: по чорному пару — 2,68 мг/кг, а після кукурудзи на силос — 3,32 мг/кг (Табл. 2). Відповідно даним, зерно після пару характеризувалося на 20 % нижчим умістом міді ніж після кукурудзи МВС.

Аналогічну закономірність відзначено і за органічної системи удобрення, де зерно пшениці озимої, за розміщення по чорному пару, містило на 17 % менше Cu, ніж після кукурудзи силосної. Така тенденція простежувалася у всі роки досліджень. Кількісні відмінності вмісту Cu, залежно від попередника, на цих варіантах математично достовірні, що підтверджують результати t-статистики (t-test, dependent samples) ($t_{ф.} = -2,55 > t_{кр.} = 2,02$; $p = 0,026$ для варіанта без добрив; $t_{ф.} = -3,03 > t_{кр.} = 2,02$; $p = 0,015$ для органічної системи удобрення).

Органо-мінеральна та мінеральна системи удобрення не мали суттєвого впливу на вміст Cu у зерні після попередника чорний пар. У той же час, за розміщення озимини після кукурудзи на силос відзначалося достовірне зниження вмісту Cu у зерні на 18–20 % порівняно з контрольним варіантом. Тобто, на варіантах мінеральної й органо-мінеральної систем нівелюється відмінність між вмістом Cu після різних попередників. Її значення коливались в межах 2,48–2,71 мг/кг без вагомої різниці в межах попередників. На нашу думку, зниження концентрації цього елемента в основній продукції пшениці озимої по попереднику кукурудза на силос за різних систем удобрення є, більш за все, наслідком не тільки ефекту ростового розбавлення, в результаті формування більш високого урожаю, а й біологічною доступністю міді в умовах, створених попередниками та суто хімічними властивостями цього елемента.

Таблиця 2

Вплив попередників та добрив на вміст мікроелементів у зерні пшениці озимої в середньому за 2013-2019 рр.

Попередник	Система удобрення	Урожай, т/га	Вміст мікроелементів, мг/кг		
			Cu	Zn	Mn
Чорний пар	без добрив	6,35	2,68	21,3	25,3
	органічна	6,97	2,60	19,2	27,1*
	органо-мінеральна	7,32	2,54	17,1*	27,0*
	мінеральна	7,39	2,48	16,2*	26,5*
	HIP ₀₅	—	0,24	0,52	1,33
Кукурудза на силос	без добрив	3,57	3,32	22,7	25,4
	органічна	4,45	3,12	21,3	26,0
	органо-мінеральна	5,54	2,71*	17,3*	26,5*
	мінеральна	6,10	2,66*	17,3*	26,5*
	HIP ₀₅	—	0,41	0,56	1,10

Примітка * — статистично значущі відмінності порівняно з контролем за $p < 0,05$

Середній вміст Zn в зерні культури після обох попередників достовірно не відрізнявся на різних варіантах удобрення, залишаючись найвищим на ділянках без добрив. На варіантах органо-мінеральної і мінеральної систем удобрення вміст Zn в основній продукції був достовірно нижчим — на 20–24 %, порівняно з контролем.

Багатьма дослідниками відзначається тенденція до зворотного зв'язку між величиною урожаю та концентрацією мікроелементів у зерні сучасних сортів пшениці [4, 20]. Наші дослідження підтверджують таку залежність: зі збільшенням урожаю озимої пшениці спостерігається тенденція до зниження вмісту Zn в основній продукції після обох попередників. Зокрема, встановлено помітний (за шкалою Чеддока) зворотний кореляційний зв'язок між вмістом Zn і врожайністю зерна за вирощування після кукурудзи МВС ($r = -0,61$, $r^2 = 0,37$, $p = 0,004$). Регресійний зв'язок між концентрацією елемента та урожайністю виражається лінійним рівнянням із достовірними (за 5 % рівня значущості) коефіцієнтами регресії:

$$y = 26,6 - 1,49x, \text{ де } y \text{ — вміст Zn у зерні, мг/кг; } x \text{ — урожайність, т/га.}$$

Тобто, за збільшення урожайності пшениці озимої на 1 т/га, вміст елементу в зерні знижується на 1,49 мг/кг. В аналогічному дослідженні американських вчених [6] вміст Zn знизився приблизно на 0,8 мг/кг на кожні 1000 кг/га урожайності.

У разі розміщення озимини по попереднику чорний пар також зафіксовано помірну зворотну залежність між цими показниками з коефіцієнтом кореляції $r = -0,42$; $r = 0,06$, однак цей зв'язок не є статистично значущим.

Генетичною особливістю пшениці озимої є високий вміст Mn в основній продукції, концентрація якого, порівняно з іншими зерновими культурами вища в 2–10 разів. Середні значення вмісту Mn в зерні, сформованому по пару за різних систем удобрення достовірно не відрізнялись від значень після кукурудзи МВС. На удобрених ділянках концентрація Mn в зерні пшениці після обох попередників була на 5–7 % вищою, ніж на неудобрених. Очевидно, підвищена насиченість ґрунту Mn на фоні удобрення забезпечила більш інтенсивне його поглинання та, як наслідок, більш високу концентрацію Mn в зерні (Табл. 2).

Існують різні думки щодо фонових (нормальних) концентрацій елементів у продукції рослинництва. За даними українських дослідників [5, 18] їх вміст у зерні пшениці озимої, в межах ґрунтово-кліматичних зон України знаходився в діапазоні: від 11,6 до 54,3 мг/кг для Zn; від 0,36 до 6,50 мг/кг для Cu; від 6,13 до 49,2 для Mn.

За нашими висновками [21], на основі статистичного аналізу великого масиву аналітичних даних щодо вмісту мікроелементів у зерні озимої пшениці, здобутих упродовж 25 років за результатами досліджень у стаціонарних дослідах ДУ ІЗК НААН, було запропоновано шкалу рівнів мікроелементного складу зерна, вирощеного в умовах Північного Степу України (Табл. 3).

Таблиця 3

Шкала рівнів вмісту мікроелементів у зерні пшениці озимої [21]

Градація вмісту	Діапазон вмісту мікроелементів, мг/кг			
	Zn	Mn	Cu	Co
Низький	<9,2–21,2	<10,7–23,7	<1,21–3,32	<0,076–0,29
Середній	21,3–32,3	23,8–35,6	3,33–5,25	0,30–0,51
Високий	32,4–44,2>	35,7–48,5>	5,26–7,37>	0,52–0,73>

Згідно з цією шкалою, в умовах низької насиченості ґрунтів рухомими формами елементів, формується зерно зі зниженим вмістом Cu та Zn, а також середнім умістом Mn. Таким чином, за даними табл. 2 основна продукція пшениці озимої характеризується низьким вмістом Cu (2,48–3,32 мг/кг), середнім вмістом Mn (25,3–27,1 мг/кг) на всіх варіантах та попередниках, і низьким вмістом Zn (16,2–17,3 мг/кг) на удобрених фонах. Низький вміст елементів у зерні свідчить про їх дефіцит для рослин, що знижує їх стійкість до стресів і порушує синтез нуклеїнових кислот і білків. Разом з тим, вирощування озимої пшениці на удобрених варіантах, за якого у зерні формується знижений вміст цинку (менше 20 мг/кг), призводить до значного відхилення від цільового рівня біофортificaції (37 мг/кг) [13], рекомендованого дієтологами, що може негативно впливати як на ріст і продуктивність рослин, так і на забезпечення повноцінного харчування людей і тварин продуктами з необхідним мікроелементним складом.

Отже, для підвищення вмісту есенціальних мікроелементів Cu та Zn, у зерні пшениці озимої необхідно застосовувати інтегровану систему живлення з урахуванням біодоступності елементів, властивостей ґрунту, а також враховувати здатність нових сортів до накопичення мікроелементів, необхідних для забезпечення харчової цінності продукції.

4. Висновки

Узагальнюючи вищевикладений матеріал можемо констатувати, що накопичення Cu і Zn у зерні пшениці озимої сортів інтенсивного типу більшою мірою залежало від сукупності досліджуваних факторів, ніж накопичення Mn. Встановлено залежність мікроелементного складу зерна пшениці озимої від якості попередника і систем удобрення. За розміщення культури по чорному пару, на варіантах без добрив і органічної системи удобрення вміст Cu був меншим (на 20 %), ніж по попереднику кукурудза на силос. На варіантах мінеральної і органо-мінеральної систем, різниця, спричинена попередником нівелювалась. У разі вирощування пшениці озимої після кукурудзи МВС на варіантах інтенсивних систем удобрення фіксували менший (на 18–20 %) вміст Cu у зерні порівняно з іншими варіантами. Незалежно від попередника, на варіантах органо-мінеральної та мінеральної систем, порівняно з контролем (без добрив), зерно пшениці характеризувалося достовірно нижчим (на 20–24 %) вмістом Zn і водночас — більшим (на 5–7 %) вмістом Mn. За збільшення урожаю на 1000 кг/га вміст Zn у зерні був нижчим на 1,49 мг/кг. В умовах Північного Степу України на чорноземних ґрунтах, які характеризуються низькою забезпеченістю рухомими формами цинку та міді, на фоні застосування інтенсивних систем живлення, згідно з розробленою авторами шкалою, формується зерно з низьким вмістом Cu та Zn і середнім вмістом Mn.

Список використаних джерел

1. Єгорова Т. М., Шумигай І. В. Біохімічні особливості пшениці озимої (*Triticum vulgare* L.) за збалансованості цинку та міді у системі «ґрунт-рослина». *Агроекологічний журнал*. 2024. № 1. С. 126–132. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2024.299947>
2. Кабата-Пендіас А. Микроэлементы в почвах и растениях / пер.: Д. В. Гричук, Е. П. Янин. М.: Мир. 1989. 439 с.
3. Sadeghzadeh B. A review of zinc nutrition and plant breeding. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2013. Vol. 13(4). P. 905–927. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000072>
4. Hasheminasab K. S., Shahbazi K., Marzi M., Zare A., Yeganeh M., Bazargan K., Kharazmi R. A study on wheat grain zinc, iron, copper, and manganese concentrations and their relationship with grain yield in major wheat production areas of Iran. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023. Vol. 14. 100913. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100913>
5. Шаповалов С. О., Руденко Є. В., Іонов І. А., Варчук С. С., Долгая М. М., Верягіна Н. В. Оцінка вмісту есенційних мікроелементів у кормах України з урахуванням впливу різних чинників. *Вісник аграрної науки*. 2011. № 2. С. 36–40.
6. Miner G. L., Delgado J. A., Ippolito J. A., Johnson J. J., Kluth D. L., Stewart C. E. Wheat grain micronutrients and relationships with yield and protein in the U.S. Central Great Plains. *Field Crops Research*. 2022. Vol. 279. 108453. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108453>
7. Любич В. В. Вміст хімічних елементів у зерні пшениці м'якої озимої залежно від виду, доз і строків застосування азотних добрив. *Таврійський науковий вісник*. 2019. № 107. С. 117–124. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.107.15>
8. Давидюк Г. В., Олійник К. М., Клименко І. І. Вплив технологій вирощування на вміст мікроелементів і важких металів у рослинах пшениці озимої. *Агроекологічний журнал*. 2019. № 3. С. 62–70. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2019.183475>
9. Pszczółkowska A., Okorski A., Olszewski J., Fordoński G., Krzebietke S., Chareńska A. Effects of pre-preceding leguminous crops on yield and chemical composition of winter wheat grain. *Plant, Soil and Environment*. 2018. Vol. 64(12), P. 592–596. <https://doi.org/10.17221/340/2018-PSE>
10. Оцінювання мікроелементного складу ґрунтів України для ведення органічного землеробства: / за ред. А. І. Фатеева, Я. В. Бородіної. Харків.: Бровін О. В., 2020. 144 с.
11. Осокіна Н. М., Черно О. Д., Стародуб В. О. Вміст мікроелементів в зерні пшениці озимої залежно від удобрення в правобережному Лісостепу. *Аграрні інновації*. 2022. № 14. С. 87–93. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.14.13>
12. Разанов С. Ф., Ткачук О. П. Якість та екологічна безпека зерна озимої пшениці, вирощеної після бобових попередників. *Агробіологія*. 2018. № 1. С. 27–34. URL: <https://agrobiologiya.btsau.edu.ua/uk/content/yakist-ta-ekologichna-bezpeka-zerna-ozymoyi-pshenyci-vyroshchenoyi-pislya-bobovyh> (дата звернення: 10.06.25)
13. Bouis H. E., Saltzman A. Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Global Food Security*. 2017. Vol. 12. P. 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.009>
14. Yilmaz H., Yilmaz A. Hidden Hunger in the Age of Abundance: The Nutritional Pitfalls of Modern Staple Crops. *Food Science & Nutrition*. 2025. 13(2). e4610. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4610>
15. Cakmak I., Kutman U. B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. *European Journal of Soil Science*. 2018. Vol. 69(1). P. 172–180. <https://doi.org/10.1111/ejss.12437>
16. Debnath S., Dey A., Khanam R., Saha S., Sarkar D., Saha K. ... Mandal B. Historical shifting in grain mineral density of landmark rice and wheat cultivars released over the past 50 years in India. *Scientific Reports*. 2023. 13. № 21164. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48488-5>

17. Chen X., Zhang Y., Tong Y., Xue Y., Liu D., Zhang W. ... Zou C. Harvesting more grain zinc of wheat for human health. *Scientific Reports*. 2017. 7. Article № 7016. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07484-2>
18. Важенин И. Г. Методические указания по агрохимическому обследованию и картографированию почв на содержание микроэлементов. М. : Изд. ВАСХНИЛ. 1976. 78 с.
19. Мірошниченко М., Панасенко Є., Звонар А., Леонов О., Галасун Ю., Гаврилюк В. Вимогливість сучасних сортів пшениці озимої до мінерального живлення. *Вісник аграрної науки*. 2021. 99(4). С. 28-35. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202104-04>
20. Smith E. G., Janzen H. H., Ellert B. H. Effect of fertilizer and cropping system on grain nutrient concentrations in spring wheat. *Canadian Journal of Plant Science*. 2018. Vol. 98(1). 125-131. <https://doi.org/10.1139/cjps-2017-0079>
21. Подобед О. Ю., Чабан В. І. Диференціація рівнів вмісту мікроелементів у зерні пшениці озимої в умовах Північного Степу України. *Аграрна освіта і наука: досягнення та перспективи розвитку* : зб. тез доп. VI Міжнар. наук.-практ. конф., м. Біла Церква, 27 березня 2025 р. Біла Церква, 2025. С. 192–194.

UDC УДК 633.11"324":631.576.331.2/.416.9/.5(292.486)(1-17)(477)

Features of Cu, Zn, and Mn accumulation in winter wheat grain depending on cultivation practices in the Northern Steppe of Ukraine

O. U. Podobed^a , V. I. Chaban^b

The Institute of Grain Crops of National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine
Dnipro, Ukraine

✉: oksanapodobed@gmail.com

ORCID: ^a0000-0001-9993-7052; ^b0000-0002-4763-0689

Received 26.06.2025; Revised 17.07.2025; Accepted 26.12.2025; Available online 30.12.2025

Abstract. This study presents a comprehensive assessment of how different agronomic practices — specifically, crop rotation (black fallow vs. silage corn) and fertilization systems (control, organic, mineral, and organo-mineral) — influence the accumulation of copper (Cu), zinc (Zn), and manganese (Mn) in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grain under the ecological conditions of the Northern Steppe of Ukraine. The findings demonstrate that agronomic interventions can serve as effective tools for modulating the micronutrient composition of cereal grain. By adjusting technological variables, it is possible to purposefully regulate the levels of essential trace elements in wheat grain — a factor of growing significance not only for yield optimization but also for enhancing the nutritional quality of the harvest. The research conducted on ordinary low-humus light clay chernozem (Calcic Chernozem) within a grain-fallow-row crop rotation system over four complete cycles (2013–2019) as a part of a long-term field experiment at the Rozivka Research Station of The Institute of Grain Crops of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. The results indicate that the accumulation of Cu and Zn in high-yielding winter wheat cultivars strongly influenced by the combination of environmental and agronomic factors, whereas Mn content appears to be less sensitive to these variables. A strong correlation was found between the micronutrient profile of wheat grain and key cultivation parameters — particularly the preceding crop and the fertilization regime. When winter wheat followed black fallow, the Cu content in the grain was 20 % lower compared to wheat sown after silage corn under both the control and organic fertilizer treatments. However, the application of mineral or organo-mineral fertilizers effectively mitigated the preceding crop effect on Cu levels. Fertilization, regardless of crop predecessor, consistently led to a statistically significant decrease in Zn content (by 20–24 %) and an increase in Mn content (by 5–7 %) relative to the control. Notably, for every 1000 kg increase in yield, grain Zn concentration declined by an average of 1.49 mg/kg. The formation of high yields on ordinary chernozem soils, which are inherently low in copper and zinc, is thus accompanied by a depletion of these elements in grain, while Mn levels tend to remain within the average range.

Keywords: winter wheat; grain; micronutrients; preceding crop; fertilization system.

Citing: Podobed, O. U., & Chaban, V. I. (2025). Features of Cu, Zn, and Mn accumulation in winter wheat grain depending on cultivation practices in the Northern Steppe of Ukraine. *AgroChemistry and Soil Science*, 99, 13–21. doi: 10.31073/acss99-02 [in Ukrainian].

References

1. Yehorova, T., & Shumyhai, I. (2024). Biochemical properties of winter wheat (*Triticum vulgare* L.) under Zn and Cu balance in the soil-culture system. *Agroecological Journal*, 1, 126–132. doi: 10.33730/2077-4893.1.2024.299947 [in Ukrainian]
2. Kabata-Pendias, A. (1989). *Microelements in soils and plants*. (D. V. Hrychuk, E. P. Yanin trans). Moscow: Mir. [in Russian]
3. Sadeghzadeh, B. (2013). A review of zinc nutrition and plant breeding. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(4), 905–927. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000072>
4. Hasheminasab, K., Shahbazi, K., Marzi, M., Zare, A., Yeganeh, M., Bazargan, K., & Kharazmi, R. (2023). A study on wheat grain zinc, iron, copper, and manganese concentrations and their relationship with grain yield in major wheat production areas of Iran. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100913>
5. Šapovalov, S. O., Rudenko, J. V., Ionov, I. A., Varčuk, S. S., Dolhaja, M. M., & Verjahina, N. V. (2011). Assessment of the content of essential trace elements in feed of Ukraine, taking into account the influence of various factors. *Bulletin of Agricultural Science*, 2, 36–40. [In Ukrainian].

6. Miner, G. S., Delgado, J. A., Ippolito, J. A., Johnson, J. J., Kluth, D., & Stewart, C. E. (2022). Wheat grain micronutrients and relationships with yield and protein in the U.S. Central Great Plains. *Field Crops Research*, 279, 108453. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108453>
7. Liubych, V. (2019). Chemical element composition of winter wheat grain depending on the variety, doses and timing of nitrogen fertilizer application. *Taurida Scientific Herald. Series: Rural Sciences*, 107, 117–124. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.107.15> [in Ukrainian]
8. Davidyuk, G., Oliynyk, K., & Klimenko, I. (2019). Influence of cultivation technologies on the content of trace elements and heavy metals in winter wheat plants. *Agroecological Journal*, 3, 62–70. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2019.183475> [in Ukrainian]
9. Pszczółkowska, A., Okorski, A., Olszewski, J., Fordoński, G., Krzebietke, S., & Chareńska, A. (2018). Effects of pre-preceding leguminous crops on yield and chemical composition of winter wheat grain. *Plant, Soil and Environment*, 64(12), 592–596. <https://doi.org/10.17221/340/2018-PSE>
10. Fateev, A. I., & Borodina, Y. V. (Eds.). (2020). Evaluation of the trace element composition of the soils of Ukraine for organic farming. Kharkiv.: Brovin O. V. [In Ukrainian]
11. Osokina, N., Chernov, O., & Starodub, V. (2022). Content of microelements in winter wheat grain dependent from fertilization in the Right Bank Forest Steep. *Agrarian Innovations*, 14, 87–93. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.14.13>. [In Ukrainian]
12. Razanov, S. F., & Tkachuk, O. P. (2018). Quality and ecological safety of winter wheat grain grown after leguminous predecessors. *Agrobiologia*, 1, 27–34. Retrieved from <https://agrobiologiya.btsau.edu.ua/uk/content/yakist-ta-ekologichna-bezpeka-zerna-ozymoyi-pshenyци-vyroshchenoyi-pislya-bobovyh> [In Ukrainian].
13. Bouis, H. E., & Saltzman A. (2017). Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Global Food Security*, 12, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.009>.
14. Yilmaz, H., & Yilmaz, A. (2025). Hidden Hunger in the Age of Abundance: The Nutritional Pitfalls of Modern Staple Crops. *Food Science & Nutrition*, 13, e4610. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4610>
15. Cakmak, I., & Kutman, U. (2018). Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. *European Journal of Soil Science*, 69, 172–180. <https://doi.org/10.1111/ejss.12437>
16. Debnath, S., Dey, A., Khanam, R. Saha, S., Sarkar, D., Saha, K. ... Mandal, B. (2023). Historical shifting in grain mineral density of landmark rice and wheat cultivars released over the past 50 years in India. *Scientific Reports*, 13, 21164. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48488-5>
17. Chen, X., Zhang Y., Tong Y., Xue Y., Liu D., Zhang W... Zou C. (2017). Harvesting more grain zinc of wheat for human health. *Scientific Reports*, 7, 7016. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07484-2>
18. Vazhenin, I. G. (1976). Guidelines for agrochemical examination and mapping of soils for the content of microelements. Moscow: VASKhNIL [in Russian]
19. Miroshnychenko, M., Panasenko, Y., Zvonar, A., Leonov, O., Galasun, J., & Gavryliuk, V. (2021). The demand of modern varieties of winter wheat to mineral nutrition. *Bulletin of Agricultural Science*, 99, 28–35. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202104-04> [in Ukrainian]
20. Smith, E. G., Janzen, H. H., & Ellert, B. H. (2018). Effect of fertilizer and cropping system on grain nutrient concentrations in spring wheat. *Canadian Journal of Plant Science*, 981, 125–131. Retrieved from <https://doi.org/10.1139/CJPS-2017-0079>
21. Podobed, O. U., & Chaban, V. I. (2025). Differentiation of microelement content levels in winter wheat grain under the conditions of the Northern Steppe of Ukraine. *Agrarian Education and Science: Achievements and Development Prospects* : Materials of the VI International science and practice conf., (pp. 192–194). Bila Cerkva: BNAU. Ukraine [in Ukrainian].