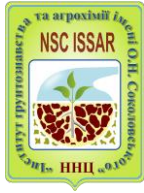




НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК
УКРАЇНИ



НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ІНСТИТУТ ҐРУНТОЗНАВСТВА та АГРОХІМІЇ
імені О. Н. СОКОЛОВСЬКОГО»

АГРОХІМІЯ і ҐРУНТОЗНАВСТВО

МІЖВІДОМЧИЙ
ТЕМАТИЧНИЙ
НАУКОВИЙ
ЗБІРНИК

99

ХАРКІВ
2025

УДК 631.4+631.8:001(662.552)

A 26

Агрохімія і ґрунтознавство : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ «ІґА імені О. Н. Соколовського». Харків, 2025. Вип. 99. 89 с.

Agrochemistry and Soil Science : Collected papers / NSC ISSAR named after O. N. Sokolovsky. Kharkiv, 2025. Iss. 99. 89 p.

Збірник публікує наукові статті за результатами теоретичних, експериментальних та методичних досліджень з актуальних напрямів ґрунтознавства, агрохімії, агроекології, землеробства та інших наук, які містять оригінальну інформацію та обґрунтовані висновки.

Згідно з наказом МОН України № 1643 від 28.12.2019 збірник внесено до Переліку наукових фахових видань України в галузях сільськогосподарські та біологічні науки за спеціальностями:

201 – Агрономія, 091 – Біологія та біохімія і включено до категорії «Б»

Мови видання: українська, англійська

Редакційна колегія:

- С. А. Балюк д.с.-г.н.** (відповідальний редактор); ННЦ «ІґА імені О. Н. Соколовського»
А. Б. Ачасов д.с.-г.н.; Харківський національний аграрний ун-т ім. В. В. Докучаєва
А. О. Ачасова к.б.н.; Науково-досл. ін-т меліорації та охорони ґрунтів (Чеська Республіка)
А. Д. Балаєв д.с.-г.н.; Національний ун-т біоресурсів і природокористування України
Т. Ю. Биндич д.с.-г.н.; ННЦ «ІґА імені О. Н. Соколовського»
В. А. Величко д.с.-г.н.; Державне видавництво «Аграрна наука» НААН
З. Г. Гамкало д.б.н.; Львівський національний ун-т імені Івана Франка
Г. М. Господаренко д.с.-г.н.; Уманський національний ун-т садівництва
Ю. М. Дмитрук д.б.н.; ЗВО "Подільський державний університет"
В. В. Іваніна д.с.-г.н.; Інститут енергетичних культур і цукрових буряків НААН
Т. М. Лактіонова к.с.-г.н. (відповідальний секретар); ННЦ «ІґА імені О. Н. Соколовського»
М. В. Лісовий д.с.-г.н.; ННЦ «ІґА імені О. Н. Соколовського»
Т. Г. Лях д.с.-г.н.; Ін-т педології, агрохімії та захисту ґрунтів "Н. Дімо" (Республіка Молдова)
М. М. Мірошниченко д.б.н. (заст. відп. редактора); ННЦ «ІґА імені О. Н. Соколовського»
О. Є. Найдьонова к.б.н.; ННЦ «ІґА імені О. Н. Соколовського»
І. Д. Пачев д.с.-г.н.; Інститут виноградарства та виноробства (Республіка Болгарія)
Є. В. Скрильник д.с.-г.н.; ННЦ «ІґА імені О. Н. Соколовського»
Р. С. Трускавецький д.с.-г.н.; ННЦ «ІґА імені О. Н. Соколовського»
Ю. Л. Цапко д.б.н.; ННЦ «ІґА імені О. Н. Соколовського»
В. Р. Черлінка д.б.н.; Університет Павла Йозефа Шафарика в Кошицях (Словацька Республіка)
С. Г. Чорний д.с.-г.н.; Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Склад редакційної колегії затверджено Вченою радою ННЦ «ІґА імені О. Н. Соколовського», протокол № 7 від 05.04.2019 р. і доповнено згідно з рішенням Вченої ради, протокол № 10 від 07.06.2023 р.

Рік заснування: 1966

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 20942-10742Пр

Засновник: Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії

імені О. Н. Соколовського» <https://ror.org/0074rcv14>

Адреса редакції: вул. Михайля Семенка, 4, м. Харків, 61024.

Тел. +38(057) 704 16 69. *E-mail:* agrochemsoilsci.org@gmail.com

Вебсайт: agrochemsoilsci.org

Індексування та реферування:

База даних CrossRef; Реєстр наукових фахових видань України;

Портал Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського;

Загальнодержавна реферативна база даних (РБД) «Україніка наукова»;

УРЖ «Джерело» Інституту проблем реєстрації інформації НАН України (ІПРИ);

Пошукова система і база даних наукових цитувань «Open Ukrainian Citation Index (OUCI)»;

CiteFactor; Research Bible; WorldCat; ICI World of Journals database (Index Copernicus);

Directory of Research Journal Indexing (DRJI)

Рекомендовано до видання Вченою радою ННЦ «ІґА імені О. Н. Соколовського», протокол № 19 від 26.12.2025 р.

ISSN 0587-2596

e-ISSN 2616-6852

Media ID R30-02658

DOI: <https://doi.org/10.31073/acss99>

© Національний науковий центр

«Інститут ґрунтознавства та агрохімії

імені О. Н. Соколовського»

ЗМІСТ / CONTENT

ВЛАСТИВОСТІ Й РЕЖИМИ ҐРУНТІВ SOIL PROPERTIES and MODES

Круглов О. В.

Магнетизм ґрунтів як екологічний феномен та його діагностичне значення

Kruglov O. V. Soil magnetism as an ecological phenomenon 4–12

СТРАТЕГІЇ З АДАПТАЦІЇ ДО ЗМІН КЛІМАТУ CLIMATE CHANGE ADAPTATION STRATEGIES

Подобед О. Ю., Чабан В. І.

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

Podobed O. U., Chaban V. I. Features of Cu, Zn, and Mn accumulation in winter wheat grain depending on cultivation practices in the Northern Steppe of Ukraine 13–21

Коваленко С. С.

Просторово-часові зміни вмісту рухомого калію в орному ґрунті

Kovalenko S. S. Spatiotemporal changes in the content of mobile potassium in arable soil

Andrushko M. O., Andrushko O. M.

World practice of breeding adaptive varieties of cereal crops in conditions of climate change

Андрушко М. О., Андрушко О. М. Світова практика селекції адаптивних сортів зернових культур в умовах зміни клімату 32–40

Глущенко Л. Д., Скрильник Є. В., Криlach С. І.

Трансформація органічної речовини ґрунту в агро- та природних екосистемах

Glushchenko L. D., Skrylnyk E. V., Krylach S. I. Transformation of soil organic matter in agro- and natural ecosystems 41–48

МІЛІТАРНА ДЕГРАДАЦІЯ ҐРУНТІВ УКРАЇНИ MILITARY DEGRADATION OF UKRAINIAN SOILS

Залавський Ю. В., Лебедь В. В.

Особливості картографування мілітарно деградованих ґрунтів на національному й регіональному рівнях

Zalavskiy Yu. V., Lebed V. V. Features of mapping military-degraded soils at the national and regional levels 49–63

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЛОДИХ УЧЕНИХ STUDY OF YOUNG SCIENTISTS

Шовкун О. О.

Вплив органічних систем удобрення на ферментативну активність дерново-підзолистого ґрунту

Shovkun O. O. Effect of organic fertilization systems on the enzymatic activity of sod-podzolic soil ... 64–69

Коваль Ф. Ф.

Оцінка фітотоксичності орних ґрунтів Валківської громади за різними методичними підходами

Koval F. F. Assessment of phytotoxicity of arable soils of Valkivska community according to different methodological approaches 70–82

Мелимука Р. Я., Долюк А. В.

Особливості целюлозолітичної активності ґрунту під впливом барди меласної

Melymuka, R. Ya., & Doliuk, A. V. Features of cellulose-lytic activity of soil under the influence of molasses stillage 83–88

ВЛАСТИВОСТІ Й РЕЖИМИ ҐРУНТІВ

SOIL PROPERTIES and MODES

УДК 631.4:537.621.4(477.5)

Магнетизм ґрунтів як екологічний феномен та його діагностичне значення

О. В. Круглов

Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 18.09.2025 Отримано після доопрацювання 19.12.2025 Затверджено до видання 26.12.2025 Доступно онлайн 30.12.2025 <i>Ключові слова:</i> ґрунт; екологія; ерозія; магнітна сприйнятливість; схил	Моніторинг магнітних властивостей ґрунтів показав себе як чутливий та доступний засіб діагностики, що дозволяє не лише оцінити загальний рівень антропогенного навантаження на агроландшафт, але й простежити просторову неоднорідність ґрунтового покриву, зокрема зумовлену деградаційними процесами, пов'язаними з перебігом водної ерозії. У дослідженні розкрито деякі результати аналізу магнітних властивостей як індикатора екологічного стану ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення України з урахуванням географічних, генетичних та антропогенних передумов формування ґрунтового магнетизму. Основним дослідженим параметром є питома магнітна сприйнятливості (χ), яку визначали у пробах ґрунтів у повітряно-сухому стані за допомогою капамістка KLY-2, що забезпечує високу точність визначення навіть низьких рівнів магнітної сприйнятливості, характерних для ґрунтів природних екосистем. Виявлено, що просторові закономірності розподілу χ відображають як геохімічні особливості ландшафтів, так і специфіку сучасного землекористування. На основі експериментальних даних наведено діапазони варіацій значень питомої магнітної сприйнятливості для найбільш поширених типів ґрунтів Лівобережної частини зон Полісся, Лісостепу і Степу України. Показано, що зв'язок питомої магнітної сприйнятливості зі схилними процесами, зумовлений закономірними змінами вмісту органічного вуглецю, залишається стабільним у часі. Окрім того, продемонстровано можливість застосування статистичних характеристик просторового розподілу значень магнітної сприйнятливості як індикатора складності і різноманітності (комплексності) структури ґрунтового покриву. Описано особливості прояву чутливості магнітних характеристик до впливу деяких природних і антропогенних факторів.

✉ alex_kruglov@ukr.net

ORCID: 0000-0003-2663-0935

Форма цитування: Круглов О. В. Магнетизм ґрунтів як екологічний феномен та його діагностичне значення *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків: 2025. Вип. 99. С. 4–12.
doi: 10.31073/acss99-01

1. Вступ

У сучасних умовах глобальної тенденції до деградації ґрунтового покриву особливої актуальності набувають методи оцінювання стану ґрунтів, які є швидкими, надійними та інформативними. Одним із таких методів є аналіз магнітних властивостей ґрунту, що все ширше використовують в екологічному моніторингу та прикладному ґрунтознавстві. Магнетизм ґрунтів відображає як природні особливості ґрунтоутворення, так і ступінь антропогенного впливу — зокрема, техногенного забруднення важкими металами, ерозійних процесів або змін у структурі ґрунту внаслідок агрономічного навантаження.

Сільськогосподарські угіддя займають близько 70 % території України (на Лівобережжі ця цифра значно вище), зокрема найбільш використовувані родючі чорноземні ґрунти, які є основою продовольчої безпеки держави. Проте інтенсивне землеробство, широке застосування мінеральних добрив, пестицидів, глибокого обробітку та екстенсивні агротехнічні заходи призводять до поступового виснаження, забруднення та фізичної деградації ґрунтів. У таких умовах

необхідність в ефективному індикаторі змін, що відбуваються в ґрунтовому середовищі, є вкрай важливою.

Магнітна сприйнятливість (χ) ґрунтів зарекомендувала себе як чутливий та доступний інструмент діагностики, що дозволяє не лише оцінити загальний рівень антропогенного навантаження, а й простежити просторову неоднорідність ґрунтового покриву [1, 2]. В Україні цей підхід мало представлений у складі агроекологічних досліджень, попри високий потенціал його застосування для моніторингу стану орних земель, зокрема в зонах інтенсивного землеробства.

Вивчення магнітних властивостей ґрунтів бере початок у другій половині ХХ століття й пов'язане передусім з розвитком магнітометрії у геофізичних дослідженнях [3]. Спочатку цей підхід застосовували для виявлення магнітних аномалій у геологічному середовищі, рідше — для пояснення генезису ґрунтів [4, 5]. Однак, починаючи з 1970-х років увага науковців поступово змістилася до дослідження поверхневих ґрунтових горизонтів, що реагують на зовнішні чинники, зокрема антропогенного характеру [6]. Піонерними вважаються спроби використання магнітної сприйнятливості як екологічного індикатора в Центральній Європі (Угорщина, Польща, Німеччина), які показали, що вміст феромагнітних мінералів у ґрунтах може відображати рівень техногенного забруднення важкими металами [7, 8]. Ці результати зумовили активний розвиток нового наукового напрямку — екологічного магнетизму. Пізніше це поширилось на інші аспекти прикладного ґрунтознавства — оцінювання впливу антропогенного навантаження та ерозії [9, 10].

В Україні перші дослідження в цьому напрямі з'явилися в кінці 1990-х — на початку 2000-х років. Було доведено, що магнітна сприйнятливість є чутливим показником змін у верхньому горизонті ґрунту, зумовлених вітровою та водною ерозією та накопиченням промислового пилу та агрохімікатів [11].

У подальші роки магнітні методи стали інтегруватися у ґрунтово-екологічний моніторинг, особливо земель сільськогосподарського використання. Сучасні дослідження в Україні (зокрема, в ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського» та в ННІ «Інститут геології» КНУ імені Т. Г. Шевченка) демонструють, що карти магнітної сприйнятливості можуть бути засобом виявлення деградованих ділянок, слідів ерозії, переущільнення ґрунту та зон техногенного впливу [12].

Метою цієї статті є висвітлення результатів аналізування магнітних властивостей ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення України як індикатора екологічного стану, з урахуванням географічних, генетичних та антропогенних чинників, що впливають на магнетизм ґрунтового покриву.

2. Методика досліджень

Дослідження проводили з метою оцінки магнітної сприйнятливості сільськогосподарських ґрунтів у різних регіонах Лівобережжя України як індикатора їх екологічного стану та впливу антропогенних чинників. Основну увагу приділяли ґрунтам, що зазнають інтенсивного навантаження за сільськогосподарського використання та дії ерозійних процесів. Магнітну сприйнятливість вимірювали у пробах ґрунту, відібраних із орного шару (0–30 см) у межах агроландшафтів, типових для основних природно-кліматичних зон України: Полісся, Лісостеп і Степ. У кожній зоні вибирали локації, де знаходились ділянки з різною інтенсивністю сільськогосподарського використання: орні землі, пасовища й толоки.

Питому магнітну сприйнятливість (χ) визначали у зразках повітряно-сухого ґрунту за допомогою капамістка KLY-2 за класичною методикою [13]. В окремих

випадках використовували двочастотний магнітометр Bartington MS2 з сенсором MS2B (паралельно проводили вимірювання на низькій (0,47 кГц) та високій (4,7 кГц) частотах, що дозволяло оцінити співвідношення χ_{LF}/χ_{HF} і характер магнітних мінералів) [14].

3. Результати досліджень та їх обговорення

Найбільш поширеною характеристикою магнітних властивостей ґрунту є питома магнітна сприйнятливість. Її величина відображає як мінералогічний склад, так і концентрацію магнітних мінералів у ґрунті. Порівняно з іншими різновидами магнітної сприйнятливості цей показник вирізняється незалежністю від щільності будови ґрунту та високою точністю визначення, хоча й поступається їм за трудомісткістю вимірювань. Широкий діапазон варіації значень питокої магнітної сприйнятливості забезпечує можливість надійної диференціації досліджуваних зразків.

На рисунку 1 представлено діапазони значень магнітної сприйнятливості найбільш поширених типів ґрунтів Лівобережжя. Графік сформовано на підставі аналізу понад 6000 ґрунтових проб. Він не враховує впливу на ґрунти індустриального або воєнного забруднення, такі зразки були видалені.

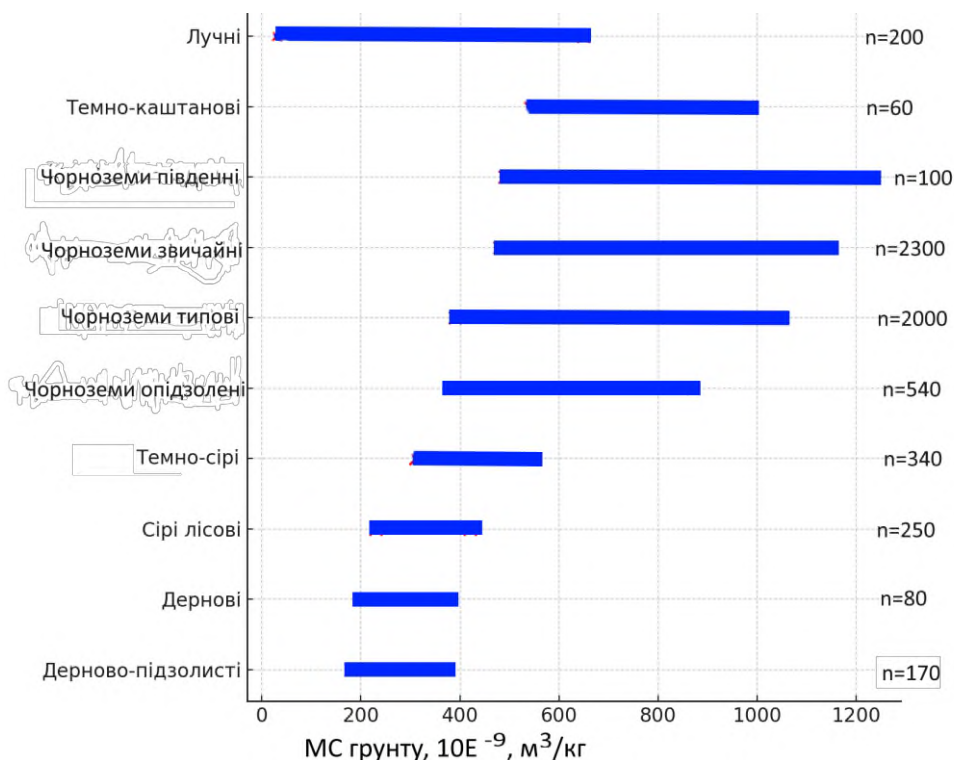


Рис.1. Діапазони значень магнітної сприйнятливості (МС) ґрунтів, найбільш поширених на Лівобережжі України

Діапазони значень питокої магнітної сприйнятливості, наведені на графіку, загалом узгоджуються з результатами, поданими у роботі Н. Йорданової, де вони були ранжовані за групами ґрунтів відповідно до класифікації WRB [15]. Загальна тенденція, що простежується на графіку, полягає у зростанні значень питокої магнітної сприйнятливості у ґрунтах з більш південним субширотним розміщенням ареалу формування. Виняток становлять азональні ґрунти, утворені під впливом гідроморфних або галоморфних умов, зокрема лучні ґрунти. До аналізу не були включені болотні, торфові ґрунти та солонці, оскільки їх значення питокої

магнітної сприйнятливості перебувають у діапазоні від одиниць до $200 \times 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$ і значною мірою визначаються ступенем гідроморфності. Ситуацію з ґрунтами, що розвинуті на корах вивітрювання сильномагнітних кристалічних порід, було описано нами раніше [16]. Площа таких ґрунтів відносно незначна, тому в загальному огляді ними можна знехтувати.

У межах діапазону, характерного для кожного з описаних ґрунтових типів, величина питомої магнітної сприйнятливості залежить від співвідношення впливу окремих факторів ґрунтоутворення. Для сільськогосподарських ґрунтів провідним чинником виступає тип землекористування. Узагальнено можна зауважити, що значення питомої магнітної сприйнятливості ґрунту зростають у ряду: ліс $\rightarrow$ пасовище $\rightarrow$ рілля. Водночас ця закономірність справедлива насамперед для порівнянь у межах одного ґрунтового типу. У сучасних ландшафтах, як правило, спостерігається консолідація кількох ґрунтових типів, тому порівняння значень питомої магнітної сприйнятливості в межах одного ландшафту потребує врахування їх ґрунтового різноманіття.

Одним із головних чинників формування таких неоднорідностей виступає водна ерозія, яка призводить до чергування зон змиву та перевідкладення ґрунтової речовини. У результаті цього у межах одного поля формується мозаїчна просторово-структурна організація ґрунту, яка визначає різницю в агрономічних характеристиках окремих ділянок. Така «матриця» властивостей схилових ландшафтів віддзеркалює родючість, поживний режим, здатність до утримання вологи та стійкість ґрунтів до деградаційних процесів, і магнітна сприйнятливість, при цьому, може бути ефективним індикатором змін цих характеристик [17,18]. Можливість застосування педомагнітного методу для індикації агрономічної якості ґрунтового покриву базується, зокрема, на спостережуваному зниженні значень магнітної сприйнятливості за умов тривалого зниження окисно-відновного потенціалу (ОВП) і вмісту органічного вуглецю. Обидва ці фактори розглядаються як ключові ознаки деградаційних процесів у ґрунтах, що безпосередньо впливають на їхню агрономічну цінність.

Однак така залежність магнітної сприйнятливості одночасно від кількох складових педогенезу (гідроморфності, гумусованості, текстури тощо) створює складнощі у формуванні прямої системи індикації агрономічно значущих неоднорідностей лише на основі магнітних параметрів. Інтерпретація результатів педомагнітної зйомки вимагає обов'язкового урахування просторових (елементи рельєфу, типи ландшафтів) та часових (сезонність, багаторічні тренди) чинників.

Зокрема, встановлено, що коефіцієнт кореляції між магнітною сприйнятливістю ґрунтів та вмістом органічного вуглецю зменшується зі збільшенням масштабу дослідження. Найвищі значення цього показника були зафіксовані на прикладі однорідної частини простого схилу однієї експозиції в умовах Лівобережної України. Водночас поширення опробувань на інші елементи мікрорельєфу призводить до розмиття зв'язку: в акумулятивних частинах зростає вплив гідроморфності, при цьому суттєво змінюється рівень окисно-відновного потенціалу, тобто, змінюються умови утворення сильно магнітних педогенних мінералів заліза — гематиту, магнетиту та маггеміту, і це суттєво знижує визначальну роль гумусованості.

Узагальнюючи, можна запропонувати шкалу спадання сили зв'язку між магнітною сприйнятливістю та вмістом гумусу у ґрунті для різних елементів агроландшафту: елементарний схил $\rightarrow$ поле сівозміни $\rightarrow$ група полів (масив) $\rightarrow$ ландшафтний район, причому кількісно це спад від 0,95 до 0,05. Таким чином, застосування педомагнітної зйомки для оцінки агрономічного стану ґрунтів потребує детального аналізу ландшафтного контексту досліджуваної території.

У зв'язку з широким поширенням та значною шкодочинністю ерозійних процесів в Україні доцільно детальніше розглянути можливості їх ідентифікації за допомогою методів магнітної зйомки. За умов «чистої», неускладненої іншими геоморфологічними або антропогенними факторами ерозії, значення питомої магнітної сприйнятливості ґрунтів на нееродованих ділянках закономірно змінюються в межах градієнта від показників, характерних для вихідних, незмитих ґрунтових відмін на плакорних елементах рельєфу, до величин, властивих місцевим ґрунотвірним породам у зонах максимального змиву. Така просторово зумовлена варіація магнітної сприйнятливості відображає інтенсивність та напрямок переміщення дрібнодисперсних фракцій, багатих на феромагнітні мінерали, і може бути використана як непрямий показник ступеня еродованості ґрунтового покриву.

Проте наведена вище закономірність спостерігається у практиці досить рідко. Значно частіше фіксується поєднання кількох чинників, що одночасно визначають величини педомагнітних показників ґрунту. Це ще більше ускладнює побудову універсальних моделей прямої індикації агрономічних властивостей на основі лише магнітної сприйнятливості та підкреслює необхідність більш комплексного підходу до інтерпретації результатів. Так одночасне врахування (комплексування) педомагнітних показників з іншими характеристиками ґрунту дозволяє більш повно розкрити сутність ерозійних процесів. Нижче (Рис. 2) наведено приклад такого застосування на схилових землях з відмінами чорнозему опідзоленого різного ступеня змитості, на базі результатів, описаних нами в одній з попередніх робіт [14]. В основі інтерпретації використано ерозійний індекс за М. В. Куценком [19].

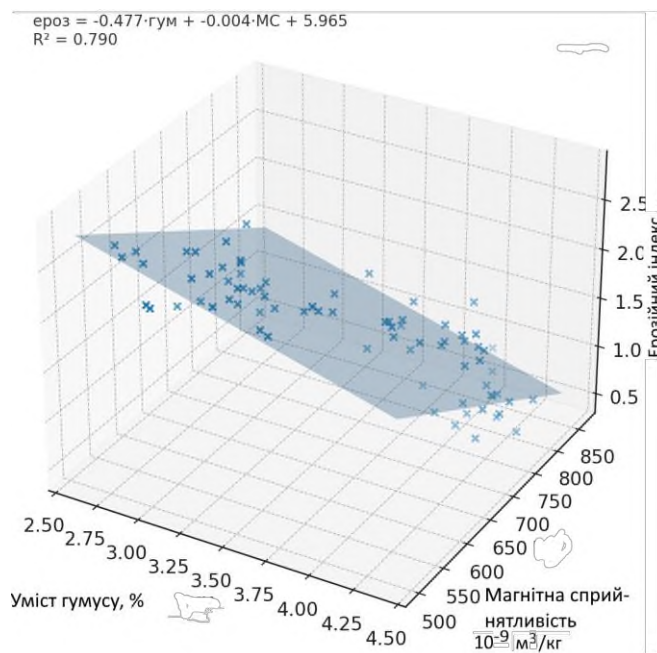


Рис. 2. Взаємозв'язок між умістом гумусу, магнітною сприйнятливістю та ерозійним індексом у чорноземі опідзоленому

Отриманий 3D-графік наочно відображає взаємозв'язок між рівнем ерозії ґрунтів (вісь Z), вмістом гумусу (X) та питомою магнітною сприйнятливістю (Y). Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,790$ вказує, що близько 79 % варіації ерозійних показників пояснюється комбінацією вмісту гумусу та магнітної сприйнятливості.

Це доволі високий рівень пояснювальної здатності моделі, що підтверджує значущість обох параметрів для оцінювання стану ґрунтового покриття.

На поверхні точок спостерігається чітка від'ємна залежність значень ерозійних втрат ґрунту від вмісту гумусу — зі зростанням частки органічної речовини інтенсивність ерозії зменшується. Водночас вплив питомої магнітної сприйнятливості менш виражений, але проявляється у зміщенні поверхні в просторі, що може свідчити про роль МС як індикатора походження та структурного стану ґрунту. Візуально площа добре узгоджується з більшістю точок, хоча у крайових ділянках простору спостерігаються певні відхилення, що може бути пов'язане з локальними особливостями геоландшафтних умов або дією додаткових факторів, не врахованих у моделі.

Якщо описувати безпосередній зв'язок у парі ерозійний індекс – магнітна сприйнятливість то залежність має поліноміальний характер (спад – зростання). Це підтверджує складність використання магнітної сприйнятливості як прямого індикатора змитості — її значення необхідно інтерпретувати у контексті геоландшафтних умов чи після попереднього калібрування. Її слід застосовувати як доповнювальний параметр, особливо цінний для швидких польових обстежень. Комбінування з умістом гумусу є фактором підвищення точності просторової діагностики ерозії та прогнозування її розвитку.

Педогенні мінерали заліза (гідрооксиди та оксигідрооксиди Fe) у процесі ґрунтоутворення переважно акумулюються у дрібнодисперсних фракціях гранулометричного складу ґрунту — глинистій та пилуватій. Це зумовлено їхньою високою питомою поверхнею та сорбційною здатністю, що сприяє фіксації і кристалізації вторинних мінералів заліза. Саме ці фракції формують найбільш стабільний мінерально-колоїдний комплекс, у межах якого відбувається накопичення магнітно-активних фаз (магнетиту, маггеміту, гематиту чи гідрогетиту). Завдяки цьому дрібні частки ґрунту виступають головними носіями педомагнітних властивостей, тоді як у грубіших піщаних фракціях вміст феромагнітних мінералів є незначним. Таким чином, магнітна сприйнятливість ґрунту може розглядатися як чутливий індикатор неоднорідностей ґрунтового профілю, зумовлених перерозподілом окремих фракцій його механічного складу під впливом екзогенних процесів.

Так, результати наших попередніх досліджень підтвердили наявність достовірного зв'язку між вмістом фізичної глини (гранулометричної фракції <0,01 мм) та величинами питомої магнітної сприйнятливості ($R = 0,72$) [20].

Це свідчить про тісну асоціацію педогенних мінералів заліза з дрібнодисперсними фракціями, що формують основу ґрунтово-колоїдного комплексу та визначають магнітні властивості ґрунту. Виявлений зв'язок має як діагностичне значення для характеристики гранулометричної неоднорідності, так і практичне — для індикації процесів ерозії та інших чинників міграції ґрунтових часточок (коефіцієнт кореляції (R) між індексом ерозійної небезпеки та питомою магнітною сприйнятливістю тут становив $-0,94$).

Значущими є закономірності просторового розподілу параметрів магнітних характеристик ґрунтів у ландшафті. Як правило, значення питомої магнітної сприйнятливості орного шару ґрунтів України лежать у межах $1...4 \times \text{ГП}$, де ГП – значення для ґрунтоутворної породи. Вихід значень за межі цього інтервалу може бути інтерпретований як прояв специфічних природних або антропогенних факторів [21]. Зниження нижче цього діапазону вказують на наявність відновних умов (надлишок води (гідроморфні умови) може знижувати МС, бо утворюються редукційні умови, де Fe переходить у розчинні форми), перевищення цього діапазону характерне для ділянок з антропогенним (техногенним) забрудненням ґрунтового покриття. Воно зумовлене надходженням у ґрунтовий покрив

додаткових джерел феромагнітних частинок (продукти згоряння палива, промислові викиди, металургійний пил тощо). Форма просторового розподілу МС при цьому відзначається поєднанням градієнтної складової (поступові зміни у природних умовах) та мозаїчності (плямистих локальних аномалій, зумовлених ерозійними та техногенними процесами).

Просторовий розподіл питомої магнітної сприйнятливості ґрунтів, як правило, характеризується підвищеним коефіцієнтом варіації (20–60 %), що відображає мозаїчність та неоднорідність ґрунтового покриття. На локальних еродованих ділянках, зокрема в межах балкових водозборів, цей показник може перевищувати 75 %. Типова форма кривої розподілу значень магнітної сприйнятливості в агроландшафтах є правосторонньо асиметричною, із вираженою варіабельністю та наявністю локальних аномалій. Це свідчить про складність і різноманітність структури ґрунтового покриття та чутливість магнітних характеристик до впливу природних і антропогенних чинників.

У той же час просторово-часова стабільність розподілу з річним лагом підтверджує інформативність показника для довгострокового моніторингу деструктивних процесів (Рис. 3). Дослід поставлено на схилі ділянці з чорноземом звичайним та його відмінами різного ступеня змитості ($n = 63$).

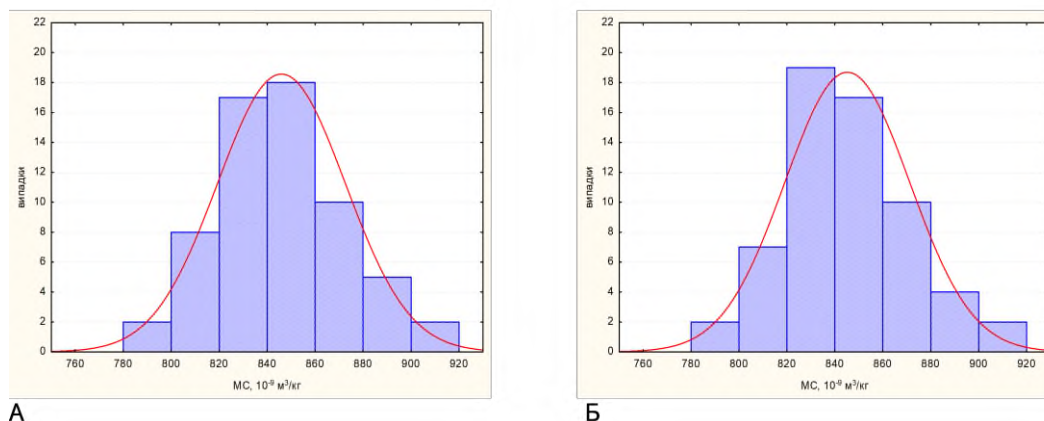


Рис. 3. Форма розподілу значень магнітної сприйнятливості чорнозему звичайного (А – 2003 рік; Б – 2004 рік)

Як показано на рисунку 3, форма розподілу значень магнітної сприйнятливості чорнозему звичайного практично незмінна, деякі розбіжності зумовлені флуктуацією значень біля середнього арифметичного. Така стабільність може слугувати основою індикації розвитку небажаних процесів у ґрунтовому покритті.

4. Висновки

Магнітні властивості ґрунту можуть розглядатись як універсальний індикатор процесів педогенезу. Вони зумовлені одними й тими ж факторами: клімат, ґрунотворна порода, антропогенний вплив, час, рельєф. Насамперед інформативними такі дані є для діагностики ерозійних процесів, антропогенного забруднення та надмірного зволоження. Показано, що зміни питомої магнітної сприйнятливості тісно корелюють із параметрами вмісту органічного вуглецю та гранулометричного складу ґрунтів, що зумовлює стійкий зв'язок між магнітними характеристиками та інтенсивністю схлизових процесів. Зазначена залежність має квазівідтворюваний характер і зберігається у часі, що підтверджує стабільність магнітного сигналу як природного індикатора ерозійних перетворень.

Подяка. Автор висловлює велику вдячність своєму науковому наставнику, світлої пам'яті Анатолію Васильовичу Сухораді (1944–2025), який заснував напрям досліджень педомагнітних властивостей ґрунтів в Україні.

Джерела посилання

1. Maher B. A., Alekseev A., Alekseeva T. Magnetic mineralogy of soils across the Russian steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2003. № 201. P. 321–341. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00618-7](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00618-7)
2. Jordanova D., Jordanova N., Petrov P. Pattern of cumulative soil erosion and redistribution pinpointed through magnetic signature of Chernozem soils. *Catena*. 2014. № 120. P. 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.03.020>
3. Borgne E. Susceptibilité Magnétique anormal du sol superficiel. *Annales de Geophysique*. 1955. № 11(4). P. 399–419.
4. Cook J. C., Carts S. L. Magnetic effects and properties of typical topsoils. *Journal of Geophysical Research*. 1962. № 67(2). P. 815–828.
5. Tucher P. M. High magnetic effect of lateritic soils in Cuba. *Geophysic*. 1952. № 17(4). P. 753–755.
6. Singer M. J., Fine P. Pedogenic Factors Affecting Magnetic Susceptibility of Northern California Soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1989. 53(4). P. 1119–1127. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300040023x>
7. Boyko T., Scholger R., Stanjek H., MAGPROX Team. Topsoil magnetic susceptibility mapping as a tool for pollution monitoring: repeatability of in situ measurements. *Journal of Applied Geophysics*. 2004. № 55(3-4). P. 249–259. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.01.002>
8. Jeleńska M., Hasso-Agopsowicz A., Kopcewicz B., Sukhorada A., Tyamina K., Kadzialko-Hofmokr M., Matviishina, Z. Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A case study from Ukraine. *Geophysical Journal International*. 2004. № 159. P. 104–116. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02370.x>
9. Sokolowska Z., Hajnos M., Alekseev A., Alekseeva T. Magnetic susceptibility of the arable layer of soil with organic farming and mineral fertilization. *Acta Geophysica*. 2000. № 38. P. 175–183.
10. Hanesch M., Scholger R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. *Geophysical Journal International*. 2005. № 161(1). P. 50–56. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02577.x>
11. Gorka-Kostrubiec B., Teisseyre-Jeleńska M., Dytłow S. K. Magnetic properties as indicators of Chernozem soil development. *Catena*. 2016. № 138. P. 91–102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.014>
12. Menshov O., Kruglov O., Vyzhva S., Nazarov P., Pereira P., Pastushenko T.. Magnetic methods in tracing soil erosion, Kharkiv Region, Ukraine. *Stud. Geophys. Geod.* 2018. № 62. P. 681-696. <https://doi.org/10.1007/s11200-018-0803-1>
13. Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы исследования физических свойств почв. Учебное пособие/ 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
14. Dearing J. A. Environmental Magnetic Susceptibility, Using the Bartington MS2 System. (2nd ed.). *Chi Publishing*. 1999.
15. Jordanova N. Soil Magnetism. *Academic Press. Cambridge*, 2016
16. Круглов О. В., Попов С. А. Магнетизм корінних порід та магнітна сприйнятливості ґрунту. *Агрохімія і ґрунтознавство. міжвідом. темат. наук. зб.* Харків: ННЦ “ІГІ ім. О.Н. Соколовського”. 2021. Вип. 91. С. 4–11. <https://doi.org/10.31073/acss91-01>
17. Jakšík O., Kodešová R., Kapička A., Klement A., Fér M., Nikodem A. Using magnetic susceptibility mapping for assessing soil degradation due to water erosion. *Soil & Water Res.* 2016. № 11(2). P. 105–113. <https://doi.org/10.17221/233/2015-SWR>
18. Kruglov O., Menshov O., Horoshkova L., Kruhlov B. Magnetic susceptibility of inclined soils and its relationship with some agronomic indicators. *Plant and Soil Science*. 2023. № 14(1). P. 39–50. <https://doi.org/10.31548/plant1.2023.39>
19. Куценко М. В., Тімченко Д. О. Теоретичні основи організації системи охорони ґрунтів від ерозії в Україні. Харків: КП “Міська друкарня”, 2016. 240 с.
20. Круглов О. Особливості розподілу магнітної сприйнятливості чорнозему типового на схилах. *Вісник Харківського національного аграрного університету. Сер. Ґрунтознавство*. 2012. № 4. С. 66–69.
21. Круглов О., Меньшов О., Коляда В., Ачасова А., Андреева О. До питання комплексування геофізичних та агрохімічних методів досліджень схилих земель. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2021. Т. 3. № 94. С. 53–58. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.94.06>

UDC 631.4:537.621.4(477.5)

Soil magnetism as an ecological phenomenon and its diagnostic significance

O. V. Kruglov

National Scientific Center “Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky”,
Kharkiv, Ukraine

✉ alex_kruglov@ukr.net

ORCID 0000-0003-2663-0935

Received 18.09.2025; Revised 19.12.2025; Accepted 26.12.2025; Available online 30.12.2025

Abstract. Monitoring of magnetic properties of soils has shown itself to be a sensitive and accessible diagnostic tool that allows not only to assess the general level of anthropogenic load on the agricultural landscape, but also to trace the spatial heterogeneity of the soil cover, in particular, caused by degradation processes associated with water erosion. The studies revealed some results of the analysis of magnetic properties as an indicator of the ecological state of soils on agricultural lands of Ukraine, taking into account the geographical, genetic and anthropogenic prerequisites for the formation of soil magnetism. The main indicator studied is the specific magnetic susceptibility (χ), which was determined

in soil samples in an air-dry state using the KLY-2 magnetic meter, which provides high accuracy in determining even low levels of magnetic susceptibility of soils of natural ecosystems. It was found that the spatial patterns of the distribution of χ reflect both the geochemical features of landscapes and the specifics of modern land use. The ranges of variations of specific magnetic susceptibility values for the most common types of soils of the Left-Bank part of the Polissya, Forest-Steppe and Steppe zones of Ukraine are given based on experimental data obtained in these studies. It is shown that the relationship of specific magnetic susceptibility with slope processes, caused by regular changes in the content of soil organic carbon, remains stable in time. In addition, the possibility of using statistical characteristics of the spatial distribution of magnetic susceptibility values as an indicator of the complexity and heterogeneity (complexity) of the soil cover structure is demonstrated. The features of the manifestation of the sensitivity of magnetic characteristics to the influence of some natural and anthropogenic factors are described.

Keywords: ecology; erosion; magnetic susceptibility; slope soil.

Citing: Kruglov O. B. (2025). Soil magnetism as an ecological phenomenon and its diagnostic significance. *AgroChemistry and Soil Science*, 99, 4-12. doi:10.31073/acss99-01 [in Ukrainian].

References

1. Maher, B. A., Alekseev, A., & Alekseeva, T. (2003). Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 201, 321–341. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00618-7](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00618-7)
2. Jordanova, D., Jordanova, N., & Petrov, P. (2014). Pattern of cumulative soil erosion and redistribution pinpointed through magnetic signature of Chernozem soils. *Catena*, 120, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.03.020>
3. Borgne, E. (1955). Susceptibilité Magnétique anormal du sol superficiel. *Annales de Geophysique*, 11(4), 399–419.
4. Cook, J. C., & Carts, S. L. (1962). Magnetic effects and properties of typical topsoils. *Journal of Geophysical Research*, 67(2), 815–828.
5. Tucher, P. M. (1952). High magnetic effect of lateritic soils in Cuba. *Geophysic*, 17(4), 753–755.
6. Singer, M. J., & Fine, P. (1989). Pedogenic Factors Affecting Magnetic Susceptibility of Northern California Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 53(4), 1119–1127. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.0361599500>
7. Boyko, T., Scholger, R., Stanjek, H., & MAGPROX Team. (2004). Topsoil magnetic susceptibility mapping as a tool for pollution monitoring: repeatability of in situ measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 55, 249–259. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.01.002>
8. Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kopcewicz, B., Sukhorada, A., Tyamina, K., Kadzialko-Hofmohl, M., & Matviishina, Z. (2004). Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A case study from Ukraine. *Geophysical Journal International*, 159, 104–116. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02370.x>
9. Sokolowska, Z., Hajnos, M., Alekseev, A., & Alekseeva, T. (2000). Magnetic susceptibility of the arable layer of soil with organic farming and mineral fertilization. *Acta Geophysica*, 38, 175–183.
10. Hanesch, M., & Scholger, R. (2005). The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. *Geophysical Journal International*, 161, 50–56. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02577.x>
11. Gyrka-Kostrubiec, B., Teisseyre-Jeleńska, M., & Dytlow, S.K. (2016). Magnetic properties as indicators of Chernozem soil development. *Catena*, 138, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.014>
12. Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Nazarok, P., Pereira, P., & Pastushenko, T. (2018). Magnetic methods in tracing soil erosion, Kharkov Region, Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*. 62, 681–696. <https://doi.org/10.1007/s11200-018-0803-1>
13. Vadyunina, A. F., & Korchagina, Z. A. (1986). Methods for studying the physical properties of soils (3rd ed., revised and enlarged). Moscow: Agropromizdat [in Russian].
14. Dearing, J. A. (1999). Environmental Magnetic Susceptibility, Using the Bartington MS2 System. (2nd ed.). *Chi Publishing*.
15. Jordanova, N. (2016). Soil Magnetism. *Academic Press*.
16. Kruglov, O., & Popov, S. (2021). Rock magnetism and soil magnetic susceptibility. *AgroChemistry and Soil Science*, 91, 4–11. <https://doi.org/10.31073/acss91-01> [in Ukrainian].
17. Jakšik, O., Kodešová, R., Kapička, A., Klement, A., Fér, M., & Nikodem, A. (2016). Using magnetic susceptibility mapping for assessing soil degradation due to water erosion. *Soil & Water Res.*, 11, 105–113. <https://doi.org/10.17221/233/2015-SWR>
18. Kruglov, O., Menshov, O., Horoshkova, L., & Kruhlov, B. (2023). Magnetic susceptibility of inclined soils and its relationship with some agronomic indicators. *Plant and Soil Science*, 14(1), 39–50. <https://doi.org/10.31548/plant1.2023.39>
19. Kutsenko, M. V., & Timchenko, D. O. (2016). *Theoretical foundations of organizing the soil protection system against erosion in Ukraine*. Kharkiv [in Ukrainian].
20. Kruglov, O. (2012). Characteristics of the distribution of the magnetic susceptibility of typical chernozems on the slopes. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu*, 4, 66–69 [in Ukrainian].
21. Kruglov O., Menshov O., Kolada V., Achasova A., & Andreeva O. (2021). Integrating of geophysical and agrochemical methods for slope lands studying. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 94, 3, 53–58. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.06> [in Ukrainian].

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, органо-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 органо-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 елементу 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 елементу.

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., Шумидай 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., Cherny, 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-pshenyici-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].

УДК 631.811:631.416.4

Просторово-часові зміни вмісту рухомого калію в орному ґрунті**С. С. Коваленко**

Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 19.11.2025 Отримано після доопрацювання 11.12.2025 Затверджено до видання 26.12.2025 Доступно онлайн 30.12.2025 <i>Ключові слова:</i> ґрунт; калій рухомий; просторова неоднорідність; часова динаміка; метод Чирикова; метод Мачигіна; рН ґрунту; точне землеробство	Наведено результати дослідження просторово-часової динаміки вмісту рухомих форм калію в орному шарі ґрунту (0–30 см) за період 2018–2020 рр. на двох дослідних об'єктах у Харківській області в межах Лівобережного Лісостепу України. Об'єкт № 1 — поле площею 48,7 га зі строкатим ґрунтовим покривом з переважанням чорнозему опідзоленого (Luvic Chernic Phaeozem) та темно-сірого опідзоленого (Luvic Greyzemis Phaeozem) ґрунту з еродованими та зволоженими різновидами; об'єкт № 2 — поле площею 24 га, де переважає чорнозем типовий (Haplic Chernozem) з контурами еродованих та підвищено зволожених різновидів. Польові дослідження включали відбір двічі на рік змішаних проб ґрунту з 24 стаціонарних майданчиків на кожному об'єкті. Вміст рухомого калію у пробах визначали двома методами: Чирикова (для опідзолених ґрунтів) та Мачигіна (для нейтральних і слаболужних чорноземів). Результати показали високу просторову та часову варіабельність вмісту рухомого калію в ґрунті — найвищі концентрації (120–185 мг/кг за методом Чирикова та 211–347 мг/кг за Мачигінім) фіксували навесні, найнижчі (80–150 мг/кг) — восени. Встановлено стійку просторову структуру розподілу вмісту калію: максимальні значення зафіксовано в мікрозападах і підвищено зволожених контурах, мінімальні — на еродованих підвищеннях і слабобоксероморфних різновидах. Різниця між крайніми значеннями сягала однієї градації забезпеченості ґрунтів калієм за шестибальною шкалою забезпеченості. Виявлено статистично значущий зв'язок між кислотністю ґрунту та вмістом рухомого калію: більш високі значення рН (у бік нейтрального) супроводжуються і більш високими концентраціями рухомого калію. Обидва аналітичні методи показали високу стабільність просторового розподілу вмісту калію протягом трьох років, що свідчить про домінуючий вплив факторів ґрунтоутворення (рельєф, вологість) і характеристик, властивих певному типу ґрунту, над річними коливаннями погоди та агротехнікою. Отримані дані підтверджують необхідність точного підходу до внесення калійних добрив за умови строкатого ґрунтового покриття, оскільки, хоча середній рівень забезпеченості є високим, але локальні зони дефіциту та надлишку співіснують у межах одного поля. Використання лише середніх показників по полю може призводити або до недоотримання врожаю, або до нераціональних витрат добрив.

✉ stanislawkowalenko@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6834-2259

Форма цитування: Коваленко С. С. Просторово-часові зміни вмісту рухомого калію в орному ґрунті. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків: 2025. Вип. 99. С. 22–31. doi: 10.31073/acss99-03

1. Вступ

Роль калію, як одного з ключових елементів живлення рослин, важко переоцінити — він впливає на процес обміну речовин, водний баланс, стійкість до посухи і морозів, а також сприяє синтезу білків та вуглеводів. У контексті сільського господарства, зокрема для чорноземів у Лісостеповій зоні України, вивчення просторової неоднорідності та часової варіабельності вмісту рухомого калію набуває особливого значення. Від кількості та доступності калію в ґрунті залежить продуктивність сільськогосподарських культур, що робить його ключовим фактором при плануванні агротехнічних заходів.

Лівобережна частина Лісостепу України є однією з найбільш родючих територій, яка характеризується високою часткою чорноземів, що мають високий природний рівень родючості. Однак навіть на цих землях спостерігаються значні відмінності у вмісті калію, що зумовлено як природними так і антропогенними

чинниками [1]. Природні фактори, такі як характерні властивості ґрунту певного типу, кліматичні та гідрологічні особливості, зумовлюють нерівномірний просторовий розподіл калію в ґрунті [2]. Водночас інтенсивне використання ґрунтів, зокрема внесення мінеральних добрив та інших агрохімікатів, також впливає на динаміку калію, що може спричиняти деградацію ґрунту та зниження його родючості у довгостроковій перспективі [3].

В умовах зміни клімату забезпечення рослин калієм стає більш складним завданням, що потребує адаптації сучасних агротехнічних методів. Вивчення просторової неоднорідності та часової варіабельності калію у чорноземах дає можливість отримати дані, необхідні для розробки адаптивних методів управління ґрунтовими ресурсами, що дозволяє підвищити стійкість агроєкосистем до зовнішніх чинників [4].

Важливість досліджень у цьому напрямі зумовлена необхідністю глибшого розуміння процесів, які визначають просторову неоднорідність калію [5]. Така неоднорідність потребує розробки більш точних і локалізованих рекомендацій для агротехнічних заходів, що дозволить оптимізувати рівень калію у ґрунті та підвищити ефективність його засвоєння рослинами та, відповідно, на продуктивність культур [6].

У природних умовах вміст калію в ґрунті визначається його початковою кількістю у ґрунтотвірній породі, що призводить до накопичення або втрати цього елемента [7]. Калій у ґрунті одночасно є присутнім у різних формах, як: нерухомий, фіксований, іонообмінний та водорозчинний. Найбільше значення для рослин має рухомий калій, до якого відносять іонообмінний та водорозчинний, оскільки саме ці форми доступні для засвоєння кореневою системою сільськогосподарських культур. Проте наявність і доступність рухомого калію у ґрунтах не є постійною і залежить від ряду факторів [8, 9].

Нерівномірний розподіл калію у ґрунтовому профілі, а також зміни його кількості з часом створюють потребу в розробці адаптивних систем агротехнічного управління, які врахували б ці особливості. Такі підходи є важливими для раціонального використання калійних добрив, оскільки надмірне внесення калію може призводити до негативних наслідків як для економіки господарства, так і для екологічного стану ґрунту [10].

На сьогодні одним з актуальних питань є визначення рівня просторової неоднорідності вмісту рухомого калію в чорноземах і його часової варіабельності протягом вегетаційного періоду. Це дозволяє оцінити, наскільки ефективно рослини засвоюють потреби в цьому елементі залежно від кліматичних умов та агротехнічних заходів. Важливо також дослідити вплив застосування калійних добрив на рівень рухомого калію в ґрунті, оскільки це допоможе оптимізувати внесення добрив і уникнути можливого перенасичення ґрунту, що може мати негативні значення для ґрунтової екосистеми.

Аналіз динаміки калію у ґрунтах також сприяє розумінню загальних тенденцій зміни родючості земель. У межах лісостепової зони, яка характеризувалася змінністю кліматичних умов, водного режиму та інтенсивності використання ґрунтів, такі дослідження є надзвичайно важливими для забезпечення довготривалої стабільності агроєкосистем. Результати можуть стати основою для науково обґрунтованих рекомендацій щодо управління ґрунтовими ресурсами, а також сприяти розробці методів збереження родючості чорноземів.

У статті висвітлено результати дослідження й аналіз просторової та часової мінливості вмісту рухомого калію у ґрунтах на території двох дослідних полів з виявленням основних факторів, які впливають на його розподіл і динаміку.

2. Об'єкти та методика досліджень

Дослідження проводили на двох дослідних полях ДП «ДГ «Граківське» ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського» у Харківській області. Кожне поле для спостережень було розділене на 24 майданчики, з площею кожного — 1 га.

Об'єкт № 1 — дослідне поле площею 48,7 га, ґрунтовий покрив поля (Рис. 1) включає чорнозем опідзолений (шифр 3.) і темно-сірий опідзолений ґрунт (1.), але є також їхні різновиди, а саме: темно-сірий опідзолений слабксероморфний ґрунт у комплексі з еродованим (2.), чорнозем опідзолений підвищено зволожений (4.) і чорнозем опідзолений намитий (5.). Через строкатість ґрунтового покриття вміст органічного вуглецю в ґрунті орного шару на цьому полі коливається від 2,1 до 3,8 %, рН сольовий — від 4,60 до 5,40.

Об'єкт № 2 — дослідне поле площею 24 га; у ґрунтовому покритті поля (Рис. 2) переважає чорнозем типовий, але є також контури його еродованих (шифр 2 v), вилугуваних та підвищено звожених (3 v) різновидів. Вміст органічного вуглецю у ґрунті орного шару коливається від 3,42 до 3,88 %, рН сольовий — від 5,55 до 7,00.

Ланка сівозмін у період 2018–2020 рр. включала такі культури: на об'єкті № 1 — чистий пар, соняшник, кукурудза на зерно; на об'єкті № 2 — соняшник, кукурудза на зерно, ячмінь. Внесення добрив на об'єктах 1 і 2: нітроаммофоска 150 кг/га (2018), аммофос 120 кг/га (2019 і 2020).

Дослідження проводили від квітня 2018 до листопада 2020 р. Проби ґрунту відбирали з шару 0–30 см кожного року у квітні–травні (весна) та у жовтні–листопаді (осінь). На кожному з 24 робочих майданчиків, позначених на рис. 1 і 2, у центральній точці з визначеними координатами та у радіусі 10 м від неї відбирали 7 індивідуальних проб, з яких формували змішаний зразок для аналізування. Таким чином на кожному майданчику за три роки було відібрано у часі по 6 змішаних зразків — 3 навесні та 3 восени.

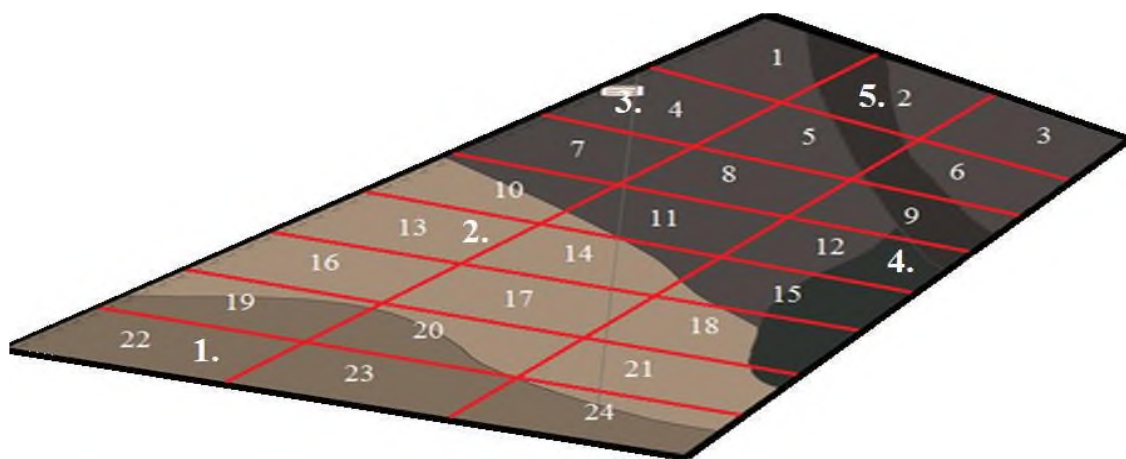
Визначення вмісту рухомого калію виконували за методом Чирикова, згідно з ДСТУ 4115:2002¹, та методом Мачигіна, згідно з ДСТУ 4114:2002². Метод Чирикова рекомендований для аналізу ґрунтів опідзоленого типу, а метод Мачигіна підходить для дослідження різноманітних ґрунтів, таких як темно-сірі опідзолені, ясно-сірі лісові, чорноземи типові, лучно-чорноземні й темно-каштанові. Кожен метод адаптований до специфіки ґрунтів, враховуючи їхні фізико-хімічні властивості. Це дозволило отримати комплексну картину просторової неоднорідності вмісту калію, а також визначити його динаміку впродовж сезонів.

Значення рН сольового вимірювали згідно з ДСТУ 7910:2015³ (методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії). Дані, одержані в ході дослідження, обробляли методами математичної статистики (кореляційно-регресійний аналіз) за допомогою програм Statistica 13.5.0.17, Microsoft Excel 2016.

¹ ДСТУ 4114-2002. Ґрунти. Визначення рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Мачигіна. [Чинний від 2003-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2002. 10 с.

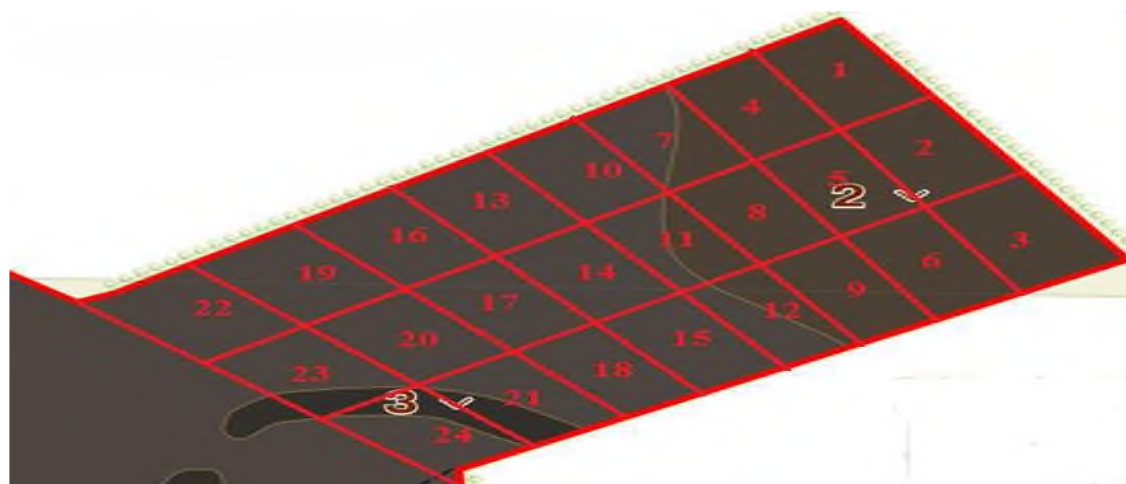
² ДСТУ 4115-2002. Ґрунти. Визначення рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Чирикова. [Чинний від 2003-01-01]. Київ, Держспоживстандарт України, 2002. 10 с.

³ ДСТУ 7910:2015. Якість ґрунту. Визначення обмінної кислотності [Чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ» 2015, 2016. 9 с.



ґрунти: 1. – темно-сірий опідзолений; 2. – темно-сірий у комплексі з еродованим; 3. – чорнозем опідзолений; 4. – чорнозем опідзолений зволожений; 5. – чорнозем опідзолений намитий

Рис. 1. Ґрунтовий покрив та схема розміщення робочих майданчиків на об'єкті № 1



ґрунти: фон – чорнозем типовий; 2 v – чорнозем типовий еродований; 3 v – чорнозем типовий підвищено зволожений

Рис. 2. Ґрунтовий покрив та схема розміщення робочих майданчиків на об'єкті № 2

3. Результати досліджень

Дані досліджень за 2018–2020 роки вказують на суттєву часову варіабельність вмісту рухомого калію, що відображає сезонні та річні коливання. У весняний період у всі роки досліджень значення вмісту калію були найвищими, що може бути зумовлено низькою активністю біологічних процесів у зимовий період і мінімальним виносом елементу рослинами. Наприклад, у 2018 р. середній вміст калію у травні становив 143,8 мг/кг, тоді як у 2019 та 2020 значення були дещо нижчими — 96 і 103,7 мг/кг відповідно. Восени значення вмісту рухомого калію (за Чириковим) у 2018 р. демонструють найбільше зниження, пов'язане з активним виносом калію рослинами, навесні 2019 спостерігалось зменшення до 96 мг/кг, а у 2020 — навіть деяке накопичення до 103,7 мг/кг (Табл. 1).

Результати визначення вмісту калію у ґрунті на об'єкті № 1 за методом Мачигіна у 2018 і 2019 рр. демонструють зниження осінніх значень порівняно з весняними, а у 2020 — навпаки, підвищення.

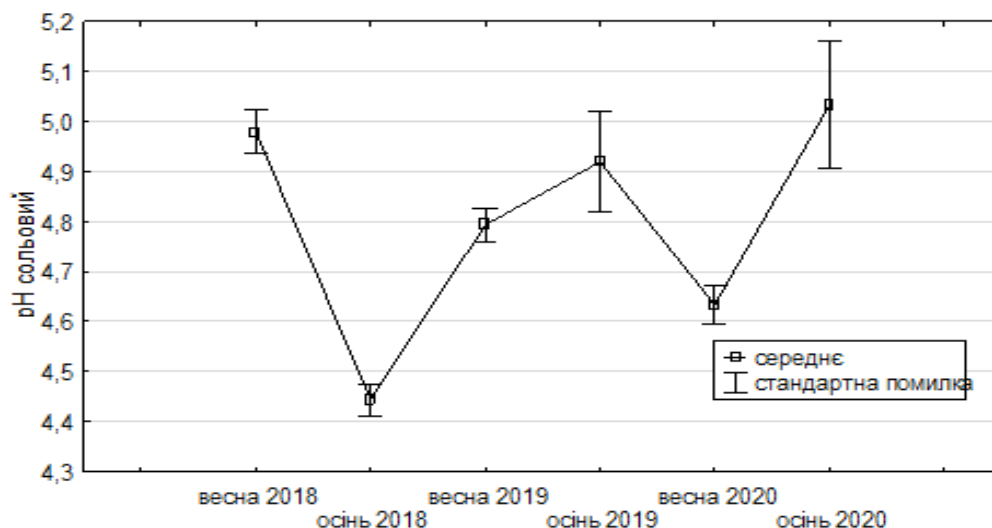
Таблиця 1

Статистичні характеристики варіабельності вмісту рухомого калію у ґрунті на об'єкті № 1

Показник	Вміст рухомого калію, мг/кг ґрунту					
	2018		2019		2020	
	весна	осінь	весна	осінь	весна	осінь
<i>За методом Чирикова</i>						
Середнє арифметичне	143,8	112,5	96,0	102,9	103,7	128,3
Стандартна похибка середнього	4,3	2,5	2,6	3,1	2,6	11,2
Стандартне відхилення	21,0	12,2	12,6	15,0	12,9	54,9
Коефіцієнт варіації	15	11	13	15	12	42
<i>За методом Мачигіна</i>						
Середнє арифметичне	215	190	352	215	184	231
Стандартна похибка середнього	12	3	8	5	4	14
Стандартне відхилення	59	15	39	26	20	68
Коефіцієнт варіації	28	8	11	12	11	29

Просторова неоднорідність калію відображена через показники варіації вмісту калію у різних частинах полігону, що були оцінені статистичними методами (коефіцієнт варіації і стандартне відхилення). Найвищий коефіцієнт варіації за обома аналітичними методами констатовано у пробах, відібраних восени 2020 р.

Середні значення рН свідчать про помітну часову динаміку кислотності ґрунту (Рис. 3) з найвищим значенням восени 2020 р.

**Рис. 3.** Динаміка середніх значень рН сольового ґрунтів на об'єкті № 1

У більшості випадків значення рН тримаються у межах 5,5–6,0, що є прийнятним для багатьох сільськогосподарських культур. Найбільше відхилення (0,4) зафіксовано на ділянках з темно-сірими ґрунтами, що свідчить про високу неоднорідність кислотності.

На об'єкті № 2 внесення калійних добрив здійснювали одноразово у формі нітроамофоски в кількості 150 кг/га. Цей захід проводили після відбирання проб ґрунту весною у 2018 році. За результатами аналізу, середній вміст рухомого калію в орному шарі ґрунту, визначений за методом Чирикова, змінювався, залежно від строку пробовідбору, в межах 130–185 мг/кг. Такі значення вказують, переважно, на високий рівень забезпеченості калієм (120–180 мг/кг).

Метод Мачигіна, застосований для аналізування тих самих проб, показав концентрацію калію в інтервалі 211–347 мг/кг. Ці результати свідчать про забезпеченість калієм як на підвищеному (201–300 мг/кг), так і на високому (301–

400 мг/кг) рівнях. Таким чином, різні методики оцінки підтверджують високу родючість ділянки (Табл. 2).

Таблиця 2

Статистичні характеристики варіабельності вмісту в ґрунті рухомого калію на об'єкті № 2 (у шарі 0–30 см)

Показник	Вміст рухомого калію, мг/кг ґрунту					
	2018		2019		2020	
	весна	осінь	весна	осінь	весна	осінь
<i>За методом Чирикова</i>						
Середнє арифметичне	169	185	152	156	152	130
Стандартна похибка середнього	5	5	4	6	4	11
Стандартне відхилення	25	26	19	29	19	55
Коефіцієнт варіації	15	14	13	19	13	42
<i>За методом Мачигіна</i>						
Середнє арифметичне	211	347	282	313	285	258
Стандартна похибка середнього	12	7	7	9	7	15
Стандартне відхилення	56	33	33	43	33	75
Коефіцієнт варіації	27	9	12	14	12	29

4. Обговорення результатів дослідження

Графік (Рис. 4) демонструє зв'язок між значеннями рН ґрунту у весняний період та вмістом рухомого калію на об'єкті № 2 у 2018–2020 роках. Основні тенденції, які можна виділити — це кореляція між рівнем кислотності ґрунту (рН) та концентрацією рухомого калію. У більшості випадків підвищення рН (зміщення в бік нейтрального середовища) супроводжувалося збільшенням вмісту рухомого калію. Це підтверджує вплив кислотно-лужного балансу на доступність калію для рослин. Значення рН варіювалися від 5,0 охоплюючи слабкокислі та близькі до нейтральних ґрунти. Концентрація рухомого калію зафіксована в межах від 130 до 200 мг/кг, що відповідає високому рівню забезпеченості за методом Чирикова.

Взаємозв'язок між рівнем рН ґрунту та вмістом рухомого калію є непрямым і значною мірою визначається особливостями вологонакопичення різних ґрунтів на досліджуваній території. Як показано на рис.4, чорноземи типові еродовані (майданчики №1, 3, 4, 5) характеризуються найвищими значеннями рН, але порівняно невеликим вмістом калію за обома методами. Своєю чергою, на ділянках із підвищено зволженими чорноземами та прилеглими територіями (майданчики № 21, 22, 23, 24) зафіксовано найнижчі значення рН, але значно вищі рівні калію. Такий розподіл можна пояснити тим, що накопичення вологи позитивно впливає на доступність калію в ґрунті, особливо у весняний період.

Аналізуючи дані на об'єкті № 1 за роки досліджень, можна виділити групи майданчиків, які демонструють схожу динаміку вмісту рухомого калію (Рис. 5 і 6). Такі тенденції визначаються типами ґрунтів, їх родючістю, і умовами, що впливають на засвоюваність калію.

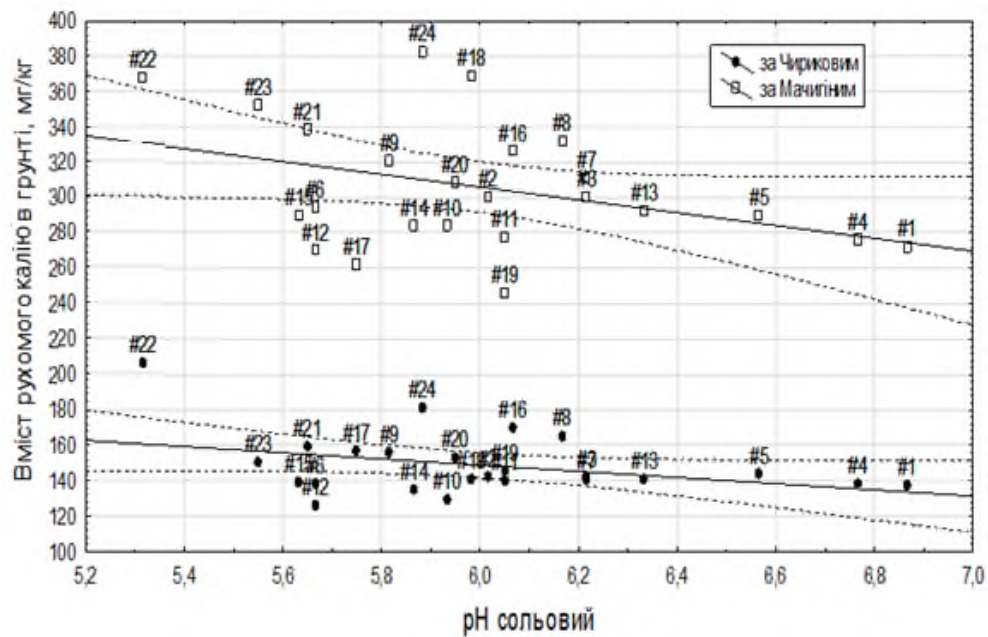


Рис. 4. Зв'язок між рН ґрунту у весняний період та вмістом рухомого калію, визначеного за двома методами, на об'єкті № 2 у 2018-2020 рр.

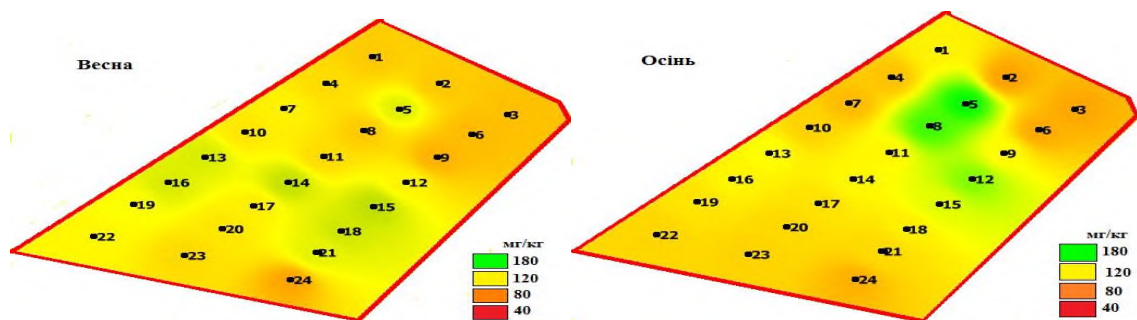


Рис. 5. Картограма вмісту рухомого калію за методом Чирикова у ґрунті на об'єкті № 1 за строками спостережень у 2018-2020 рр.

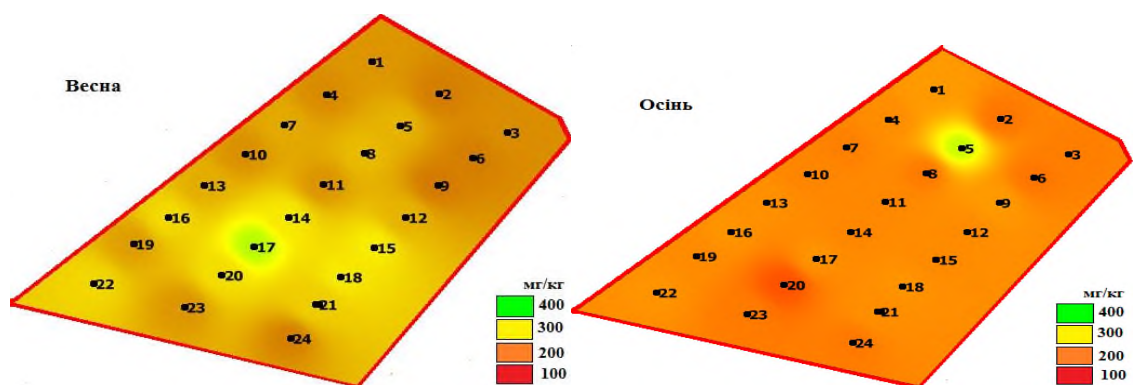


Рис. 6. Картограма вмісту рухомого калію за методом Мачигіна у ґрунті на об'єкті № 1 за строками спостережень у 2018-2020 рр.

Майданчики з чорноземами типовими демонструють стабільну високу забезпеченість калієм протягом усіх сезонів і років дослідження. Весняний період має схожі початкові значення калію (170–185 мг/кг за методом Чирикова та 300–330 мг/кг за методом Мачигіна). Літній період (у цій статті не наведено ці дані) виділяється середнім зниженням до 140–150 мг/кг. Восени повернення до

значень весняного рівня через низьку варіабельність у водному режимі та стабільність органічного шару. Чорноземи типові мають подібну динаміку на різних майданчиках через високу буферну здатність і природну родючість ґрунту. Темно-сірі опідзолені ґрунти демонструють знижені рівні вмісту калію порівняно з чорноземами, але схожу динаміку між собою. Весняні значення рухомого калію варіюють у межах 140–160 мг/кг за методом Чирикова, що нижче, ніж на чорноземах. Восени також спостерігається часткове відновлення, але на 10–20 мг/кг нижче, ніж на чорноземах. Майданчики зі змішаними ґрунтами, які включають еродовані ділянки, демонструють більшу варіабельність у короткотерміновій перспективі, але схожість — у середньому значенні за роки дослідження. Початкові значення коливаються в широкому діапазоні (130–180 мг/кг). Восени відновлення є найменшим порівняно з іншими типами ґрунтів, що пов'язано із зниженою родючістю. Еродовані майданчики мають схожу динаміку на всіх об'єктах через вплив деградаційних процесів.

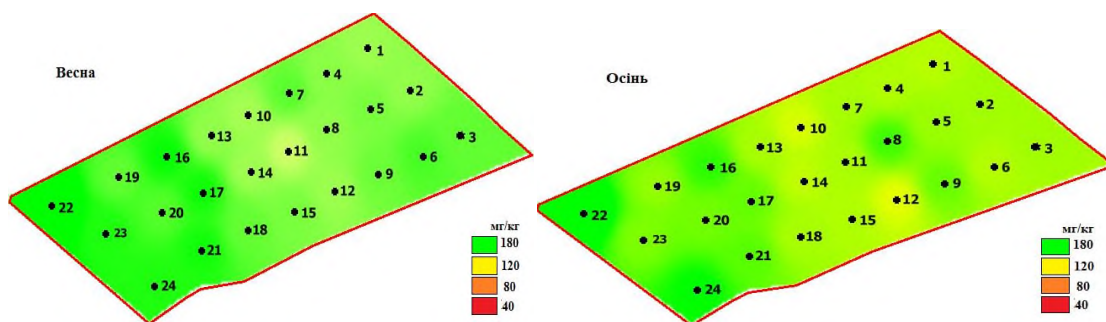


Рис. 7. Картограма вмісту рухомого калію за методом Чирикова у ґрунті на об'єкті № 2 за строками спостережень у 2018-2020 рр.

Початкові значення коливаються в широкому діапазоні (130–180 мг/кг). Восени відновлення є найменшим, порівняно з іншими типами ґрунтів, що пов'язано зі зниженою родючістю. Майданчики з еродованими ґрунтами мають схожу динаміку на обох об'єктах через вплив деградаційних процесів.

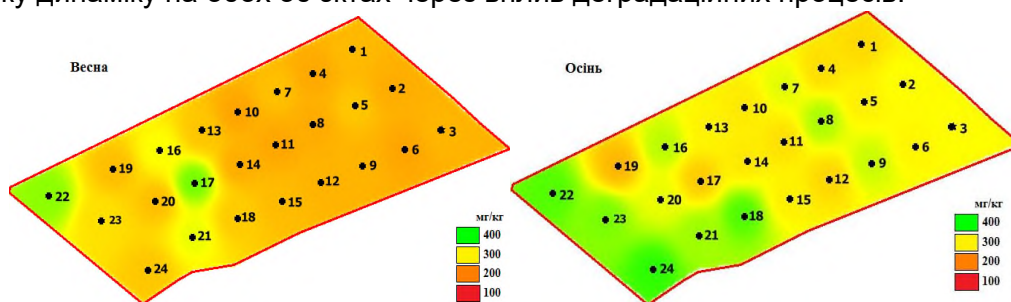


Рис. 8. Картограма вмісту рухомого калію за методом Мачигіна у ґрунті на об'єкті № 2 за строками спостережень у 2018-2020 рр.

Аналіз даних свідчить, що середня різниця між максимальними та мінімальними значеннями вмісту рухомого калію в орному шарі ґрунтів об'єкта № 2 (Рис. 7 і 8) становить: за методом Чирикова — 56,6 мг/кг (мінімальне значення — 137,8, максимальне — 194,4), тоді як середнє арифметичне дорівнює 156,0 мг/кг. За методом Мачигіна ця різниця становить 108,5 мг/кг (мінімум — 248,1 максимум — 356,6) за середнього значення 282,7 мг/кг. Обидва методи підтверджують відповідність отриманих значень межах забезпеченості: 60 мг/кг для методу Чирикова та 100 мг/кг для методу Мачигіна. Як і на об'єкті № 1, розподіл зон із максимальними та мінімальними показниками рухомого калію був стабільним протягом усіх років дослідження. Така повторюваність свідчить про

тісний зв'язок концентрації калію з особливостями структури ґрунтового покриву дослідної території, включаючи фізико-хімічні характеристики і режим вологонакопичення.

5. Висновки

Чорноземи типові, чорноземи опідзолені та темно-сірі опідзолені ґрунти мають схожі тенденції просторово-часових змін вмісту рухомого калію в орному шарі. Однак еродовані та намиті різновиди цих ґрунтів відзначаються помітними відмінностями, хоча в загальних трендах також зберігається схожість у динаміці сезонних коливань. Найвищий рівень вмісту рухомого калію спостерігався у ґрунтах мікрозападин з поліпшеним вологонакопиченням, найнижчий — на еродованих та слабосероморфних ґрунтових різновидах, а середня різниця між ними сягала розмірів однієї градації рівня забезпеченості.

За оцінкою калійного стану ґрунтів результати вимірювань за методом Чирикова та методом Мачигіна мають тісну кореляцію. Поєднання методичних підходів дозволяє отримати комплексну картину просторової неоднорідності калію, а також визначити його динаміку впродовж сезонів.

Кислотність ґрунту є важливим фактором, який впливає на рухомість калію. У більшості випадків підвищення значення рН у бік нейтрального середовища супроводжувалося збільшенням вмісту рухомого калію.

Список використаних джерел

1. Zeng Q., Brown P. H. Soil potassium mobility and uptake by corn under differential soil moisture regimes. *Plant and Soil*. 2000. Vol. 221. № 1. P. 121-134. <https://doi.org/10.1023/a:1004738414847>
2. Куцова К. М. До питання про роль рельєфу у формуванні просторової неоднорідності ґрунтових параметрів. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків, 2021. Вип. 92. С. 80-91. <https://doi.org/10.31073/acss92-09>
3. Балук С. А., Кучер А. В. Просторові особливості ґрунтового покриву як основа сталого управління ґрунтами. *Укр. геогр. журн.* 2019. № 3(107). С. 3-14. <https://doi.org/10.15407/ugz2019.03.003>
4. Akbas F., Gunal H., Acir N. Spatial variability of soil potassium and its relationship to land use and parent material. *Soil & Water Research*. 2017. Vol. 12. № 4. P. 202-211. <https://doi.org/10.17221/32/2016-SWR>
5. Kucher L. Estimation of potassium reserves in zonal chernozemic soils of Ukraine's forest-steppe. *Polish Journal of Soil Science*. 2018. Vol. 51. № 1. P. 83-91. <https://doi.org/10.17951/pjss/2018.51.1.83>
6. Xu Y., Wang X., Bai J., Wang D., Wang W., Guan Y. Estimating the spatial distribution of soil total nitrogen and available potassium in coastal wetland soils in the Yellow River Delta by incorporating multi-source data. *Ecological Indicators*. 2019. Vol. 106. Art. 105522. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106002>
7. Wu Z., Zhou Y., Xu L. Spatial differentiation and influencing factors of available potassium in cultivated soil in Mountainous Areas of Northwestern Hubei Province, China. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. № 17. Art. 7311. <https://doi.org/10.3390/su16177311>
8. Guo. R., Shi, He X., Chen W., Li X., Ding W. Study on the spatial distribution of the content of potassium in the upper stream of the Hunhe River basin, northeastern China. *Proceedings of SPIE*. 2011. Vol. 8193. Art. 81932Q. <https://doi.org/10.1117/12.887701>
9. Chen Y., Zhang S., Li H., Wang Y. Drivers of nutrient content and spatial variability of soil multifunctionality in the topsoil of Kyrgyzstan. *Frontiers in Environmental Science*. 2022. Vol. 10. Art. 1001984. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1001984>
10. Zheng C., Yang X., Liu Z., Liu K., Huang Y. Study on the spatial distribution of the content of potassium in the upper stream of the Hunhe River basin, northeastern China. *PeerJ*. 2022. Vol. 10. Art. e13239. <https://doi.org/10.7717/peerj.13239>

UDC 631.811:631.416.4

Spatiotemporal changes in the content of mobile potassium in arable soil**S. S. Kovalenko****National Scientific Center “Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky”,
Kharkiv, Ukraine**

✉ stanislawkowalenko@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6834-2259

Received 19.11.2025; Revised 11.12.2025; Accepted 26.12.2025; Available online 30.12.2025

Abstract. The paper substantiates the spatio-temporal variability of exchangeable potassium content in the arable layer (0–30 cm) of chernozems in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine on two experimental sites during 2018–2020. Site No. 1 was a 48.7 ha field with a heterogeneous soil cover dominated by podzolized chernozem (Luvic Chernic Phaeozem) and dark-gray podzolized soil (Luvic Greyzemic Phaeozem), including eroded and hydromorphic variants; Site No. 2 was a 24 ha field consisting mainly of typical chernozem (Haplic Chernozem) with contours of eroded and excessively moistened variants. Fieldwork involved regular (spring and autumn) collection of composite soil samples from 24 stationary sampling points on each field. Exchangeable potassium content determined by two methods: Chirikov's method (for podzolized soils) and Machigin's method (for neutral and slightly alkaline chernozems). The results revealed high spatial and temporal variability. The highest concentrations of exchangeable potassium were recorded in spring (120–185 mg/kg by Chirikov and 211–347 mg/kg by Machigin), the lowest during the period of intensive vegetation (80–150 mg/kg). After harvest, partial recovery occurred, but not to the spring level. A stable spatial structure of potassium distribution was established: maximum values observed in micro-depressions and hydromorphic contours, minimum values on eroded elevations and slightly xeromorphic variants. The difference between extreme values reached one full fertility class of potassium supply. A statistically significant relationship found between soil acidity (salt pH) and exchangeable potassium content: an increase in pH toward neutral accompanied by an increase in available potassium concentration, whereas in more acidic areas (dark-gray podzolized soils and moist depressions) potassium more strongly fixed. Both analytical methods showed high correlation of results and stability of the spatial pattern over the three years, indicating the dominant influence of soil-forming factors (relief, moisture regime, soil type) over annual weather fluctuations and agricultural practices. The obtained data confirm the need for precision (site-specific) application of potassium fertilizers in the Left-Bank Forest-Steppe, since the average level of potassium supply is high, but local zones of deficiency and excess coexist within the same field. Using only field-average values can lead either to yield losses or to irrational fertilizer expenditure.

Keywords: soil potassium status; exchangeable potassium; spatial heterogeneity; temporal dynamics; Chirikov method; Machigin method; soil pH; precision agriculture.

Citing: Kovalenko, S. S. (2025). Spatiotemporal changes in the content of mobile potassium in arable soil. *AgroChemistry and Soil Science*, 99, 22–31. doi: 10.31073/acss99-03 [in Ukrainian].

References

1. Zeng, Q., & Brown, P. H. (2000). Soil potassium mobility and uptake by corn under differential soil moisture regimes. *Plant and Soil*, 221, 121–134. <https://doi.org/10.1023/a:1004738414847>
2. Kutsova, K. M. (2021). To the issue of the role of relief in the formation of spatial heterogeneity of soil parameters. *AgroChemistry and Soil Science*, 92, 80–91. <https://doi.org/10.31073/acss92-09> [in Ukrainian].
3. Baliuk, S. A., & Kucher, A. V. (2019). Spatial features of soil cover as the basis for sustainable soil management. *Ukrainian geographical journal*, 3(107), 3–14. <https://doi.org/10.15407/ugz2019.03.003> [in Ukrainian].
4. Akbas, F., Gunal, H., & Acir, N. (2017). Spatial variability of soil potassium and its relationship to land use and parent material. *Soil & Water Research*, 12(4), 202–211. <https://doi.org/10.17221/32/2016-SWR>
5. Kucher, L. (2018). Estimation of potassium reserves in zonal chernozemic soils of Ukraine's forest-steppe. *Polish Journal of Soil Science*, 51(1), 83–91. <https://doi.org/10.17951/pjss/2018.51.1.83>
6. Xu, Y., Wang, X., Bai, J., Wang, D., Wang, W., & Guan, Y. (2019). Estimating the spatial distribution of soil total nitrogen and available potassium in coastal wetland soils in the Yellow River Delta by incorporating multi-source data. *Ecological Indicators*, 106, 105522. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106002>
7. Wu, Z., Zhou, Y., & Xu, L. (2024). Spatial differentiation and influencing factors of available potassium in cultivated soil in Mountainous Areas of Northwestern Hubei Province, China. *Sustainability*, 16(17), 7311. <https://doi.org/10.3390/su16177311>
8. Guo, R., Shi, X., He, X., Chen, W., Li, X., & Ding, W. (2011). Study on the spatial distribution of the content of potassium in the upper stream of the Hunhe River basin, northeastern China. *Proceedings of SPIE*, 8193, 81932Q. <https://doi.org/10.1117/12.887701>
9. Chen, Y., Zhang, S., Li, H., & Wang, Y. (2022). Drivers of nutrient content and spatial variability of soil multifunctionality in the topsoil of Kyrgyzstan. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1001984. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1001984>
10. Zheng, C., Yang, X., Liu, Z., Liu, K., Huang, Y. (2022). Study on the spatial distribution of the content of potassium in the upper stream of the Hunhe River basin, northeastern China. *PeerJ*. 2022. 10. e13239. <https://doi.org/10.7717/peerj.13239>

UDC: 633.1:631.52:551.583

World practice of breeding adaptive varieties of cereal crops in conditions of climate change**M. O. Andrushko ^a✉, O. M. Andrushko ^b****Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies, Lviv, Ukraine**

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received 26.11.2025 Received in revised form 16.12.2025 Accepted 26.12.2025 Available online 30.12.2025	Grain production is highly sensitive to weather variability, especially to extreme events in terms of their intensity and duration, while individual growth stages differ in their vulnerability to heat, drought, waterlogging and other stressors. The aim of this study is to generalize the contribution of global breeding practice for grain crops, to systematize key approaches to enhancing their adaptive potential, and to outline priority directions for further development under conditions of accelerating climate change. The research is based on general scientific methods of cognition, including system analysis, synthesis, abstraction, generalization, deduction, concretization and formalization. The study summarizes current evidence on how extreme weather factors affect quantitative and qualitative indicators of grain yield and reviews modern breeding strategies aimed at minimising these negative impacts. Particular attention is paid to the development of varieties tolerant to abiotic and biotic stresses, increasing productivity and technological quality of grain, and the introduction of innovative tools such as genomic selection, genetic engineering, marker-assisted selection (MAS) and <i>in vitro</i> technologies. It is substantiated that implementing adaptive management in cereal cultivation – through variety choice, optimisation of sowing dates and density, fertiliser systems and crop protection – reduces production risks and costs, stabilises yields and enhances resilience of cropping systems. The results are practically relevant for programmes of development and modernisation of agricultural enterprises specialising in the cultivation of grain crops, where the strategic priority is to combine environmental safety with economic efficiency in line with the European green transition and the global trend towards climate-smart agriculture.
Keywords: grain yield stability; stress tolerance; genomic selection tools; marker-assisted selection; genetic engineering; <i>in vitro</i> culture; sustainable intensification	

✉ andrushko.mykol1993@gmail.com

ORCID: ^a 0000-0002-4099-7605; ^b 0000-0003-3825-6960Citing: Andrushko, M. O., & Andrushko, O. M. (2025). World practice of breeding adaptive varieties of cereal crops in conditions of climate change. *AgroChemistry and Soil Science*, 99, 32-40. doi:10.31073/acss99-04**1. Problem statement**

The conditions for growing grain crops are currently very variable, with significant fluctuations in temperature and precipitation during the growing season. Global climate dynamics necessitate the development of a set of hereditary traits of grain crops that are resistant to the effects of climatic factors, which can significantly expand the possibilities for selecting combinations of target traits for optimal genetic adaptation and potential increase in quantitative and qualitative yield indicators. Due to global climate change, with the shift of seasons, plants often suffer both from high temperatures and from insufficient precipitation, or, conversely, from very low temperatures and excess moisture. Such extreme weather conditions can occur at different times during the same growing season. This situation creates certain difficulties for managing grain crops, since a formulaic approach with fixed maps often leads to a significant decrease in yield and, as a result, economic impact. Against this background, a modern approach in agronomy – adaptive management – becomes a viable option. This approach is a system of measures and management decisions that allows you to adapt growing technologies to current and predicted environmental conditions.

The study aimed at studying the possibilities of modern technologies for growing cereals, focused on adaptive management, with the active use of monitoring, modeling

and forecasting capabilities. The aspect of breeding adaptive varieties resistant to climate change requires special attention.

Analysis of recent studies and publications. The need to develop, research and implement effective solutions to reduce the negative impact of extreme weather conditions on grain yields currently considered a pressing problem and is present in the current scientific discourse. Numerous works and studies have been devoted to finding optimal solutions in this area; in particular, Zabel et al. [1], Wolfe & Ceccarelli [2], Siddiqui et al. [3], Varshney et al. [4] have paid much attention to this problem in recent publications. The authors emphasize the need for a more in-depth study of the impact of changes in average temperature on the wheat vegetation stage, which should precede consideration of the consequences of extreme weather events and climate change on crop yield indicators.

Vadez et al. [5] and Snowdon et al. [6] studied the impact of global climate change on the process of growing wheat and other cereal crops, paying special attention to the potential for adaptive breeding. Marone et al. [7] and Kom et al. [8] emphasize the possibilities of modern forecasting and modeling using innovative technologies.

Fatima et al. [9] and Fradgley et al. [10] insist that the most effective way to ensure the stability of grain yields under adverse weather conditions is optimal breeding activities by creating stress-resistant genotypes that would adequately respond to the expected frequent extreme weather events and would have high quantitative and qualitative indicators. It is difficult to disagree with this position, because it is breeding that is able to find a large-scale solution to the problem of eliminating the negative impact of weather conditions on the process of growing wheat. Bapela et al. [11] conclude that wheat-breeding models based on adaptive management can help breeding programs identify optimal hypothetical traits for predicting different future scenarios of adverse weather conditions. According to the authors, these models can be effectively use to develop future wheat ideotypes that are resistant to climate change. The results of these studies emphasize the importance of including stress tolerance traits in breeding processes to mitigate the negative impact of global climate change, especially at the regional and local levels, where predicted extreme weather events occur most often.

According to Yanagi [12], the creation of cereal genotypes with a high degree of heat resistance during grain filling is crucial for wheat yield indicators under hotter climatic conditions of the predicted future. Thus, ideotypes of cereal crops resistant to the influence of climatic factors can significantly expand the possibilities for selecting combinations of target traits for optimal genetic adaptation and potential increase in quantitative and qualitative yield indicators.

Despite the relatively high popularity of the studied problem in modern scientific circles of the world community, very few proposals have been develop for practical application in agricultural activities, and they need to be updat in the context of progressive large-scale climate change. It is also necessary to take into account the practical achievements of world breeding experience, which will allow achieving a potential reduction in the negative impact on the quantitative and qualitative indicators of grain crop yield.

Purpose. The purpose of this study is to analyze the existing contribution of world grain breeding practice, to present the main ovative ideas within the framework of the problem under study and determination of vectors for further development of the topic to increase the adaptability of cereals in the conditions of climatic dynamics.

2. Materials and research methods

During the review of literary sources and publications in specialized journals devoted to the topic under study, the primary task was to select relevant and progressive

works on the chosen topic to assess the current state of research in this field. The literature selected based on the principle of combining data according to functional criteria, such as productivity, stress resistance and grain quality. Using the generalization method, a set of measures carried out to identify typical features and patterns of the problem under study, opportunities for optimizing the situation and finding the most profitable solutions in economic and environmental aspects. The emphasis placed on the latest developments and research on the problem under study in recent years.

The study based on the hypothetical-deductive method. Assumptions made regarding the feasibility, effectiveness and safety of using modern processes for breeding adaptive varieties in order to prevent a decrease in yield in extreme weather conditions. To confirm this hypothesis, a deductive method used. To determine the effectiveness, features and advantages of specific solutions in the studied process, a system analysis, synthesis and generalization used. The work aimed at active practical application in the future in the process of optimizing the management of risks of reducing the yield of grain crops arising from adverse extreme weather events by increasing the efficiency of selection.

3. Research results

Modern agricultural production still largely based on traditional tillage methods and many years of practical experience in grain farming. However, in the last decades, the technology of grain cultivation has undergone significant changes, and under conditions of global climate change, these changes acquire a strategic character. The main threat to grain cultivation is the increase in the frequency and intensity of local adverse weather events. Climate change first involves a tendency towards higher mean temperatures, shifts in the length of vegetation periods and increased climate variability. At sensitive stages of ontogenesis, grain crops can severely damaged by high temperatures, late frosts, drought or heavy rainfall, which leads to a significant impact on the quantity and quality of the harvest. The impact of these factors at different phases of plant growth has different consequences [13]. For example, heat stress on inflorescence fertility leads to a decrease in the number of grains, and during grain filling, it causes a reduction of grain size and baking or processing quality. Prolonged water stress reduces leaf growth, accelerates leaf senescence and shortens the effective photosynthetic period. Extreme drought episodes during grain filling reduce plant growth, leading to crop failure, whereas drought during reproductive development primarily affects quantitative yield indicators. Excessive precipitation during plant maturation leads to partial loss of the crop, pre-harvest sprouting and a decline in quality parameters [5].

An increase in the frequency and intensity of such adverse weather events poses a greater risk than gradual average climate change, since the time available for biological and technological adaptation significantly reduced. In this regard, much attention has recently been paid to the study of adverse weather conditions in climate modelling systems for agricultural grain crops and to the improvement of breeding methods for the development of resistant adaptive varieties that can maintain productivity in unstable environments.

Adaptive management of grain crops based on the identification of key environmental factors at different stages of growth that affect quantitative and qualitative yield indicators. By choosing adaptive management, agricultural producers are able to regulate a maximum number of influencing parameters — from the choice of variety, sowing date and rate, the amount, timing and form of fertiliser application to the use of growth regulators and plant protection products — in order to optimise quantitative and qualitative yield indicators [14]. In practice, this means moving from fixed technological

schemes to flexible, scenario-based decisions, which regularly updated according to monitoring, and forecasts.

One of the effective tools used in modern grain-growing technologies is the active use of climate and crop models to predict weather conditions and crop responses. These models allow selecting the optimal parameters of sowing rate and timing, as well as nitrogen application, depending on predicted temperature and precipitation patterns. The use of nitrogen in differentiated doses and terms helps to reduce the stressful impact of low temperatures on the plant, promotes growth during warmer periods of vegetation, and has a positive effect on the development of the plant root system during periods of high humidity and low temperatures [7]. At the same time, by adjusting the timing of nitrogen application, it is possible to delay plant growth and development, which is important for preventing early heading and ear emergence that may expose crops to late spring frosts, and thus indirectly affects yield indicators.

The global practice of breeding adaptive varieties of grain crops focused on the creation of varieties with increased resistance to stressful weather conditions, such as drought, heat, soil salinisation or periodic waterlogging. For this purpose, both traditional breeding methods and modern genetic technologies are successfully used. The main approaches focused on creating high-yielding varieties with improved grain quality that best meet local growing conditions and are able to realise their potential under a wide range of seasonal scenarios [15]. At the same time, breeding programmes increasingly guided by explicit ideotypes – conceptual models of a “desired” plant combining a set of morphological, physiological and phenological traits adapted to target environments.

The main vectors of breeding practice in this context are as follows:

- 1) Breeding varieties resistant to abiotic stresses,
- 2) Breeding varieties resistant to biotic stresses,
- 3) Increasing productivity and improving grain quality,
- 4) Systematic use of innovative biotechnological tools that accelerate the breeding

cycle.

Breeding varieties resistant to abiotic stresses involves increasing the adaptive capabilities of crops for drought tolerance (for example, developing wheat or maize varieties that maintain productivity under moisture deficit in arid and semi-arid regions). Also important are frost resistance (overcoming the critical barrier of low temperatures during wintering or early spring growth), salt tolerance (breeding cereal varieties that can grow and yield at elevated soil salinity levels, particularly in irrigated areas with secondary salinization), and resistance to short-term floods and heat waves. For example, in Australia significant attention is paid by breeders to breeding wheat varieties that use water more efficiently in arid conditions, whereas in China large-scale breeding projects for rice varieties able to grow on saline soils are being implemented [2; 10]. These examples demonstrate that abiotic stress tolerance increasingly considered not as an additional trait, but as a central breeding goal in regions highly exposed to climate risks.

Breeding of cereal varieties resistant to biotic stresses involves the integration of genes for increased resistance to pests and diseases (Septoria leaf blotch, Fusarium head blight, rusts and other pathogens). The process is carried out mainly using molecular genetic methods and modern biotechnologies and is aimed at identifying resistant genotypes, reproducing hybrids by crossing and selecting the best offspring. Resistance to biotic stresses also includes improved tolerance to herbicides, which allows more effective weed control and reduces competition for water and nutrients. In particular, in the USA corn varieties with increased yield indicators and combined resistance to herbicides and pests are particularly widespread [4; 15]. Under climate change, such resistance becomes even more important, as warmer conditions and

altered precipitation regimes may modify the spectrum and aggressiveness of pathogens and pests.

Another direction of grain breeding is to improve the quality and productivity of grain, including the optimisation of nutritional value by increasing the content of proteins, essential amino acids, vitamins and microelements. In the process of breeding varieties that provide higher yields per unit area, it is important to use modern technologies successfully applied in world practice. Among them, genomic selection, genetic engineering and marker-assisted selection (MAS) are the most effective [6]. These technologies make it possible to simultaneously take into account a large number of loci associated with adaptive and quality traits and thus accelerate the accumulation of favourable alleles in breeding material.

The advantages of the genomic selection method, which involves large-scale analysis of genomes for accurate selection of the best samples for further crossing, are the avoidance of lengthy phenotypic tests, reduction of time costs, increased accuracy of selection in the early stages of plant development, as well as the possibility to work directly with genetic information. Examples of global genomic breeding experience include hybrid forms of maize with increased resilience to drought, high-yielding varieties of rice and wheat adaptable to adverse growing conditions, and creation of new populations with optimised root systems for better water and nutrient uptake under drought stress [4].

Genetic engineering involves the integration of genes from other organisms to form new resistant traits. Examples of global genetic engineering practice in grain crop breeding include herbicide-resistant maize and soybean, which are widely grown in the USA and some other countries. Thus, up to 80% of maize crops and 95% of soybean crops in the USA genetically modified for resistance to herbicides and pests. Another well-known example is modified "golden rice" with an increased content of beta-carotene aimed at improving human nutrition [6]. Although the spread of genetically modified cereals remains limited by regulatory and public acceptance factors in many countries, the knowledge gained through such projects actively used in conventional and marker-assisted breeding.

The use of *in vitro* tissue and organ culture, a biological system that lacks the regulatory mechanisms inherent in the whole organism, is becoming particularly relevant in global practice. The *in vitro* method is now widely used to solve applied problems in breeding various agricultural plants, including cereals: screening and identification of resistant forms, rapid propagation of valuable genotypes, and studying the response of cells to the toxicity of selective agents [3; 12]. In particular, *in vitro* systems enable the selection of callus cultures and regenerants tolerant to salinity, drought imitating agents or certain pathogens, which can be used as a source material in breeding programmes.

The main feature of breeding for adaptability is systematic control of environmental plasticity, stability and adaptability of varieties and hybrids already at the early stages of the breeding process. Progress in agriculture in the near future will be determined by improved adaptation of agricultural systems and agrolandscapes to environmental factors that change in time and space. Therefore, modern breeding approaches are characterised by an agroecological focus associated with greater adaptability of new varieties and hybrids to local conditions, as well as by science-intensive cultivation technologies. Their main distinguishing feature is the combination of high potential productivity (crop size and quality) with resistance to the most common abiotic and biotic stressors in the region and a favourable genotype $\times$ environment interaction profile. The effectiveness of such selection achieved with various methods for assessing ecological plasticity and stability, which differ in the complexity of calculations and interpretation of results but provide breeders with quantitative criteria for comparing genotypes across multiple environments.

To better systematise the directions of current practice in adaptive breeding and management of cereal crops, the main approaches and expected effects can be summarised as follows (Table).

In order to obtain highly adapted genotypes for each specific location, it is necessary to solve a number of interconnected methodological problems. First, breeders must clearly determine the mechanisms of varietal response to changing environmental conditions at different organisational levels – from physiological (water-use efficiency, photosynthetic activity, root growth dynamics) and morphological (plant height, leaf architecture, root system architecture) to phenological (duration of vegetative and reproductive phases, thermal requirements). Second, it is essential to select the most informative traits and properties as targets for selection: not only result in the form of grain yield, but also secondary traits that more closely linked to tolerance (e.g. stay-green, early vigour, canopy temperature, grain-filling duration) and can be measured reliably in multi-environment trials. Third, effective methods for evaluating breeding material must be identified, combining classical yield trials with stress screening, remote sensing indicators and model-based analysis. Finally, representative environments (locations and years) have to be chosen so that the whole range of target stress scenarios – typical, moderately extreme and rare but critical – is covered and genotype $\times$ environment (G $\times$ E) interactions can be reliably quantified.

Table

Main directions of adaptive breeding and management of cereal crops under climate change

<i>Direction / approach</i>	<i>Dominant target stressors</i>	<i>Tools and technologies used</i>	<i>Expected effect on yield and stability</i>	<i>Illustrative examples of application</i>
Breeding for abiotic stress tolerance	Drought, heat, frost, salinity, temporary flooding	Conventional hybridisation, selection in stress environments, landrace use, genomic tools	Maintenance of yield in dry and hot years; expansion of production into marginal areas	Drought-tolerant wheat and maize in Australia; salt-tolerant rice in China
Breeding for biotic stress resistance	Fungal diseases, pests, weeds	Disease nurseries, molecular markers, pyramiding resistance genes, herbicide tolerance	Reduction of yield losses and pesticide costs; greater predictability of production	Rust- and Fusarium-resistant wheat; insect-resistant maize
Improvement of grain quality and nutritional value	Protein deficit, micronutrient deficiencies	Selection for quality traits, MAS for quality loci, biofortification programmes	Higher added value of grain, better processing quality and nutritional profile	High-protein wheat, biofortified cereals (e.g., pro-vitamin A “golden rice”)
Genomic selection and digital breeding	Complex polygenic traits	Dense molecular markers, genomic prediction models, big data and machine learning	Acceleration of breeding cycles; precise accumulation of favourable alleles	Genomic selection in wheat and barley programmes in Europe and Australia
In vitro and biotechnological tools	Low regeneration capacity, slow propagation	Tissue culture, somaclonal variation, micropropagation, cell selection under stress agents	Rapid multiplication of elite genotypes, creation of stress-tolerant lines	In vitro selection of salt- and drought-tolerant lines in cereals
Adaptive crop management (agrotechnology)	Intra-seasonal weather variability	Crop and climate models, remote sensing, variable rate technology, decision support systems	Optimisation of sowing dates, densities and fertiliser regimes; reduced risks	Adjustment of sowing windows and N-rates based on seasonal forecasts

In this context, Table summarises the main current directions of adaptive breeding and crop management for cereals under climate change. The first two rows reflect primarily genetic strategies – breeding for tolerance to abiotic stresses (drought, heat, salinity, frost, temporary flooding) and for resistance to biotic stresses (diseases, pests, weeds) – and show how different combinations of conventional hybridisation, stress-environment selection and molecular tools are used to maintain yields and reduce losses. The next two rows characterise more advanced breeding approaches: improvement of grain quality and nutritional value through biofortification and selection for technological traits, and the use of genomic selection and digital breeding to accelerate cycles and work with complex polygenic traits. The last two rows focus on biotechnological tools (in vitro systems for rapid propagation and stress selection) and adaptive crop management (climate and crop models, variable-rate fertilisation, decision support systems), highlighting that genetic progress must be complemented by flexible agrotechnology. In aggregate, the table illustrates that effective climate adaptation achieved not through a single “silver bullet” solution, but through an integrated package of genetic, biotechnological and management decisions, tailored to the specific stress profile of each region.

In developed countries it is estimated that 90–95 % of yield increases over the past decades have been achieved through genetic improvement of varieties and hybrids, and only 5–10 % through improved agricultural technologies alone [5; 9]. This further underlines the central role of breeding in long-term adaptation strategies. At the same time, such figures do not diminish the importance of agronomic optimisation; rather, they indicate that technologies like fertilisation, plant protection or irrigation fully realise their potential only when combined with genetically improved, stress-tolerant varieties. Consequently, the methodological toolkit of adaptive breeding increasingly based on multi-environment trials, in which genotypes evaluated simultaneously across a wide range of locations and years. Statistical models of G×E interaction and stability/plasticity indices allow breeders to distinguish between genotypes that show high performance only in favourable conditions and those that maintain yield under stress, which is crucial for climate-risk-prone regions.

In all cereals, varieties that are resistant to lodging and adverse conditions are particularly valued, because lodging not only reduces yield but also complicates harvesting and worsens grain quality. The introduction of short-stem varieties of wheat with a stronger culm, including those carrying semi-dwarf genes, has made it possible in Mexico, India and several other countries to significantly increase wheat grain production over the past 15–20 years and, in some cases, to completely abandon imports. In parallel, breeding programmes in other regions have focused on maintaining sufficient straw strength for high nitrogen and irrigated systems, where biomass is greater and lodging risk is higher. Depending on regional conditions, early-maturing, drought-resistant and winter-hardy varieties may be required, as well as varieties suitable for cultivation on both irrigated and drained land [1]. In continental climates with frequent spring frosts, priority given to genotypes with flexible phenology and frost resistance; in Mediterranean-type climates – to deep-rooted, drought-tolerant varieties; in areas with mild, humid winters – to varieties resistant to winter diseases and waterlogging.

The development and productive use of low-yield lands (acidic, saline, marshy and sandy soils) also depends on the success of breeding. On acidic soils, breeders select varieties with increased aluminium tolerance and efficient phosphorus uptake; on saline soils – genotypes capable of excluding or compartmentalising toxic ions; on sandy and shallow soils – varieties with root systems adapted to low water-holding capacity. In some countries, special attention is paid to this aspect at the regulatory level. For example, in Brazil varieties sensitive to acidic soils are not allowed for production, which demonstrates the integration of breeding decisions into national regulatory frameworks

and land-use policy [7; 11]. Such regulatory measures stimulate both public and private breeding programmes to focus on adaptability traits that are most important for national agroecosystems and long-term soil fertility.

Thus, adaptability is a crucial property of promising cereal varieties that must be consistently taken into account in breeding programmes, starting from the earliest stages of selection. At the same time, attention should be paid to the deliberate choice of growing environments for each variety and hybrid, taking into account the role of G×E interactions and the concept of target production environments or “mega-environments”. Using the existing set of methods for determining potential productivity and adaptability – including multi-environment yield trials, stability and plasticity parameters, and model-based scenario analysis – as well as modern tools for assessing the stability and plasticity of crop varieties, it is possible to establish the reliability of observed differences and obtain the necessary information for selecting valuable starting material for breeding for adaptability. Integrating this information into adaptive management systems at the farm and regional levels, and linking varietal recommendations with seasonal forecasts and decision support tools, creates prerequisites for a transition to climate-smart agriculture capable of maintaining grain yield stability and economic viability under conditions of increasing climate risks.

4. Conclusions

Global climate change necessitates the development of grain varieties that are resistant to the effects of climatic factors and extreme weather conditions, which can significantly expand the possibilities for optimal genetic adaptation and a potential increase in quantitative and qualitative yield indicators. Effective implementation of adaptive management in grain growing allows reducing costs, increasing yields, minimizing the need for repeated fertilizer applications, and increasing plant resistance to pests and external factors. The main vectors of breeding practice in this context are the development of varieties that are resistant to abiotic and biotic stresses, increasing productivity, and improving grain quality. Among the most effective innovative technologies of breeding activities are genomic breeding, genetic engineering and marker-assisted breeding (MAS), as well as in vitro methods.

Further research is needed into the possibilities and development of an algorithm for an agroecological monitoring system within the spectrum of influence of global climate change and extreme weather events at the regional and local levels, taking into account progressive breeding opportunities. Only an integrated approach that takes into account regional and local zoning, together with multifunctional agroecological monitoring, can not only mitigate the negative impact of adverse weather conditions on grain cultivation, but also ensure the sustainability of economic returns from activities and reduce anthropogenic impact against the background of global climate risks.

References

1. Zabel, F., Müller, C., Elliott, J., Minoli, S., Jägermeyr, J., Schneider, J. M., & Asseng, S. (2021). Large potential for crop production adaptation depends on available future varieties. *Global Change Biology*, 27(16), 3870–3882. <https://doi.org/10.1111/gcb.15649>
2. Wolfe, M. S., & Ceccarelli, S. (2020). The increased use of diversity in cereal cropping requires more descriptive precision. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(11), 4119–4123. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9906>
3. Siddiqui, M. N., Léon, J., Naz, A. A., & Ballvora, A. (2021). Genetics and genomics of root system variation in adaptation to drought stress in cereal crops. *Journal of Experimental Botany*, 72(4), 1007–1019. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa487>
4. Varshney, R. K., Barmukh, R., Roorkiwal, M., Qi, Y., Kholova, J., Tuberosa, R., & Siddique, K. H. (2021). Breeding custom-designed crops for improved drought adaptation. *Advanced Genetics*, 2(3), e202100017. <https://doi.org/10.1002/ggn.2.202100017>
5. Vadez, V., Grondin, A., Chenu, K., Henry, A., Laplaze, L., Millet, E. J., & Carminati, A. (2024). Crop traits and production under drought. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(3), 211–225. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00514-w>
6. Snowdon, R. J., Wittkop, B., Chen, T. W., & Stahl, A. (2021). Crop adaptation to climate change as a consequence of long-term breeding. *Theoretical and Applied Genetics*, 134(6), 1613–1623. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03729-3>

7. Marone, D., Russo, M. A., Mores, A., Ficco, D. B., Laidò, G., Mastrangelo, A. M., & Borrelli, G. M. (2021). Importance of landraces in cereal breeding for stress tolerance. *Plants*, 10(7), 1267. <https://doi.org/10.3390/plants10071267>
8. Kom, Z., Nethengwe, N. S., Mpandeli, N. S., & Chikore, H. (2022). Determinants of small-scale farmers' choice and adaptive strategies in response to climatic shocks in Vhembe District, South Africa. *GeoJournal*, 87(2), 677–700. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10272-7>
9. Fatima, Z., Ahmed, M., Hussain, M., Abbas, G., Ul-Allah, S., Ahmad, S., & Hussain, S. (2020). The fingerprints of climate warming on cereal crops phenology and adaptation options. *Scientific Reports*, 10, 18013. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74740-3>
10. Fradgley, N., Gardner, K. A., Cockram, J., Elderfield, J., Hickey, J. M., Howell, P., & Mackay, I. J. (2019). A large-scale pedigree resource of wheat reveals evidence for adaptation and selection by breeders. *PLOS Biology*, 17(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000071>
11. Bapela, T., Shimelis, H., Tsilo, T. J., & Mathew, I. (2022). Genetic improvement of wheat for drought tolerance: Progress, challenges and opportunities. *Plants*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/plants11101331>
12. Yanagi, M. (2024). Climate change impacts on wheat production: Reviewing challenges and adaptation strategies. *Advances in Resources Research*, 4(1), 89–107. https://doi.org/10.50908/arr.4.1_89
13. Le Campion, A., Oury, F. X., Heumez, E., & Rolland, B. (2020). Conventional versus organic farming systems: Dissecting comparisons to improve cereal organic breeding strategies. *Organic Agriculture*, 10(1), 63–74. <https://doi.org/10.1007/s13165-019-00249-3>
14. Kamal, N. M., Gorafi, Y. S. A., Abdelrahman, M., Abdellatef, E., & Tsujimoto, H. (2019). Stay-green trait: A prospective approach for yield potential, and drought and heat stress adaptation in globally important cereals. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(23). <https://doi.org/10.3390/ijms20235837>
15. Minoli, S., Jägermeyr, J., Asseng, S., Urfels, A., & Müller, C. (2022). Global crop yields can be lifted by timely adaptation of growing periods to climate change. *Nature Communications*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34411-5>

УДК 633.1:631.52:551.583

Світова практика селекції адаптивних сортів зернових культур в умовах зміни клімату

М. О. Андрушко ^a , О. М. Андрушко ^b

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького, м. Львів, Україна

 andrushko.mykol1993@gmail.com

ORCID: ^a 0000-0002-4099-7605; ^b 0000-0003-3825-6960

Отримано 26.11.2025; Доопрацьовано 16.12.2025; Затверджено 26.12.2025; Доступно online 30.12.2025

Анотація. У статті проаналізовано світовий досвід селекції адаптивних сортів зернових культур в умовах зміни клімату та окреслено ключові напрями модернізації селекційних програм. Обґрунтовано, що зростання частоти екстремальних погодних явищ (посухи, теплові хвилі, весняні приморозки, надмірні опади) висуває на перший план завдання підвищення екологічної пластичності та стабільності сортів, тоді як традиційна орієнтація лише на потенційну врожайність стає недостатньою. Показано, що у провідних аграрних країнах 90–95 % приросту врожайності забезпечено за рахунок генетичного удосконалення сортів і гібридів, тоді як частка суто агротехнічних чинників є відносно меншою, що підкреслює стратегічну роль селекції в адаптації зерновиробництва до кліматичних ризиків. Розкрито основні вектори сучасної селекції зернових: підвищення толерантності до абіотичних стресів (посуха, спека, засолення, перезволоження, низькі температури), формування стійкості до біотичних факторів (хвороби, шкідники, бур'яни), поліпшення якості та харчової цінності зерна, а також широке впровадження геномної селекції, маркер-асоційованого добору, біотехнологічних підходів та *in vitro* систем. Окрему увагу приділено інтеграції селекційних рішень з адаптивним управлінням посівами — використанням моделей урожайності й клімату, диференційованого внесення добрив, цифрових платформ підтримки прийняття рішень. Узагальнено методичні виклики, пов'язані з добром інформативних ознак, плануванням багатомісцевих випробувань, кількісною оцінкою взаємодії генотип × середовище та виділенням генотипів із поєднанням високої продуктивності й стабільності. На основі аналізу світової практики зроблено висновок, що формування адаптивних сортів зернових культур є ключовою умовою переходу до кліматично орієнтованого (climate-smart) землеробства. Комплексне поєднання генетичних, біотехнологічних та агротехнологічних рішень створює передумови для збереження врожайності й якості зерна за умов зростання кліматичних ризиків та більш інтенсивного використання маргінальних земель (кислих, засолених, піщаних, перезволених ґрунтів). Отримані узагальнення можуть бути використані для коригування національних селекційних програм, розробки рекомендацій щодо цільових середовищ вирощування та інтеграції селекційних пріоритетів у нормативно-правову базу аграрного сектору.

Ключові слова: зернові культури; адаптивні сорти; селекція; зміна клімату; абіотичні стреси; біотичні стреси; геномна селекція; адаптивне управління посівами.

Форма цитування: Andrushko M. O., Andrushko O. M. (2025). World practice of breeding adaptive varieties of cereal crops in conditions of climate change. *AgroChemistry and Soil Science*, 99, 32-40. doi:10.31073/acss99-04

УДК 631.445.4:631.417.2:631.86

Трансформація органічної речовини ґрунту в агро- та природних екосистемах

Л. Д. Глущенко^{1 а}, Є. В. Скрильник^{2 б} ✉, С. І. Криlach^{2 с}¹Полтавська державна сільськогосподарська дослідна станція ім. М. І. Вавилова ІС і АПВ НААН України, Полтава, Україна²Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 05.11.2025 Отримано після доопрацювання 20.12.2025 Затверджено до видання 26.12.2025 Доступно онлайн 30.12.2025 <i>Ключові слова:</i> гумус; органічна речовина; гуміфікація; система удобрення; чорнозем типовий	Описано результати тривалого стаціонарного дослідження трансформації групового та фракційного складу гумусу в чорноземі типовому за впливу антропогенних (системи удобрення), та природних (переліг) факторів. Об'єктом дослідження був чорнозем типовий середньогумусний (Haplic Chernozem [Profundihumic]) важкосуглинковий на двох локаціях: багаторічний стаціонарний дослід з різними системами удобрення (органічна, органо-мінеральна і без добрив, але з залишенням побічної продукції) та окрема ділянка перелігу, що межує з дослідом, на території Полтавської державної сільськогосподарської дослідної станції ім. М. І. Вавилова, які розташовані у с. Степне, у центральній частині Східного Лісостепу України. Встановлено, що на ділянках, де тривалий час вносили гній та гній з мінеральними добривами загальний вміст вуглецю у ґрунті був на 3–9 % вищим порівняно з ділянками де залишали тільки побічну продукцію (контроль). Проаналізувавши дію різних систем удобрення, та природної рослинності на перелозі зробили висновок про їх різнобічний вплив на динаміку вмісту гумусу у ґрунті, ступінь гуміфікації та тип гумусу. Показано, що тривале застосування різних систем удобрення, незалежно від доз та співвідношення кількості внесених органічних і мінеральних добрив, змінило ступінь гуміфікації на дуже високий з високого, який визначено там, де вносили лише побічну продукцію (контроль) і на перелозі. Тип гумусу на ділянках, удобрених гноем і мінеральними добривами визначено як гуматний, а на контролі та перелозі — як фульватно-гуматний. Констатовано, що якість гумусу, яку визначали за показниками його групового та фракційного складу, пов'язана з системою удобрення та типом землекористування. За співвідношенням гумінових і фульвокислот оптимальним варіантом удобрення визнано внесення гною разом з побічною продукцією; за сумарним вмістом гумінових кислот у ґрунті — внесення побічної продукції, деструктора та мінеральних добрив; за часткою фракції ГК-2 (гумати кальцію) — переліг.

✉ orgminlab@gmail.com

ORCID: ^a 0009-0002-0845-0201, ^b 0000-0002-8642-8547, ^c 0000-0002-3347-6561

Форма цитування: Глущенко Л. Д., Скрильник Є. В., Криlach С. І. Трансформація органічної речовини ґрунту в агро- та природних екосистемах. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків: 2025. Вип. 99. С. 41–48. doi: 10.31073/acss99-05

1. Вступ

Сучасний підхід до формування і використання агроєкосистем у землеробстві за інтенсивного антропогенного навантаження на ґрунти призводить до зміни їх властивостей та екологічного стану (змив, дефляція, засолення, дегуміфікація та ін.), і як наслідок, до зниження рівня родючості.

Характеристики органічної частини ґрунту та її основної складової — гумусу належать до найважливіших діагностичних критеріїв функціонування та стабільності ґрунтової системи. Тому справа оцінювання й контролювання гумусового стану ґрунту має важливе науково-практичне значення для вдосконалення систем землеробства з метою вирощування екологічно чистої продукції запланованого врожаю і охорони довкілля [1].

Органічна речовина, як один із компонентів ґрунту, відіграє визначальну роль у формуванні його фізико-хімічних та хімічних властивостей, таких як буферна здатність, рН, вміст органічного вуглецю, елементів живлення рослин, а також віддзеркалює його біорізноманіття, біологічну активність та перспективи

врожайності культур [2–4]. Гумус є важливим джерелом поживних речовин — у чорноземі він забезпечує до 98 % загального вмісту азоту та більше 50 % фосфору. Він визначає величину ферментативної активності, продукування вуглецевої кислоти у приземному шарі атмосфери, є найбільшим джерелом накопичення сонячної енергії. Поліпшення фізичних характеристик якості ґрунту, як правило, має вплив на збільшення інфільтрації води, пористість, розмір та стійкість агрегатів, а також стабільність органічного вуглецю ґрунту [5]. А збільшення вмісту органічного вуглецю у ґрунті може значно оптимізувати характеристику ґрунтових структурних агрегатів [6], підвищити стабільність ґрунтової структури та позитивно впливати на фізичні властивості ґрунту.

Процеси мінералізації та синтезу гумусових сполук відбуваються постійно, але їх інтенсивність не є однаковою [7]. У природних умовах баланс між процесами гуміфікації та мінералізації решток компонентів біоценозу урівноважений. Розмикання біологічного кругообігу речовин та порушення екологічної рівноваги в агроєкосистемах призводить до посиленої мінералізації гумусу в разі, якщо втрати не компенсуються відповідною кількістю свіжої органічної речовини, що і відбувається в орних землях. Виснаження орних земель є наслідком зменшення обсягів унесення органічних, мінеральних і вапнякових добрив, порушенням сівозмін, ігноруванням закону повернення в ґрунт основних елементів живлення тощо [2–5]. Наразі, щорічні втрати гумусу в орних ґрунтах України становлять 0,6–0,7 т/га. За даними Т. В. Порудєєвої [8], вартісні збитки, завдані ґрунту внаслідок втрати гумусу, у 39 разів перевищують річні економічні збитки від недоотримання продукції рослинництва.

Збереження та відтворення родючості ґрунтів є запорукою збалансованого сталого розвитку агропромислового комплексу. Невід'ємним елементом технології вирощування сільськогосподарських культур є науково обґрунтована система застосування добрив, завдяки якій можна підвищити врожайність в середньому на 30–50 %. Разом з тим варто відмітити та врахувати те, що добрива, поряд із забезпеченням рослин елементами живлення, корегують трофічний режим через зміни інтенсивності та направленості перебігу ґрунтових процесів [9–11].

З огляду на це одним із найактуальніших завдань сучасного землеробства є необхідність обґрунтування способів відновлення вмісту та якості гумусу в ґрунтах. Цього можна досягти внесенням відповідної кількості органічних речовин, підвищенням інтенсивності гуміфікації свіжої органічної речовини, а також створенням таких умов у ґрунті, які би послаблювали мінералізацію складних органічних сполук [12–16]. За таких обставин зростає потреба у науковому обґрунтуванні конкретних агротехнічних заходів, спрямованих на створення оптимальних ґрунтових умов для відновлення гумусу.

Динаміка вмісту органічного вуглецю у ґрунті, за використання такого агрозаходу як заорювання соломи, залежить від багатьох факторів, а саме, тривалості, типу ґрунту, клімату, сівозмін та ін. Але варто відмітити, що, незалежно від факторів, у результатах багатьох досліджень [17–19] відмічаються аналогічні тенденції: збільшення вмісту органічного вуглецю ґрунту за внесення соломи. Метааналіз, проведений Y. Wang зі співавторами [17], показав, що вміст органічного вуглецю значно зростає, коли соломі продовжують повертати протягом 6–9 років, але швидкість збільшення вмісту сповільнюється, якщо тривалість агрозаходу перевищує 10 років.

За результатами проведених досліджень на дерново-підзолистому ґрунті у зоні Полісся О. В. Єгоров із співавторами [18] дійшли висновку, що альтернативою гною повинно бути використання соломи у поєднанні з сидеральними добривами (зокрема, люпином), що сприятиме збереженню та

відтворенню вмісту гумусу в ґрунті, поліпшенню балансу поживних елементів та підвищенню продуктивності використання ріллі в сівозмінах.

Аналогічні тенденції з підвищення вмісту вуглецю у ґрунті за внесення соломи відмічають у своїх дослідженнях на жовтому ґрунті на території Лесового Плато в Китаї X. Zhang із співавторами [19]. Вони спостерігали підвищення вмісту органічного вуглецю за внесення соломи, залежно від її кількості, на 7,1–14,1 % відносно вихідного вмісту. Результати свідчать про те, що включення соломи є ефективною практикою для підвищення родючості ґрунту.

Метою статті є висвітлення результатів дослідження зміни рівня трансформації групового та фракційного складу гумусу в чорноземі типовому за впливу антропогенних (системи удобрення), та природних (переліг) факторів.

2. Об'єкти (матеріали) і методи досліджень

Дослідження проведено на дослідному полі Полтавської державної сільськогосподарської дослідної станції ім. М. І. Вавилова у с. Степне, яке розташоване на території Лісостепу, майже на умовній межі із Північним Степом, у зоні недостатнього зволоження. Середня багаторічна кількість опадів становить 519,3 мм за рік, а в окремі роки варіює від 283 до 954 мм; середня річна температура повітря — 8,0 °С.

Для дослідження було обрано два об'єкти: стаціонарний польовий дослід — для вивчення впливу антропогенного фактору, а саме, систем удобрення; ділянка перелогу — для дослідження ефекту природного фактору.

Стаціонарний дослід було закладено у 1987 р. Схема удобрення, варіанти: 1. Побічна продукція (контроль); 2. Побічна продукція + гній 10 т/га; 3. Побічна продукція + гній 10 т/га + $N_{32}P_{32}K_{32}$; 4. Побічна продукція + деструктор + $N_{32}P_{32}K_{32}$. Чергування культур у сівозміні: соя, пшениця озима, кукурудза на зерно. Гній було внесено з розрахунку 10 т/га під посіви кукурудзи на зерно. Площа дослідної ділянки — 175 м². Кількість повторень — 3. Загальна площа під дослідом — 5,1 га.

Ділянка перелогу, яку було закладено у 1964 р., у нашому дослідженні розглядається як природний фон і 5-й варіант досліду. Тип фітоценозу — різнотрав'я. Види рослин, що відмічені на перелозі відносяться до таких родин: Ranunculaceae, Futariaceae, Urticaceae, Caryophyaceae, Chenopodiaceae, Amaranthaceae, Brassicaceae, Apiaceae, Malvaceae, Aceraceae, Juglandaceae, Euphorbiaceae, Rubiaceae, Plantaginaceae, Boraginaceae, Resedaceae, Polygonaceae, Violaceae, Rosaceae, Fabaceae, Scrophullariaceae, Lamiaceae, Convolvulaceae, Asteraceae, Asparagaceae, Superaceae, Poaceae. Загальна площа ділянки перелогу — 1,1 га.

Ґрунт досліджуваних об'єктів — чорнозем типовий середньогумусний важкосуглинковий. В орному шарі ґрунту міститься: гумусу — 4,5–5,2 %; азоту, що легко гідролізується (за Тюрнімом та Коновою) — 119,1–127,1 мг/кг; P_2O_5 в оцтовокислій витяжці (за Чириковим) — 100,0–131,0 мг/кг; обмінного калію (за Масловою) — 171,0–200,0 мг/кг ґрунту. Щільність будови ґрунту — 1,05–1,17 г/см³; загальна шпаруватість — 55,5–59,8 %; польова вологоємність — 29,7–31,5 %; повна вологоємність — біля 39 %; діапазон активної вологи — біля 25 мм; вологість розриву капілярних зв'язків — 20–22 %.

Проби ґрунту відбирали з шару 0–20 см за ДСТУ 4287:2004¹, попереднє обробляння зразків для аналізу — за ДСТУ ISO 11464:2007². Загальний вміст

¹ ДСТУ 4287:2004. Якість ґрунту. Відбирання проб : [Чинний від 2004-30-04] Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 5 с.

² ДСТУ ISO 11464:2007. Якість ґрунту. Попереднє обробляння зразків для фізико-хімічного аналізу: [Чинний від 2009-01-10] Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 12 с.

органічного вуглецю у ґрунті визначали оксидиметричним методом Тюріна за ДСТУ 4289:2004³, визначення групового та фракційного складу гумусу — за методом Тюріна у модифікації Пономарьової та Плотникової за ДСТУ 7828:2015⁴. Тип гумусу та нормативи оцінки вмісту його окремих компонентів визначали за ДСТУ 7923:2015⁵.

Математичну та статистичну обробку результатів досліджень виконували методом дисперсійного аналізу з використанням програмних пакетів Statistica та Microsoft Excel.

3. Результати досліджень та їх обговорення

Використання побічної продукції рослинництва разом із деструкторами розглядається як ефективна стратегія підвищення вмісту та якості органічної речовини ґрунту. Внесення соломи, післяжнивних решток чи інших органічних залишків стимулює накопичення вуглецю, але без участі мікроорганізмів процес гуміфікації проходить повільно і часто супроводжується тимчасовим зниженням вмісту доступного азоту. Включення деструкторів значно впливає на швидкість розкладу та напрям трансформації органічних сполук.

Проаналізувавши дію різних систем удобрення, та природної рослинності на динаміку вмісту органічних речовин ґрунту можна зробити висновок про неоднаковий їх вплив на вміст і співвідношення окремих компонентів гумусу, ступінь гуміфікації, тип гумусу і таке інше (Табл. 1). За внесення одноразово побічної продукції разом з деструктором і мінеральними добривами (варіант 4) загальний вміст вуглецю у ґрунті дорівнював 3,03 %. На всіх інших варіантах, що стосуються удобрення, параметри нижчі і, навіть у майже природних умовах (в. 5), де вміст органічного вуглецю ґрунту перебував фактично на рівні органічної системи удобрення (в. 2).

Частка вуглецю групи гумінових кислот (С_{гк}) у його загальному вмісті в ґрунті (С_{заг.}) залишається найвищою так само у ґрунті на в. 4. На перелозі значення цього показника було майже на рівні ділянки де застосовували одну побічну продукцію (контроль). Ступінь гуміфікації визначають за співвідношенням вмісту вуглецю гумінових кислот та загального вмісту вуглецю. Нашими дослідженнями встановлено, що дуже високим він був на варіантах з різними системами удобрення, а на контролі та перелозі — високим.

На відміну від гумінових кислот, частка вуглецю фульвокислот у загальній кількості органічного вуглецю в ґрунті була найвищою на контрольному варіанті.

Важливим індикатором якості гумусу є співвідношення гумінових і фульвокислот (С_{гк} / С_{фк}), що є також діагностичним показником спрямованості зміни якості й складу органічної речовини ґрунту. Зменшення у складі гумусу вмісту групи гумінових кислот і збільшення вмісту фульвокислот є ознакою розвитку процесів деградації органічної речовини чорноземного ґрунту та зниження рівня родючості.

³ ДСТУ 4289:2004. Якість ґрунту. Методи визначання органічної речовини. [Чинний від 2005–07–01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 13 с.

⁴ ДСТУ 7828:2015. Якість ґрунту. Визначення групового та фракційного складу гумусу за методом Тюріна у модифікації Пономарьової та Плотникової. [Чинний від 2016–01–07]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 15 с.

⁵ ДСТУ 7923:2015. Якість ґрунту. Гумусовий стан. Номенклатура показників. [Чинний від 2016–09–01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 14 с.

Таблиця 1

Вплив тривалого застосування різних систем удобрення у сівозміні на груповий склад гумусу чорнозему типового важкосуглинкового, (шар 0–20 см)

Показник якості гумусу	Параметри показників у ґрунті на різних варіантах				
	1. Побічна продукція (контроль)	2. Побічна продукція + гній 10 т/га	3. Побічна продукція + гній 10 т/га + N ₃₂ P ₃₂ K ₃₂	4. Побічна продукція + деструктор + N ₃₂ P ₃₂ K ₃₂	5. Переліг
С заг., %	2,77	2,86	2,99	3,03	2,88
Частка С гк у С заг., %	39,4	49,9	48,7	50,6	39,9
Ступінь гуміфікації	високий	дуже високий	дуже високий	дуже високий	високий
Частка С фк у С заг., %	29,1	14,8	17,2	15,8	22,5
С гк / С фк	1,45	3,15	3,17	3,09	1,88
Частка С залишку, що не гідролізується, у С заг., %	31,5	35,3	34,1	33,8	37,6
Тип гумусу	фульватно-гуматний	гуматний	гуматний	гуматний	фульватно-гуматний

Примітка: С заг. – загальний вміст органічного вуглецю у ґрунті; С гк і С фк – вуглець гумінових і фульвокислот

У наших дослідженнях співвідношення вуглецю гумінових і фульвокислот на всіх варіантах показує перевагу гумінових кислот, однак більші параметри визначено на варіантах 2, 3 і 4, де й тип гумусу визначено як гуматний. На контрольному варіанті та перелозі тип гумусу був фульватно-гуматним.

Одним із завдань дослідження було виявлення впливу різних систем удобрення, після тривалого їх застосування, і перелозу на зміну якісного складу власне гумусових речовин. Специфічність ознак трансформації гумусових речовин і ступінь їх чутливості до різних проявів агрогенного впливу є відображенням характеру і глибини зміни умов гуміфікації. Провідна роль в проявленні ознак деградаційної і реградаційної трансформації належить гуміновим кислотам, перш за все фракціям ГК-1 і ГК-2, відповідальним за забезпечення агрономічної якості гумусу і його екологічної стабільності. У різних агроумовах спостерігали послаблення або активізацію процесів новоутворення гумусових структур і деструкція гумінових кислот. Із зростанням тривалості сільськогосподарського використання ґрунту без агрохімічних засобів відзначено посилення цієї ознаки, а також істотне послаблення процесу новоутворення гумінових кислот.

В результаті проведених досліджень (Табл. 2) встановлено, що частка фракції ГК-1 (вільні та пов'язані з рухливими формами полуторних оксидів) у сумі гумінових кислот на перелозі (в. 5) є найнижчою з усіх варіантів і, згідно з визначенням у ДСТУ 7923:2015, має бути віднесена до вкрай низького вмісту ГК-1 у ґрунті. На контрольній ділянці (в. 1) заорювання побічної продукції забезпечило більш високий вміст фракції ГК-1, та її частки у сумі гумінових кислот, тобто, поліпшення якості гумусу. Найвищі значення вмісту і частки ГК-1 констатовано на варіанті, де заорювання побічної продукції комбінується із внесенням мінеральних добрив і деструктора (в. 4).

Розглядаючи частку фракції ГК-2 (кислоти, що зв'язані з кальцієм) у сумі гумінових кислот виявили протилежний зв'язок цих двох величин, відносно ГК-1. Відмічено, що на перелозі (в. 5) частка кислот, пов'язаних з кальцієм, є найбільшою, тоді як на всіх удобрених ділянках ця фракція стабільно становила 60 %.

Таблиця 2

Вплив тривалого застосування різних систем удобрення у сівозміні на фракційний склад гумінових кислот чорнозему типового важкосуглинкового (шар 0–20 см)

Фракція гумінових кислот	Вміст фракції гумінових кислот (ГК, %) у ґрунті на різних варіантах дослідів				
	1. Побічна продукція (контроль)	2. Побічна продукція + гній 10 т/га	3. Побічна продукція + гній 10 т/га + N ₃₂ P ₃₂ K ₃₂	4. Побічна продукція + деструктор + N ₃₂ P ₃₂ K ₃₂	5. Переліг
ГК-1	<u>0,10</u> 11	<u>0,18</u> 12	<u>0,19</u> 12	<u>0,26</u> 15	<u>0,04</u> 3
ГК-2	<u>0,53</u> 60	<u>0,91</u> 60	<u>0,98</u> 60	<u>1,01</u> 60	<u>0,81</u> 70
ГК-3	<u>0,25</u> 29	<u>0,42</u> 28	<u>0,45</u> 28	<u>0,43</u> 25	<u>0,31</u> 27
Сума ГК	0,88	1,51	1,62	1,70	1,16
НІР _{0,5}	0,03	0,03	0,01	0,03	0,03

Примітка: над рискою – вміст фракції у ґрунті (%); під рискою – частка фракції у сумі гумінових кислот (%)

Фракція ГК-3, з найвищим абсолютним умістом у ґрунті на ділянці, де вносили побічну продукцію, гній і мінеральні добрива (в. 3), має на всіх варіантах майже однакову частку у сумі гумінових кислот. За сумарним вмістом гумінових кислот у ґрунті оптимальним варіантом удобрення є внесення побічної продукції деструктора та мінеральних добрив.

4. Висновки

На ділянках де, протягом тривалого часу вносили гній та гній з мінеральними добривами вміст загального вуглецю у ґрунті був вищим на 3-9 відсотних відсотки порівняно з ділянками де залишали одну побічну продукцію (контроль).

Тривале застосування різних систем удобрення, незалежно від доз та співвідношення органічних та мінеральних добрив, забезпечило більш високий ступінь гуміфікації, ніж на контролі та перелозі. Тип гумусу, відповідно, також відрізнявся — на удобрених ділянках він був гуматним, а на контролі та перелозі фульватно-гуматним.

За співвідношенням гумінових і фульвокислот оптимальним варіантом удобрення визнано внесення гною разом з побічною продукцією; за сумарним вмістом гумінових кислот у ґрунті — внесення побічної продукції, деструктора та мінеральних добрив; за часткою фракції ГК-2 (гумати кальцію) — переліг.

Список використаних джерел

1. Скрильник Є. В., Гетманенко В. А., Кутова А. М. Розрахункові моделі балансу гумусу як показника агроекологічної стабільності організації землекористування. *Наукові горизонти (Scientific horizons)*. 2018. №7–8(70). С. 139–144. URL: <https://sciencehorizon.com.ua/uk/author/ye-v-skrilnik>
2. Iraj F., Jiménez-Ballesta R., Mongil-Manso J., Pellejero G., Miguélez D., Najafi P., González J. M. T. The effects of compost application on soil properties: Agricultural and environmental benefits. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2025. Vol. 14. Is. 4. 142548 (1-18). <https://doi.org/10.57647/ijrowa-2025-8144>
3. Kumar N. Effect of organic matter application on physical properties of soil : a review. *International Journal of Environmental Sciences*. 2025. Vol. 11. № 18S. P. 443–450. <https://doi.org/10.64252/zmsxam18> URL: <https://theaspd.com/index.php/ijes/article/view/5013>
4. Ghada F. H. El-Sheref, Sherif Th. Issa El-Sherif, & Gihan A. Mohamed. Effect of organic manures and chemical fertilizers on soil properties and crop yield in a wheat–maize cropping sequence. *International Journal of Plant & Soil Science*. 2025. Vol. 37. Is. 7. P. 441–459. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2025/v37i75590>

5. Assefa S., & Tadesse S. The principal role of organic fertilizer on soil properties and agricultural productivity – a review. *Agri Res and Tech: Open Access J.* 2019. Vol. 22. Is. 2. Art. 556192. <https://doi.org/10.19080/ARTOAJ.2019.22.556192>
6. Cao S., Zhou Yu., Zhou Ya., Zhou X., Zhou W. Soil organic carbon and soil aggregate stability associated with aggregate fractions in a chronosequence of citrus orchards plantations. *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 293. Art. 112847. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112847>
7. Лопушняк В. І. Вплив систем удобрення на вміст гумусу в темно-сірому опідзоленому ґрунті Західного Лісостепу. *Вісник аграрної науки*. 2014. № 2. С. 5–9.
8. Порудєєва Т. В. Вартісний аналіз балансу гумусу в системі екологічно безпечного землекористування. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2009. № 1(48). С. 124–129.
9. Скрильник Є. В., Кутова А. М., Гетманенко В. А., Артем'єва К. С., Ніконенко В. М. Вплив систем удобрення на органічну речовину та агрохімічні показники чорнозему типового. *Агрохімія і ґрунтознавство*. міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського. Харків: 2019. Вип. 88. С. 74–78. <https://doi.org/10.31073/acss88-10>
10. Мірошніченко М. М., Панасенко О. В., Соловей В. Б., Білівець І. І. Антропогенна та природна неоднорідність агрохімічних властивостей ґрунту. *Вісник ХНАУ*. Серія: ґрунтознавство, агрохімія, землеробство, лісова справа. 2010. Вип. 4. С. 102–106.
11. Носко Б. С. Антропогенна еволюція чорноземів. Харків: 13 типографія, 2006. 239 с.
12. Бацула О. О., Головачов Є. А., Дерев'яно Р. Г. та ін. Забезпечення бездефіцитного балансу гумусу в ґрунті; за ред. О. О. Бацули. Київ: Урожай, 1987. 128 с.
13. Гончар Л. В., Кузик Н. В. Вплив систематичного внесення органічних та мінеральних добрив у польовій сівозміні на родючість ґрунту. *Агрохімія і ґрунтознавство*: міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського. Харків, 2006. Спецвипуск: ґрунти – основа добробуту держави, турбота кожного. Кн. 3. С. 33–34.
14. Лопушняк В. І. Динаміка фракційно-групового складу темно-сірого опідзоленого ґрунту під впливом різних систем удобрення. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*: міжвідом. темат. наук. зб. Львів-Оброшине, 2012. Вип. 54. Ч. 2. С. 58–64.
15. Системи удобрення сільськогосподарських культур у землеробстві початку ХХІ століття; за ред. С. А. Балюка, М. М. Мірошніченка. Київ: Альфа-стевія, 2016. 400 с.
16. Chen H., Hao Y., Ma Y., Wang C., Liu M., Mehmood I., Fan M., Plante A. F. Maize straw-based organic amendments and nitrogen fertilizer effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Geoderma*. 2024. Vol. 443. 116820. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116820>.
17. Wang Y., Wu P., Mei F., Ling Y., Qiao Y., Liu C., Leghari S.J., Guan X., Wang T. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A meta-analysis. *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 288. Art. 112391. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112391>.
18. Єгоров О. В., Жидок Н. П., Грищенко О. М., Шабанова І. І. Вплив добрив на показники родючості дерново-підзолистих ґрунтів та продуктивності короткоротаційних сівозмін Полісся. *Агроекологічний журнал*. 2021. № 3. С. 119–126. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2021.240329>
19. Zhang X., Ren X., Cai L. Effects of different straw incorporation amounts on soil organic carbon, microbial biomass, and enzyme activities in dry-crop farmland. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. Is. 23. Art. 10588. <https://doi.org/10.3390/su162310588>

UDC 631.445.4:631.417.2:631.86

Transformation of soil organic matter in agricultural and natural ecosystems**L. D. Hlushchenko^{1 a}, Ye. V. Skrylnyk^{2 b}, S. I. Krylach^{2 c}**¹*Poltava State Agricultural Research Station named after M. I. Vavilov IS and APV NAAS of Ukraine, Poltava, Ukraine*²*National Scientific Center "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky", Kharkiv, Ukraine*✉ orgminlab@gmail.comORCID: ^a 0009-0002-0845-0201, ^b 0000-0002-8642-8547, ^c 0000-0002-3347-6561

Received 15.11.2025; Revised 20.12.2025; Accepted 26.12.2025; Available online 30.12.2025

Abstract. The results of a long-term stationary study of the transformation of the group and fractional composition of humus in typical chernozem under the influence of anthropogenic (fertilization systems) and natural (fallback) factors are described. The object of the study is typical medium-humus chernozem (Haplic Chernozem [Profundihumic]) heavy loam at two locations. The first location is a multi-year stationary experiment with different fertilization systems (organic, organo-mineral and without fertilizers, but with the leaving of plant residues), The second is a separate fallow plot bordering the experiment, on the territory of the Poltava State Agricultural Experiment Station named after M. I. Vavilov, in the village of Stepne, in the central part of the Eastern Forest-Steppe of Ukraine. It was found that in areas where manure and manure with mineral fertilizers were applied for a long time, the total carbon content in the soil was 3–9% higher compared to areas where only plant residues were left (control). Having analyzed the effect of different fertilization systems and natural vegetation on the fallow, we concluded that their versatile influence the dynamics of humus content in the soil, the degree of humification and the type of humus. It was shown that the long-term use of different fertilization systems, regardless of the doses and ratio of the amount of organic and mineral fertilizers applied, changed the degree of humification to "very high" from "high", which was determined where only plant residues were left (control) and on the fallow. The type of humus in the experimental variants fertilized with manure and mineral fertilizers was determined as "humate", and in the control and fallow – as "fulvate-humate". It was found that the quality of humus, which was determined by the indicators of its group and fractional composition, is related to the fertilization system and

the type of land use. According to the ratio of humic and fulvic acids, the optimal option for fertilization was considered to be the application of manure together with plant residues. According to the total content of humic acids in the soil, the leaving of plant residues, destructor and mineral fertilizers; according to the proportion of the fraction of humic acids HA-2 (calcium humates), the optimal option was found to be fallow.

Keywords: organic matter; humus; humification; fertilization systems; typical chernozem.

Citing: Hlushchenko, L. D., Skrylnyk, Ye. V., Krylach, S. I. (2025). Transformation of soil organic matter in agricultural and natural ecosystems. *AgroChemistry and Soil Science*, 99, 41–48. doi:10.31073/acss99-05 [in Ukrainian].

References

1. Skrylnyk, Ye., Hetmanenko, V., & Kutova, A. (2018). Estimation models of humus balance as an indicator of agroecological stability of land management organization. *Scientific Horizons*, 21(8), 139-144. Retrieved from <https://sciencehorizon.com.ua/uk/author/ye-v-skrilnik> [in Ukrainian].
2. Iraj, F., Jiménez-Ballesta, R., Mongil-Manso, J., Pellejero, G., Miguélez, D., Najafi, P., & González, J. M. T. (2025). The effects of compost application on soil properties: Agricultural and environmental benefits. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 14(4), 142548 (1-18). <https://doi.org/10.57647/ijrowa-2025-8144>
3. Kumar, N. (2025). Effect of organic matter application on physical properties of soil : a review. *International Journal of Environmental Sciences*, 11(18S), 443-450. <https://doi.org/10.64252/zmsxam18> Retrieved from <https://theaspd.com/index.php/ijes/article/view/5013>
4. Ghada, F. H. El-Sherif, Sherif, Th. Issa El-Sherif, & Gihan, A. Mohamed. (2025). Effect of organic manures and chemical fertilizers on soil properties and crop yield in a wheat–maize cropping sequence. *International Journal of Plant & Soil Science*, 37(7), 441–459. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2025/v37i75590>
5. Assefa, S., & Tadesse, S. (2019). The principal role of organic fertilizer on soil properties and agricultural productivity – a review. *Agri Res and Tech: Open Access J.*, 22(2), 556192. <https://doi.org/10.19080/ARTOAJ.2019.22.556192>
6. Cao, S., Zhou, Yu., Zhou, Ya., Zhou, X., & Zhou, W. (2021). Soil organic carbon and soil aggregate stability associated with aggregate fractions in a chronosequence of citrus orchards plantations. *Journal of Environmental Management*, 293(1), 112847. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112847>
7. Lopushnyak, V. I. (2014). The influence of fertilization systems on the humus content in dark gray podzolized soil of the Western Forest-Steppe. *Bulletin of Agricultural Science*, 2, 5–9 [in Ukrainian].
8. Porudeeva, T. V. (2009). Cost analysis of the humus balance in the system of environmentally safe land use. *Bulletin of the Agricultural Science of the Black Sea Region*, 1(48), 124–129 [in Ukrainian].
9. Skrylnyk, Ie. V., Kutova, A. M., Hetmanenko, V. A., Artemieva, K. S., & Nikonenko, V. M. (2019). Influence of fertilizers application systems on soil organic matter and agrochemical characteristics of the chernozem typical. *AgroChemistry and Soil Science*, 88, 74-78. <https://doi.org/10.31073/acss88-10> [in Ukrainian].
10. Miroshnychenko, M. M., Panasenko, O. V., Solovey, V. B., & Bilivets, I. I. (2010). Anthropogenic and natural heterogeneity of agrochemical properties of soil. *Bulletin of the Kharkiv National Agr. Univ.*, 4, 102–106 [in Ukrainian].
11. Nosko, B. S. (2006). *Anthropogenic evolution of black soils*. Kharkiv: 13th Typography [in Ukrainian].
12. Batsula, O. O., Golovachov, E. A., & Derevyanko, R. G. (1987). Ensuring a deficit-free balance of humus in the soil; (O. O. Batsula, Ed.). Kyiv: Urozhai [in Ukrainian].
13. Gonchar, L. V., & Kuzyk, N. V. (2006). The influence of systematic application of organic and mineral fertilizers in field crop rotation on soil fertility. *Agrochemistry and Soil Science: interdisciplinary thematic scientific collection. Special issue: Soils – the basis of the state's well-being, everyone's concern*. Kharkiv, 3. 33-34 [in Ukrainian].
14. Lopushnyak, V. I. (2012). Dynamics of fractional and group composition of dark gray podzolized soil under the influence of different fertilization systems. (pp. 58-64). In *Foothill and mountain agriculture and livestock: inter-subject scientific collection*. Lviv – Obroshyne, 54, 2. [in Ukrainian].
15. Baliuk S.A. & Miroshnichenko M. M. (Eds.). (2016). *Fertilization systems for agricultural crops in agriculture at the beginning of the 21st century*. Kyiv: Alfa-stevia [in Ukrainian].
16. Chen, H., Hao, Y., Ma, Y., Wang, C., Liu, M., Mehmood, I., Fan, M. & Plante, A. F. (2024) Maize straw-based organic amendments and nitrogen fertilizer effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Geoderma*. 443. 116820. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116820>.
17. Wang Y., Wu P., Mei F., Ling Y., Qiao Y., Liu C., Leghari S.J., ... & Wang T. (2021) Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A meta-analysis. *Journal of Environmental Management*. 288. 112391. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112391>.
18. Egorov, O. V., Zhydok, N. P., Hryshchenko, O. M. & Shabanova, I. I. (2021). The influence of fertilizers on the fertility indicators of sod-podzolic soils and the productivity of short-rotations in Polissya. *Agroecological Journal*. 3. 119-126. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2021.240329> [in Ukrainian].
19. Zhang, X., Ren, X., & Cai, L. (2024). Effects of different straw incorporation amounts on soil organic carbon, microbial biomass, and enzyme activities in Dry-Crop Farmland. *Sustainability*, 16(23), 10588. <https://doi.org/10.3390/su162310588>

МІЛІТАРНА ДЕГРАДАЦІЯ ҐРУНТІВ УКРАЇНИ

MILITARY DEGRADATION OF UKRAINIAN SOILS

УДК 631.4:504.61:335.01:528.9:004.92

Особливості картографування мілітарно деградованих ґрунтів на національному й регіональному рівнях

Ю. В. Залавський^а, В. В. Лебедь^б

Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 26.11.2025 Отримано після доопрацювання 20.12.2025 Затверджено до видання 26.12.2025 Доступно онлайн 30.12.2025 <i>Ключові слова:</i> ґрунт; мілітарна деградація; картографування; ГІС; цифрове картографування ґрунтів; ДЗЗ	Представлено результати аналізування особливостей картографування мілітарно деградованих ґрунтів на національному та регіональному рівнях в Україні у контексті повномасштабної війни. Пошкодження ґрунтового покриву включають механічні ушкодження, ущільнення ґрунту пересуванням техніки, формування вибухових кратерів, локальне накопичення важких металів та продуктів детонації. Основна різниця між картами національного та регіонального рівнів полягає у масштабі, деталізації, точності та меті картографування: національні карти узагальнюють просторові тенденції деградації ґрунтів, а регіональні — надають детальну інформацію про конкретні типи, ступені та механізми пошкодження. На значній частині деокупованих територій обстеження не є можливим через небезпеку від мін та дронів. Порівняно з довоєнними роботами з виявлення деградації ґрунтів, сучасні дослідження мають значно вищу залежність від дистанційних методів, що зумовлено безпековими обмеженнями. Основну увагу приділено цифровим методам картографування, що включають геоінформаційні системи (ГІС), дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) та цифрове картографування ґрунтів (DSM). Автори оцінюють можливості використання супутникових даних середньої та високої роздільної здатності (Sentinel-2, Landsat, Sentinel-1 SAR) у поєднанні з польовими спостереженнями для кількісного оцінювання деградації. Представлено результати створення цифрових карт національного масштабу з оцінкою площ деградованих ґрунтів за 2023–2025 рр., а також регіональних карт на прикладі Харківської області та конкретної громади. Площа мілітарно деградованих ґрунтів України за цей період збільшилась удвічі, а номенклатура типів ушкоджень розширилась. Найбільше постраждали ґрунти групи «Black Soils» (~70 %). Автори підкреслюють, що інтегровані підходи, які поєднують ДЗЗ, ГІС і польову валідацію, а також стандартизація методик, легенд і системи даних, є ключовими для ефективного моніторингу мілітарної деградації ґрунтів на різних територіальних рівнях.

✉ yurazzz1984@gmail.com

ORCID: ^а0000-0002-4549-963X ; ^б0000-0002-1429-4121

Форма цитування: Залавський Ю. В., Лебедь В. В. Особливості картографування мілітарно деградованих ґрунтів на національному й регіональному рівнях. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ «ІГА ім. О. Н. Соколовського». Харків: 2025. Вип. 99. С. 49–63. doi: 10.31073/acss99-06

1. Вступ

Повномасштабна війна на території України спричинила безпрецедентний за масштабами та інтенсивністю вплив на ґрунтовий покрив. Ураження ґрунтів унаслідок бойових дій мають багатокомпонентний характер і включають механічні руйнування профілю, ущільнення від пересування важкої військової техніки, формування вибухових кратерів (вирв), а також хімічне та біогеохімічне забруднення продуктами детонації, паливно-мастильними матеріалами та важкими металами [1–3]. У науковій літературі ці процеси узагальнюють терміном «мілітарна деградація ґрунтів».

З огляду на великі площі потенційно уражених територій та обмежені можливості суцільних польових обстежень, ключову роль у фіксації, аналізі та

інтерпретації таких змін відіграє цифрове картографування. Саме поєднання геоінформаційних систем (ГІС), дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та методів Digital Soil Mapping (DSM) розглядається як основа сучасних підходів до оцінювання мілітарно деградованих ґрунтів на різних просторових рівнях — від локального до національного [4, 5].

У наукових працях останніх років сформовано уявлення про мілітарну деградацію як сукупність фізичних, хімічних та біологічних змін ґрунту, зумовлених безпосереднім або опосередкованим впливом воєнних дій [1, 6]. Фізична деградація проявляється у порушенні ґрунтової структури, руйнуванні горизонту А, розвитку ерозійних процесів і техногенного ущільнення. Хімічна складова охоплює локальне накопичення важких металів (Pb, Cu, Zn, Cr), нітросполук та залишків вибухових речовин. Біологічна деградація виражається у зниженні біологічної активності, деградації гумусового стану та зміні мікробіологічних процесів [2, 7].

Для картографування такої деградації дедалі частіше застосовують багаторівневі класифікації, які дозволяють розмежувати прямі вибухові ушкодження, вторинні механічні впливи та довготривале дифузне забруднення [6]. Така класифікаційна основа може бути необхідною передумовою створення узгоджених цифрових карт мілітарної деградації.

Більшість дослідників сходяться на тому, що супутникові дані є ключовим джерелом інформації для національного рівня оцінювання мілітарно деградованих ґрунтів [3, 5, 8]. Оптичні знімки Sentinel-2 та Landsat дозволяють фіксувати порушення рослинного покриву, випалені ділянки, зміну структури посівів і появу вибухових вирв. Аналіз часових рядів спектральних індексів (NDVI, NBR, SAVI) дає змогу відокремлювати воєнні аномалії від кліматично зумовлених змін [9]. Окрему увагу в літературі приділено застосуванню радарних даних Sentinel-1, які є менш чутливими до хмарності та дозволяють виявляти зміни мікрорельєфу й ущільнення ґрунту [10]. Комбінування оптичних і SAR-даних розглядається як перспективний напрям для підвищення надійності картографування ушкоджених територій на загальнодержавному рівні.

Методи DSM (цифрове картографування ґрунтів) є важливим інструментом переходу від якісного виявлення ушкоджень до кількісного оцінювання ступеня деградації ґрунтів [11]. Класичні роботи McBratney та ін. [12] заклали методологічні основи прогнозування ґрунтових властивостей на основі екологічних предикторів. У сучасних воєнних умовах ці підходи адаптують для реконструкції довоєнного стану ґрунтів і моделювання змін умісту гумусу, щільності будови та концентрацій забрудників [4, 13]. Застосування машинного навчання (Random Forest, Gradient Boosting, нейронні мережі) дозволяє поєднувати обмежені польові вимірювання з великою кількістю супутникових та ландшафтних змінних. У частині публікацій окремо наголошується на необхідності ретельної валідації моделей і врахування мультиколінеарності предикторів [11, 14].

Регіональні дослідження, виконані в Харківській, Київській та Херсонській областях, демонструють ефективність поєднання супутникового аналізу з цільовими польовими обстеженнями [2, 5, 15]. На рівні територіальних громад створюються детальні цифрові карти кратерів, зон ущільнення, потенційного хімічного забруднення та ризиків землекористування [1, 16]. Такі карти мають прикладне значення для планування розмінування, визначення придатності сільськогосподарських угідь та послідовності рекультиваційних заходів. Слід зазначити, що наявні оцінки мають попередній характер через обмеженість польових

даних у прифронтових районах. Водночас їх масштабування до національного рівня потребує уніфікації легенд, індикаторів і метаданих.

У звітах же FAO, JRC та CEOBS підкреслюється відсутність єдиної національної платформи просторових даних щодо мілітарно деградованих ґрунтів [3, 8, 17]. Фрагментарність джерел, різні методики відбирання проб і обробки даних ускладнюють порівняння результатів і побудову узагальнених карт. З огляду на це, дослідники пропонують створення модульної системи картографування з обов'язковими базовими шарами (фізичні ушкодження, потенційне забруднення, ризик мінування) та можливістю деталізації на регіональному рівні [4, 16].

Таким чином можна стверджувати, що цифрове картографування є ключовим інструментом оцінювання мілітарно деградованих ґрунтів України. Найбільш перспективними є інтегровані підходи, що поєднують дистанційне зондування, DSM та польову валідацію. Перехід від локальних кейсів до національної системи картографування потребує стандартизації методик, узгодження класифікацій і створення централізованої просторової інфраструктури.

Метою роботи є порівняння особливостей картографування мілітарно деградованих ґрунтів на національному, регіональному та локальному рівнях з урахуванням відмінностей у методах збору даних, джерелах просторової інформації, ступені деталізації та способах відображення деградаційних процесів на картах.

2. Об'єкти і методи досліджень

2.1. Об'єкти досліджень

Об'єктами всього дослідження є території ґрунтового покриття України, які зазнали мілітарного впливу внаслідок повномасштабних бойових дій, що проявляється у формі механічного порушення генетичних горизонтів ґрунтового профілю, зміни морфологічних фізичних, хімічних і фізико-хімічних властивостей ґрунтів, забруднення продуктами вибухів та роботи військової техніки, а також трансформації землекористування.

На національному рівні об'єктом дослідження є вся територія України в межах зон активних і потенційних бойових дій, де мілітарна деградація ґрунтів розглядається як узагальнене просторове явище. На цьому рівні ґрунтовий покрив аналізується без детальної диференціації типів ґрунтів.

На регіональному рівні об'єктами дослідження є території адміністративної області (Харківська), району (Харківський), територіальної громади (Чкаловська), де мілітарна деградація ґрунтів розглядається у взаємозв'язку з ґрунтовим покривом, рельєфом і характером землекористування.

2.2. Методи досліджень

Дослідження виконано з використанням комплексу взаємодоповнювальних методів, які забезпечують аналіз і порівняння особливостей картографування мілітарно деградованих ґрунтів на різних просторових рівнях.

На першому етапі здійснено збір, аналіз та систематизацію просторових і тематичних даних, що використовуються для картографування мілітарно деградованих ґрунтів. До інформаційної бази увійшли матеріали дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), результати польових ґрунтових обстежень, існуючі ґрунтові картографічні матеріали, місцеві дані та відкриті геопросторові ресурси (DeepState,

ISW тощо). Особливої уваги приділено оцінці придатності джерел даних для використання на різних масштабних рівнях, з урахуванням їх просторової та часової роздільності.

Для ідентифікації ознак мілітарної деградації ґрунтів використано методи обробки супутникових знімків середньої та високої просторової роздільності. Аналіз включав попередню обробку даних, візуальну та напівавтоматизовану інтерпретацію зображень, а також застосування спектральних і текстурних ознак для виявлення порушених ділянок. Результати дистанційного аналізу використовувалися переважно на національному та регіональному рівнях для первинного виділення зон мілітарного впливу.

Ключовим методом дослідження є геоінформаційний аналіз, що включав інтегрування різнорідних просторових даних у середовищі ГІС (ArcGIS, QGIS, ArcGIS Online), просторову прив'язку, класифікацію та візуалізацію результатів. Застосовано методи цифрового картографування ґрунтів для формування тематичних карт мілітарної деградації, адаптованих до вимог відповідних масштабних рівнів. Особливої уваги приділяли вибору картографічних показників та способів їх узагальнення.

Для забезпечення порівняльності результатів застосовано методи просторового узагальнення та масштабною трансформації, які дозволяють адаптувати первинні дані до різних масштабів картографування. На національному рівні використовували узагальнені індикатори деградації, тоді як на регіональному та локальному рівнях збережено більшу деталізацію просторових об'єктів. Це дало змогу проаналізувати вплив масштабу на характер картографічного відображення процесів деградації ґрунту.

З метою виявлення відмінностей між національним, регіональним і локальним рівнями картографування проведено порівняльний аналіз створених карт та наявних картографічних матеріалів, розроблених в ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського». Аналізували підходи до класифікації форм деградації, ступінь деталізації, точність просторового відображення та інформаційну насиченість карт. Порівняльний підхід дозволив оцінити можливості та обмеження кожного масштабового рівня.

Для регіонального та локального рівнів картографування використано результати ґрунтових обстежень, польових спостережень та локальних вимірювань, які слугували основою для уточнення та верифікації картографічних результатів. Польові дані застосовували також для експертної оцінки достовірності інтерпретації дистанційних матеріалів.

3. Результати й обговорення

3.1. Національний рівень картографування

Починаючи з 2023 року, коли лінія бойових зіткнень відносно стабілізувалася, стало можливим провести оцінювання площ земель, що опинилися в епіцентрі бойових дій та зазнали серйозних ушкоджень. Саме тоді фахівці Інституту ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського створили карту впливу бойових дій на ґрунти України та підрахували орієнтовні площі уражених (та потенційно деградованих) ґрунтів, у тому числі із визначенням, які саме ґрунти зазнали найбільших ушкоджень. Слід зауважити, що в подальшому ця карта щороку зазнавала оновлення даних. Такі дослідження були проведені станом на 2023, 2024

та 2025 роки. Якщо подивитись на результати геообробки даних та оцінки за три роки, основна очевидна тенденція — збільшення площ деградації ґрунтів внаслідок воєнних дій (Рис. 1). Зокрема, орієнтовна площа деградованих ґрунтів у 2023 р. становила 950 тис. га. За період до 2024 р. площа збільшилась до майже 1,17 млн га. А в 2025 р. площа мілітарно деградованих ґрунтів становить близько 1,8 млн га. Нажаль, слід констатувати, що за три роки площа мілітарно деградованих ґрунтів України збільшилась майже у два рази. У структурі землекористування близько 55-60 % — це землі сільськогосподарського призначення.

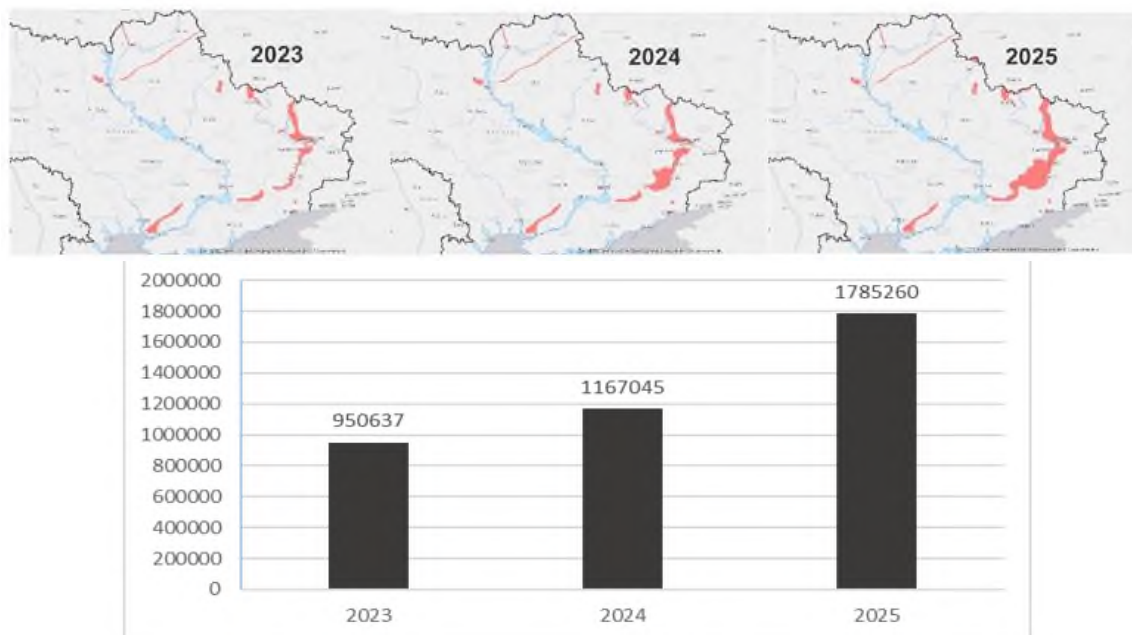


Рис. 1. Динаміка площі мілітарно деградованих ґрунтів України (га) у 2023–2025 рр.

На даний момент опубліковано версію, датовану кінцем 2025 р. (Рис. 2). Базовий масштаб карти 1:4 000 000. Картографічний матеріал акумулює в собі оцінку стану ґрунтового покриття в результаті мілітарного впливу, а саме зони активних бойових дій, «сірі» зони, окуповані та деокуповані території. Так, на основі геостатистичної обробки оцінено площі мілітарно-деградованих ґрунтів у межах адміністративних областей України. Визначено, що найбільшого впливу зазнали ґрунти Донецької та Харківської областей на площі 780 та 320 тис. га відповідно. Саме в цих областях відмічено послідовну пропорційну тенденцію зростання площ. Простежується також тенденція зростання площ у Запорізькій (144 тис. га) та Сумській (97 тис. га) областях. Але відчутне зростання відбулось саме у 2025 р. в зв'язку з поновленням активних наступальних дій військ РФ. Особливої уваги заслуговують дані про появу мілітарно деградованих ґрунтів в Дніпропетровській області (більше 50 тис. га) у 2025 р., чого не було в попередні роки війни. В інших областях — Луганській, Київській, Чернігівській, Миколаївській, Херсонській, та Одеській зміни були незначні або не було зовсім.

Серед ґрунтів, що зазнали найбільшої деградації — чорноземи звичайні (близько 32 % від загальної площі мілітарно деградованих ґрунтів). Також значної деградації зазнали дернові та дерново-підзолисті ґрунти (16 %), чорноземи південні (15 %), чорноземи типові (9 %) і темно-каштанові ґрунти (8 %) та інші.



Рис. 2. Карта впливу бойових дій на ґрунти України (2025)

3.2. Регіональний рівень картографування

З початком повномасштабного вторгнення РФ у 2022 р., територія Харківської області стала місцем ведення активних бойових дій, особливо її північна частина. Саме тому першою картою мілітарного впливу, що була створена в ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського», була карта впливу воєнних дій на ґрунти Харківського району (Рис. 3). Карту створено у 2022 р. для відображення первинного впливу бойових дій на ґрунтовий покрив та визначення типів мілітарної деградації ґрунтів. Масштаб карти 1:250 000 — характерний для більшості карт областей України. Ступінь деталізації дозволяє нам виділяти такі ділянки чи об'єкти, що неможливі на карті загальнонаціонального масштабу. Карта є комбінацією елементів ґрунтового покриву та різновидів воєнного впливу, що призводять до деградації. Завдяки даним ДЗЗ (Рис.4) та ортофотозйомки з дистанційно керованого літального апарату (ДКЛА) визначено основні місця та площі впливу бойових дій безпосередньо. Були ідентифіковані та відображені зони хімічного забруднення та вирви від снарядів, які чітко розрізняються у виділеному полігоні на рис. 4. Площа такого комбінованого типу ураження становила 6,8 тис. га. Ідентифіковано поля, що згоріли під час бойових дій, загальною площею майже 1,4 тис. га. Визначено місця ураження техніки та позицій військ РФ. Площа цих територій становила 0,7 тис. га. Всі ці зони знайшли відображення як площинні об'єкти. Лінійними ж об'єктами відображено місця ущільнення ґрунту внаслідок проходження військової техніки. Загальна площа впливу воєнних дій на ґрунти становила майже 8,9 тис. га. Підраховано, що найбільшого впливу серед ґрунтів району зазнали чорноземи опідзолені (51,5 %) та чорноземи типові середньогумусні (45,1 %), що разом становило 96,6 % від усього ґрунтового фонду, що опинився під впливом війни.

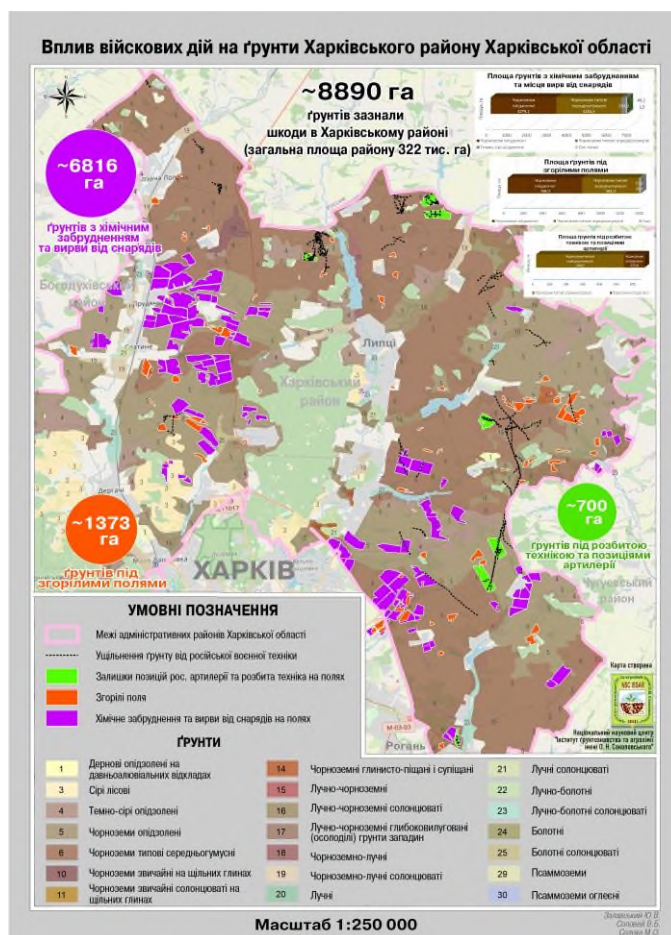


Рис. 3. Карта впливу воєнних дій на ґрунти Харківського району Харківської області (2022).

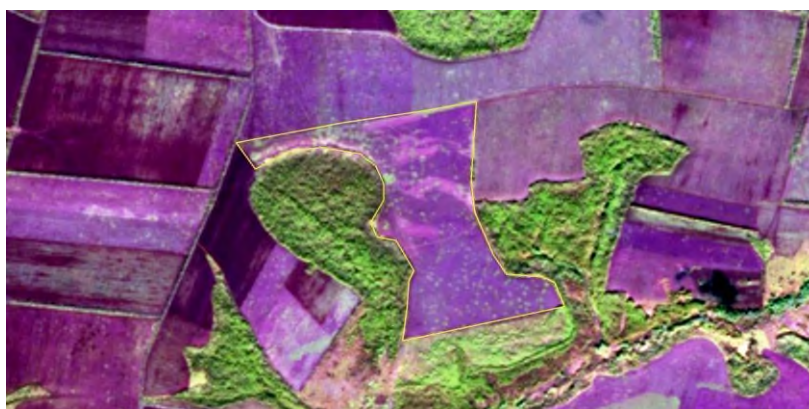


Рис. 4. Виявлення наслідків мілітарної деградації ґрунтів за даними Sentinel-2 (комбінація спектральних каналів "Agriculture").

З часом, коли значну частину територій Харківської області було звільнено від російських військ у 2023 р., з'явилася можливість дослідження деокупованих територій. Особливо це стосується наземних ґрунтових досліджень для більш детального вивчення мілітарної деградації. У зв'язку з цим командою дослідників ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського» у 2023–2025 рр. проведено обстеження ґрунтів Чкаловської територіальної громади Чугувського району Харківської області з метою

виявлення впливу бойових дій на їх стан. Одним з основних виходів дослідження було створення набору карт сучасного стану ґрунтів з урахуванням тих чи інших зовнішніх факторів впливу, що дозволило отримати актуальну інформацію для подальших дій щодо ремедіації та рекультивації земель громади (Рис. 5). Набір карт створений на основі даних ДЗЗ, проведенням польових досліджень із відбором ґрунтових проб, ГІС-аналізу, архівних даних тощо [16, 18].

На початку досліджень була розроблена карта-версія ймовірно ушкоджених ґрунтів, яку в подальшому верифікували під час польового обстеження. Для оцінки сучасного стану ґрунтового покриву, попередньо створено карти ґрунтів, гранулометричного складу, вмісту органічного вуглецю, карти рН. Даний перелік карт дозволив знати диференціацію ґрунтів громади (26 підтипів ґрунтів). За даними гранулометричного складу ґрунти північно-західної частини громади значно «легші», там переважають параметри зв'язно-піщаного, супіщаного та легкоглинистистого гранскладу, завдяки чому інфільтрація забруднюючих речовин може бути більш інтенсивною з усіх шарів ґрунту. На більшій частині території громади переважають легкоглинисті ґрунти. Вміст органічного вуглецю загалом є високим — 2,0–3,5 %, хоча в місцях із легким гранскладом значення становлять близько 1 %.

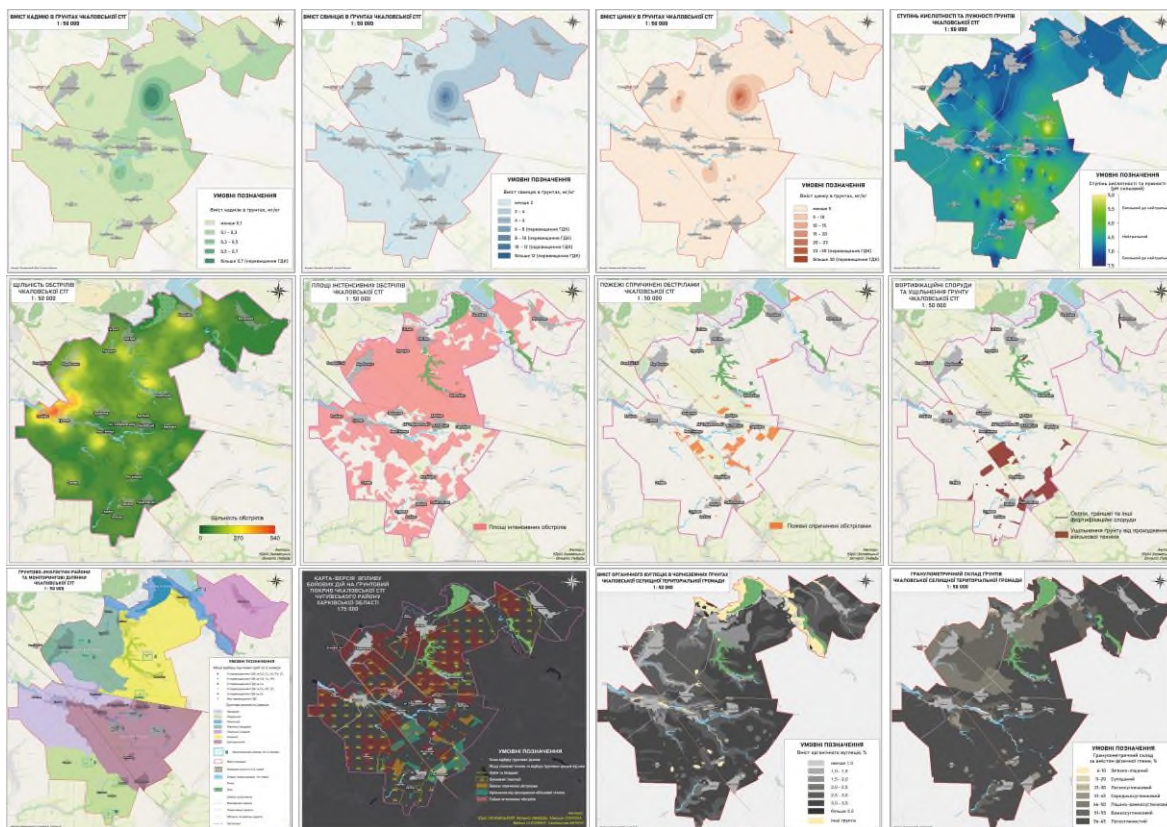


Рис. 5. Набір карт впливу бойових дій на характеристики ґрунтів Чкаловської громади [18].

На відміну від попередніх розробок карт впливу бойових дій, було значно розширено перелік показників, які необхідно визначити задля загальної оцінки стану ґрунтів громади. Карти умісту важких металів включали показники забруднення цинком, свинцем та кадмієм. Загальні перевищення ГДК були присутні, але не в настільки значних розмірах. Також створено блок карт, що відображають площі ураження земель. Визначено площі різної інтенсивності бойових дій, підраховано

щільність обстрілів, площі пожеж, спричинених обстрілами, площі ущільнення ґрунту, а також окопи, траншеї, фортифікаційні споруди. Так, наприклад найбільшу щільність обстрілів визначено на лінії, що умовно з'єднує села Гракове, Ртищівка і Коробчине, де знаходилась лінія оборони Збройних Сил України (ЗСУ). Однак це не знайшло відображення на картах умісту важких металів. Обґрунтування цього факту достатньо просте — значна частина громади досі залишається замінованою і є небезпечною для проведення наземних досліджень. Результуюча карта мілітарної деградації ґрунтів Чкаловської громади свідчить, що землі на площі близько 80 % зазнали воєнного впливу за півроку окупації та ведення активних бойових дій (Рис. 6).

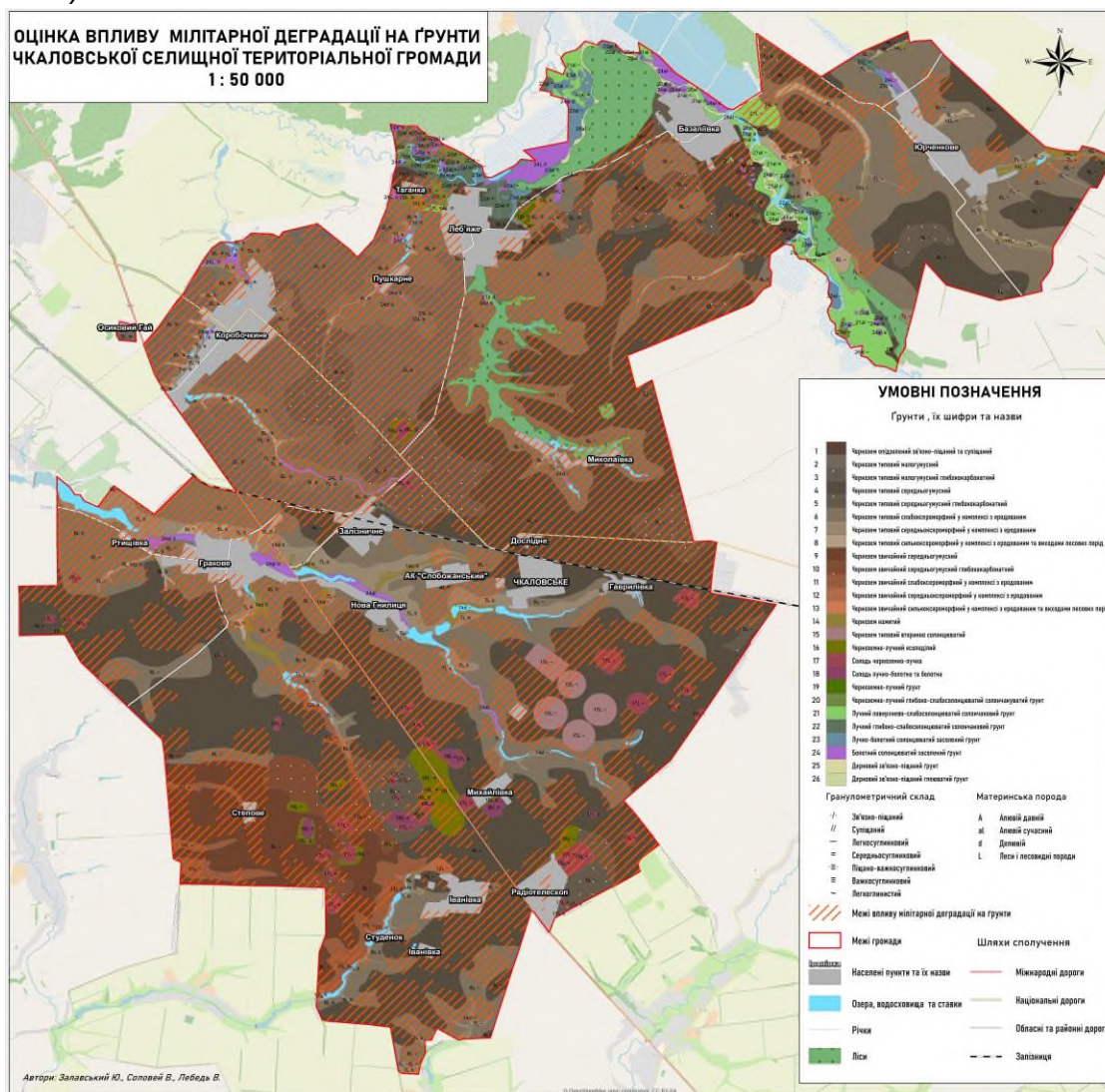


Рис. 6. Карта мілітарної деградації ґрунтів Чкаловської громади [18].

Основний тип ґрунту на території громади — чорноземи типові середньогумусні (85 % усього ґрунтового фонду), вони ж і найсильніше пошкоджені. Чорноземи типові середньогумусні є одними з найбільш родючих ґрунтів України, і звичайно, в своїй більшості є ґрунтами сільськогосподарського призначення. Отже можна стверджувати, що найбільш ушкодженими ґрунтами громади є саме сільськогосподарські землі.

Завершальним етапом робіт було районування за ґрунтово-екологічними показниками та визначення моніторингових ділянок — місць найбільшої концентрації мілітарного забруднення ґрунтів (Рис. 7). На території громади виділено 7 ґрунтово-екологічних районів та 10 моніторингових ділянок у п'ятих районах. Західний район, на даний момент не є безпечним для проведення детальних досліджень через замінованість, а в Північно-Східному бойові дії були майже відсутні як такі. Проведення досліджень на регіонально-локальному рівні не тільки дало відповіді на питання щодо впливу воєнних дій на ґрунти, а й поставило нові запитання і виклики щодо безпеки проведення будь-яких робіт в регіоні. А саме, найбільш пошкоджені території, де необхідно проводити дослідження, залишаються й досі (через 3 роки після деокупації) недоступними через мінну небезпеку.

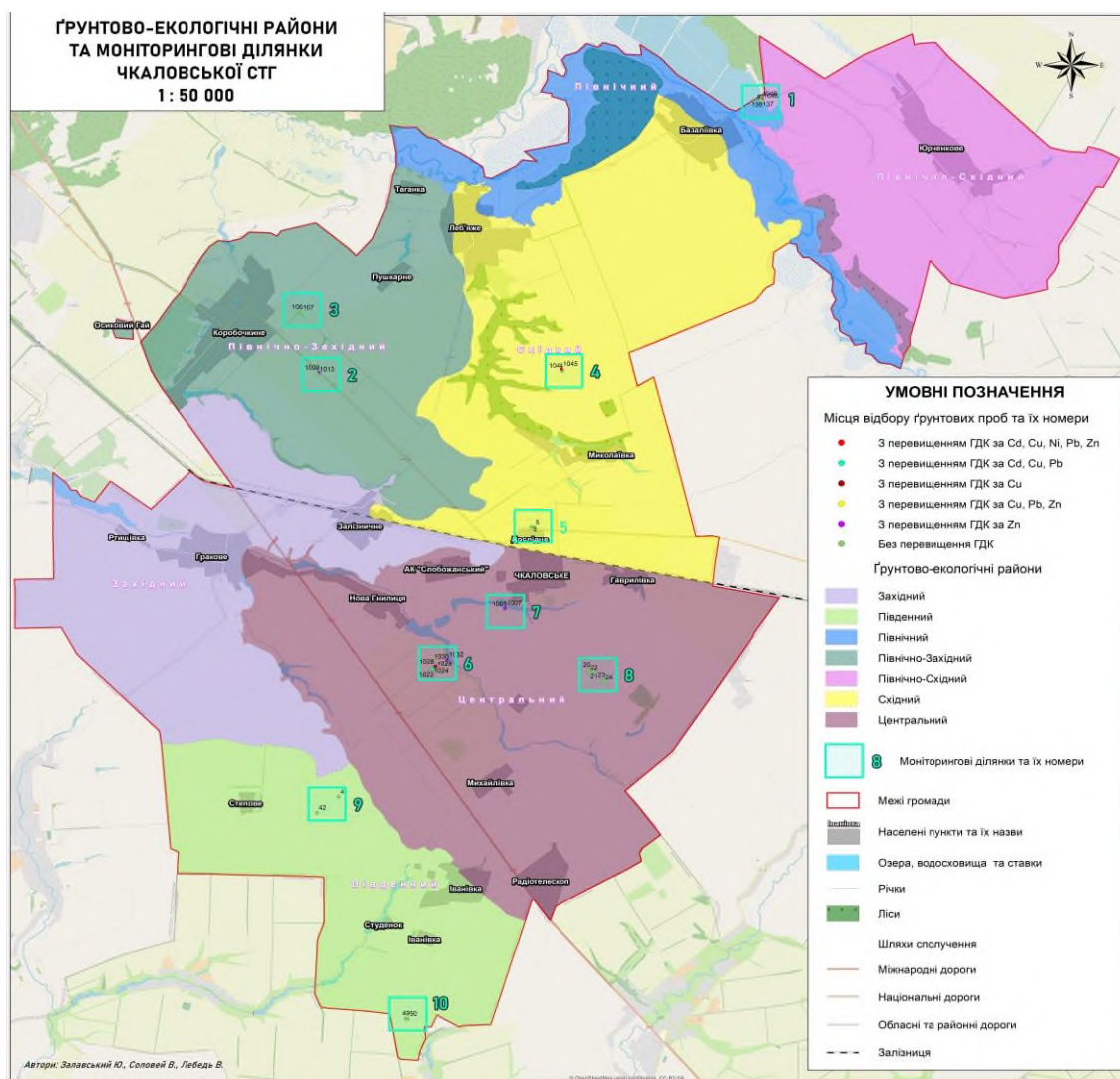


Рис. 7. Карта ґрунтово-екологічного районування та моніторингових ділянок [18].

3.3. Особливості картографічної складової оцінювання мілітарної деградації ґрунтів

Карти національного масштабу мілітарної деградації ґрунтів відображають узагальнену просторову картину впливу воєнних дій на ґрунтовий покрив країни та

слугують інструментом стратегічного аналізу і державного планування. Вони базуються на інтеграції дистанційного зондування Землі, офіційної інформації про зони бойових дій і тимчасової окупації, матеріалів ґрунтових обстежень та експертних оцінок, що дозволяє виокремити території з різним рівнем деградації — від потенційно уражених до сильно порушених. Такі карти не фіксують детальні локальні зміни, але чітко показують загальні просторові закономірності, формують основу для національних програм моніторингу, визначення пріоритету відновлювальних заходів і оцінки довгострокових ризиків для продовольчої безпеки.

Джерела даних для карт національного рівня: супутникові дані середньої роздільності (Sentinel-2, Landsat); карти воєнної активності (DeepState, ISW); інтеграція національних даних ушкоджень (ДЧНС, Міндовкілля); національні карти ґрунтів.

Типи об'єктів, що можуть бути відображені на картах національного масштабу: зони бойових дій (блоками або полігонами); орієнтовні класи деградації (забруднення, ерозія тощо); інтенсивність воєнного навантаження; масштабні антропогенні зміни.

Карти регіонального масштабу мілітарної деградації ґрунтів спрямовані на детальніше відображення наслідків воєнного впливу в межах окремих областей або фізико-географічних районів і орієнтовані на практичні потреби відновлення землекористування. На відміну від національних, вони спираються на більш щільну мережу польових обстежень, результати агрохімічного аналізу, локальні дані про типи воєнних ушкоджень та конкретні ґрунтові відміни. Це дає змогу ідентифікувати мозаїчність деградації, виділяти зони з критичним порушенням ґрунтового профілю, локальним забрудненням або механічним руйнуванням і обґрунтовувати адресні заходи рекультивації, розмінування та повернення земель у сільськогосподарське використання.

Враховуючи досвід розроблення регіональних карт можна встановити наступне. Джерелами даних на регіональному рівні можуть бути: супутникові знімки високої роздільної здатності (Махаг); ортофото з БПЛА (ДКЛА); польові обстеження і пробовідбір; великомасштабні та детальні регіональні карти ґрунтів (Серія карт великомасштабного обстеження ґрунтів України 1:200 000, карти агровиробничих груп ґрунтів у межах колишніх сільрад 1:10 000 та ін.); локальні дані громад; геофізичні дані; військові топографічні матеріали (за наявності доступу).

Об'єкти, що можуть бути відображені на регіональних картах: контури вивв; фортифікаційні споруди, укріпрайони; ділянки забруднення важкими металами тощо; детальна орографія порушених територій; деградовані агроландшафти; ділянки ущільнення ґрунту; заміновані поля; згорілі поля та ін.

Порівняння картографічної складової національного та регіонального масштабів узагальнено в таблиці (Табл.), де відображено ключові відмінності за метою картографування, точністю, роздільністю, джерельною базою та часовим аналізом. Національний рівень орієнтований на стратегічну оцінку збитків та виявлення пріоритетів щодо відновлення територій і формування державних та міжнародних звітів, що зумовлює використання узагальнених показників, середньої або низької просторової роздільності та супутникових і національних баз даних із характерною більшою похибкою. Регіональний масштаб, навпаки, спрямований на вирішення прикладних завдань — планування рекультивації, кадастрові обстеження та оцінку ризиків для громад і землекористувачів, що забезпечується високою просторовою деталізацією, чіткими межами об'єктів, залученням польових

досліджень, ортофотопланів і GPS-даних, а також можливість проведення детального покрокового часового аналізу.

Таблиця

Порівняльна характеристика національного і регіонального рівнів картографування мілітарної деградації ґрунтів

Національний рівень	Регіональний рівень
<i>Мета картографування</i>	
Оцінка національного масштабу збитків	Проекти відновлення ґрунтів
Пріоритизація областей для рекультивції	Ґрунтове обстеження земель
Формування державних програм з відновлення	Оцінка ризиків для фермерів та громад
Міжнародна звітність (FAO, UNEP, World Bank)	Основа планів рекультивції
<i>Точність і похибки</i>	
Оціночні межі деградації	Чіткі межі кратерів (вирв), траншей, забруднених ділянок
Знижена точність через хмарність, обмеження доступу та генералізацію	Реальні польові дані дозволяють робити нормативні висновки
Похибка може сягати 200–500 м	Точність може сягати 1–5 м
<i>Роздільність</i>	
Середня або низька	Висока
<i>Джерела</i>	
Супутникові дані, Національні та глобальні БД та карти	Супутникові дані високої РЗ
Дані військової аналітики тощо	Ортофотоплани
	Локальні джерела даних
	Польові дослідження
	GPS-трекінг тощо
<i>Часовий аналіз</i>	
Піврічний, багаторічний	Покроковий (рік, місяць, тиждень)

3.4. Обговорення результатів дослідження

Отримані результати загалом узгоджуються з висновками попередніх вітчизняних та міжнародних досліджень щодо масштабності та багатокомпонентного характеру мілітарної деградації ґрунтів. Зокрема, зафіксоване у роботі дворазове збільшення площ мілітарно деградованих ґрунтів у 2023–2025 рр. підтверджує тенденції, описані у звітах FAO та регіональних дослідженнях для східних областей України, де наголошується на швидкому розширенні зон фізичного руйнування ґрунтового профілю та техногенного навантаження внаслідок тривалих бойових дій.

Спільною рисою з більшістю раніше опублікованих робіт є домінування чорноземів серед уражених ґрунтів. Це пояснюється не лише їх просторовою поширеністю у зоні активних бойових дій, а й високою часткою у площі сільськогосподарських угідь, що підтверджує висновки регіональних досліджень у Харківській, Херсонській та Запорізькій областях. Водночас у представленому дослідженні частка темнозабарвлених ґрунтів (чорноземи, темно-сірі, лучно-чорноземні та темно-каштанові ґрунти) у структурі деградованих ґрунтів є дещо вищою, ніж у ряді попередніх оцінок, що може бути пов'язано з розширенням зони бойових дій у 2024–2025 рр. на території з інтенсивним землеробством.

Відмінною рисою цієї роботи є систематичне поєднання національного та регіонального рівнів аналізу в межах єдиної картографічної концепції. У багатьох попередніх публікаціях переважають або локальні (окремі громади, поля, полігони), або узагальнені оцінки для країни без детальної верифікації.

Суттєвою відмінністю сучасних досліджень від довоєнних робіт з оцінювання деградації ґрунтів є різке зростання ролі дистанційного зондування. Якщо раніше польові обстеження були основним джерелом даних, то нині вони виконують

переважно верифікаційну функцію через мінну небезпеку та обмежений доступ до значної частини деокупованих територій. Це узгоджується з міжнародними підходами, де супутникові дані розглядаються як базовий інструмент первинної інвентаризації ушкоджень, однак у цій роботі показано, що без локальної перевірки точність оцінок на регіональному рівні залишається обмеженою.

Таким чином, результати дослідження підтверджують основні тенденції, описані в попередніх роботах, але водночас розширюють їх із застосуванням даних кількісної динаміки за 2023–2025 рр., деталізації структури уражених ґрунтів і практичної демонстрації масштабної залежності методів картографування. Це підкреслює необхідність розвитку інтегрованих багаторівневих систем моніторингу, які поєднують національні узагальнення з детальними регіональними спостереженнями.

4. Висновки

Порівнюючи специфіку створення різномісцевих карт можна стверджувати, що головна різниця полягає у деталізації, точності й методах здобування даних та цілі картографування. На національному рівні карта узагальнює просторові тенденції, тоді як регіональна карта деталізує типи, ступені та механізми деградації. Тому існують певного роду відмінності щодо картографування різних рівнів: масштаб та деталізація; точність картографічної основи та номенклатури ґрунтів; типи деградаційних форм; методи збирання даних; мета картографування; підходи до класифікації; структура легенди карти. У сукупності ці відмінності підкреслюють взаємодоповнювальний характер національного й регіонального картографування, де узагальнені оцінки країни деталізуються та уточнюються на локальному рівні.

Картографування мілітарно деградованих ґрунтів на рівні країни — це макроспостереження за загальними зонами впливу, тоді як регіональне картографування дозволяє з високою точністю фіксувати конкретні форми порушення та планувати реальне відновлення. Тому дослідження регіонального рівня — є основою для аналітичних даних національного.

Потенційна площа мілітарно деградованих ґрунтів України у роки з 2023 до 2025 збільшилась у два рази (з 950 тис. до 1,8 млн га) та спостерігається розширення номенклатури типів пошкоджень ґрунтів у 2025 порівняно з 2022 роком. Саме ґрунти групи «Black Soils» (темнозбарвлені або чорні) є найбільш постраждалими внаслідок російської агресії (~70 %).

Значна частина деокупованих територій недоступна для обстеження через мінну та дронуву небезпеку. Порівняно з довоєнними роботами з деградації ґрунтів, сучасні дослідження значно сильніше залежать від дистанційних методів, що зумовлено безпековими обмеженнями.

Здобуті результати можуть слугувати основою для стратегічного моніторингу стану ґрунтів, планування заходів рекультивації та оцінки ризиків для землекористувачів. Подальші дослідження доцільно зосередити на інтеграції дистанційного зондування, польових спостережень і цифрових моделей картографування для підвищення точності оцінок та створення централізованої системи моніторингу мілітарно деградованих ґрунтів.

Подяка. Під час підготовки цієї роботи використано окремі результати проекту «Оцінювання впливу збройної агресії на стан чорноземів і розроблення заходів для прискореного відновлення родючості ґрунтів у контексті забезпечення продовольчої

безпеки» №2022.01/0031 конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди» за грантової підтримки Національного фонду досліджень України.

Список використаних джерел

1. Solovei V., Lebed V., Zalavskiy Yu. Genetic aspects of militaristic soil degradation in Ukraine. *Caring for Soils in War and Peace: Status, Monitoring and Management* : collection of abstracts of the International Scientific & Practical Conference (Kharkiv, December 5, 2024). Kharkiv: NSC ISSAR, 2025. P.133. URL: <http://www.issar.com.ua/uk/vydannya>
2. Smirnova K., Baliuk S., Kucher A., Vorotyntseva L., & Honcharova A. Ecological and toxicological condition of militarily degraded chernozems: A case study of the Chkalovsk territorial community. *Scientific Horizons*. 2024. Vol. 27. No. 11. P. 90-104. <https://doi.org/10.48077/scihor11.2024.90>
3. FAO. 2023. Ukraine: Impact of the war on agricultural enterprises – Findings of a nationwide survey of agricultural enterprises with land up to 250 hectares, January–February 2023. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc5755en>
4. Ґрунтовий покрив України в умовах воєнних дій: стан, виклики, заходи з відновлення: монографія; за ред. С. А. Балюка, А. В. Кучера, М. І. Ромашенка. Київ: Аграрна наука, 2024. 340 с. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-612-9>
5. Kussul N., Drozd S., Yailymova H., Shelestov A., Lemoine G., Deininger K. Assessing damage to agricultural fields from military actions in Ukraine: An integrated approach using statistical indicators and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023. Vol. 125. Art. 103562. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103562>
6. CEOBS. Environmental impacts of the war in Ukraine/ CEOBS. London: CEOBS, 2022. URL: <https://ceobs.org/environmental-impacts-of-the-war-in-ukraine/>
7. Bonchkovskiy O., Ostapenko P., Bonchkovskiy A., Shvaiko V. War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 964. Art. 178594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>
8. European Commission. Joint Research Centre. Soil degradation under conflict conditions / European Commission, Joint Research Centre. — Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2022. 136 с. (JRC Report). Retrieved from <https://publications.jrc.ec.europa.eu>
9. Akymenko K., Petrenko O., Shevchenko I. Detection of abandoned arable land using Sentinel-2. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025. Vol. 210. Art. 105487. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.105487>
10. Filippini F. Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. *Proceedings of the 3rd International Electronic Conference on Remote Sensing (ECRS-3)*. 2019. Vol. 18. Is. 1. Art. 11. <https://doi.org/10.3390/ECRS-3-06201>
11. Minasny B., McBratney A. Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*. 2016. Vol. 264. P. 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.05.015>
12. McBratney A. B., Mendonça Santos M. L., Minasny B. On digital soil mapping. *Geoderma*. 2003. Vol. 117(1–2). P. 3–52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
13. ReSoil Foundation. How war is contributing to environmental degradation in Ukraine. *ReSoil Foundation*. London: 2025. URL: <https://resoilfoundation.org/en/environment/ukraine-war-contaminated-soil/>
14. Hengl T., Nussbaum M., Wright M. N., Heuvelink G. B. M., Gräler B. Random Forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables. *PeerJ*. 2018. Vol. 6. e5518. <https://doi.org/10.7717/peerj.5518>
15. Senel G., Dadhich G., Ostapenko P., Bonchkovskiy O., Shvaiko V., Ostapenko S., Lucas T.A., ... Henry, M. Mapping impacted soils of war-affected farmers in Kharkiv Oblast – Impact assessment of agricultural land 2021–2023. Rome, FAO. 2025. <https://doi.org/10.4060/cd6127en>
16. Соловей В. Б., Залавський Ю. В., Лебедь В. В., Солоха М. О., Кучер А. В. Методичні засади картографування наслідків мілітарної деградації ґрунтів на рівні територіальних громад. *Український географічний журнал*. 2024. № 4. С. 22–35. <https://doi.org/10.15407/ugz2024.04.022>
17. European Environment Agency. Soil monitoring in Europe - Indicators & thresholds for soil health assessments. European Environment Agency, 2023. 80 p. (EEA Report). URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/soil-monitoring-in-europe>
18. Оцінювання впливу збройної агресії на стан чорноземних ґрунтів і заходи з його відновлення: моногр.; за ред. С. А. Балюка, А. В. Кучера. Київ: Аграрна наука, 2025. 240 с. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-641-9>

UDC 631.4:504.61:335.01:528.9:004.92

Features of mapping military-degraded soils at the national and regional levels

Yu. V. Zalavskiy^a, V. V. Lebed^b

National Scientific Center “Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky”,
Kharkiv, Ukraine

✉ yurazz1984@gmail.com

ORCID: ^a0000-0002-4549-963X ; ^b0000-0002-1429-4121

Received 26.11.2025; Revised 20.12.2025; Accepted 26.12.2025; Available online 30.12.2025

Abstract. The results of the analysis of the features of mapping militarily degraded soils at the national and regional levels in Ukraine in the context of a full-scale war are presented. Soil degradation includes mechanical damage, compaction due to vehicle movement, formation of explosive craters, and local accumulation of heavy metals and detonation residues. The

main difference between national and regional maps lies in scale, detail, accuracy, and mapping purpose: national maps generalize spatial trends of soil degradation, whereas regional maps provide detailed information on specific types, degrees, and mechanisms of damage. A significant part of the de-occupied territories cannot be surveyed due to mine and drone hazards. Compared to pre-war soil degradation studies, modern research relies much more on remote methods due to safety constraints. The study emphasizes digital mapping methods, including geographic information systems (GIS), remote sensing of the Earth (RSE), and digital soil mapping (DSM). The authors assess the potential of medium- and high-resolution satellite data (Sentinel-2, Landsat, Sentinel-1 SAR) combined with field observations for quantitative evaluation of soil degradation. Results of creating national-scale digital maps with estimates of degraded soil areas for 2023–2025 are presented, along with regional maps using Kharkiv Oblast and a specific local community as examples. The area of militarily degraded soils doubled over this period, and the range of damage types expanded. The most affected are Black soils about 70%. The authors emphasize that integrated approaches combining RSE, GIS, and field validation, as well as standardization of methodologies, legends, and data systems, are essential for effective monitoring of militarily degraded soils at various territorial levels.

Keywords: soil; military degradation; mapping; GIS; digital soil mapping; remote sensing.

Citing: Zalavskiy Yu. V., & Lebed V. V. (2025). Features of mapping military-degraded soils at the national and regional levels. *AgroChemistry and Soil Science*, 99, 49–63. doi: 10.31073/acss99-06 [in Ukrainian].

References

1. Solovei, V., Lebed, V., & Zalavskiy, Yu. (2025). Genetic aspects of militaristic soil degradation in Ukraine // *Caring for soils in war and peace: status, monitoring and management* : collection of abstracts of the International Scientific & Practical Conference (Kharkiv, December 5, 2024). Kharkiv: NSC ISSAR. Retrieved from <http://www.issar.com.ua/uk/vydannya>
2. Smirnova, K., Baliuk, S., Kucher, A., Vorotyntseva, L., & Honcharova, A. (2024). Ecological and toxicological condition of militarily degraded chernozems: A case study of the Chkalovsk territorial community. *Scientific Horizons*, 27(11), 90-104. <https://doi.org/10.48077/scihor11.2024.90> [in Ukrainian].
3. FAO. (2023). Ukraine: Impact of the war on agricultural enterprises – Findings of a nationwide survey of agricultural enterprises with land up to 250 hectares, January–February 2023. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc5755en>
4. Baliuk, S. A., Kucher, A. V. & Romashchenko, M. I. (Eds.). (2024). *Soil cover of Ukraine in the conditions of hostilities: state, challenges, activities for soil restoration*: monograph. Kyiv: Agrarna nauka. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-612-9> [in Ukrainian].
5. Kussul, N., Drozd, S., Yailymova, H., Shelestov, A., Lemoine, G., & Deininger, K. (2023). Assessing damage to agricultural fields from military actions in Ukraine: An integrated approach using statistical indicators and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125, 103562. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103562>
6. CEOBS. (2022). Environmental impacts of the war in Ukraine / CEOBS. London: CEOBS, 2022. Retrieved from <https://ceobs.org/countries/ukraine/>
7. Bonchkovskiy, O., Ostapenko, P., Bonchkovskiy, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of the Total Environment*, 964, 178594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>
8. European Commission. Joint Research Centre. (2022). Soil degradation under conflict conditions / European Commission, Joint Research Centre. — Luxembourg : Publications Office of the European Union, (JRC Report). Retrieved from <https://publications.jrc.ec.europa.eu>
9. Akymenko, K., Petrenko, O., & Shevchenko, I. (2025). Detection of abandoned arable land using Sentinel-2. *Computers and Electronics in Agriculture*, 210, 105487 <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.105487>
10. Filipponi, F. (2019). Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. *Proceedings of the 3rd International Electronic Conference on Remote Sensing (ECRS-3)*, 18(1), 11. <https://doi.org/10.3390/ECRS-3-06201>
11. Minasny, B., & McBratney, A. (2016). Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*, 264, 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.05.015>
12. McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1–2), 3–52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
13. ReSoil Foundation. (2025). How war is contributing to environmental degradation in Ukraine. *ReSoil Foundation*. London. Retrieved from <https://resoilfoundation.org/en/environment/ukraine-war-contaminated-soil/>
14. Hengl T, Nussbaum M, Wright M. N, Heuvelink G. B. M., & Gräler, B. (2018). Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables. *PeerJ*, 6:e5518. <https://doi.org/10.7717/peerj.5518>
15. Senel, G., Dadhich, G., Ostapenko, P., Bonchkovskiy, O., Shvaiko, V., Ostapenko, S., ... & Henry, M. (2025). In *Mapping impacted soils of war-affected farmers in Kharkiv Oblast : Impact assessment of agricultural land 2021–2023*. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cd6127en>
16. Solovei, V. B., Zalavskiy, Yu. V., Lebed, V. V., Solokha, M. O., & Kucher, A. V. (2024). Methodological basis for mapping the consequences of military soil degradation at the level of the territorial community. *Ukrainian Geographical Journal*, 4, 22–35. <https://doi.org/10.15407/ugz2024.04.022> [in Ukraine].
17. European Environment Agency. (2023). Soil monitoring in Europe – Indicators & thresholds for soil health assessments. (EEA Report). Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/publications/soil-monitoring-in-europe>
18. Baliuk, S. A. & Kucher, A. V. (Eds.). (2025). *Assessment of the impact of armed aggression on the state of black soils and measures for its restoration*: monograph; Kyiv: Agrarna nauka, <https://doi.org/10.31073/978-966-540-641-9> [in Ukraine].

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЛОДИХ УЧЕНИХ STUDY OF YOUNG SCIENTISTS

УДК 631.445.2:631.465:631.86(477.82)

Вплив органічних систем удобрення на ферментативну активність дерново-підзолистого ґрунту¹

О. О. Шовкун

Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 28.10.2025 Отримано після доопрацювання 08.12.2025 Затверджено до видання 26.12.2025 Доступно онлайн 30.12.2025 <i>Ключові слова:</i> дерново-підзолистий ґрунт; ферментативна активність; дегідрогеназа; поліфенолоксидаза; інвертаза; органічне добриво; сидерат	Дослідження ферментативної активності ґрунтів є важливим інструментом для оцінювання їхнього екологічного стану та родючості, оскільки ферменти виступають чутливими індикаторами біологічних процесів трансформації органічної речовини. Особливого значення це набуває для дерново-підзолистих ґрунтів (Albic Arenosols) Західного Полісся, які характеризуються низьким умістом гумусу, підвищеною кислотністю та нестабільністю поживного режиму. Оптимізація систем удобрення в таких умовах є одним із ключових завдань для забезпечення сталого землеробства. У статті представлено результати вивчення впливу різних систем удобрення у чотирьох варіантах польового досліді (гній, сидерат, їх поєднання і без удобрення) на активність основних ґрунтових ферментів — дегідрогенази, поліфенолоксидази та інвертази. Дослідження проведено у багаторічному польовому досліді, закладеному у 1990 р. на дерново-слабопідзолистому глинисто-піщаному ґрунті на території Волинської державної сільськогосподарської дослідної станції ІСГ Західного Полісся НААН України. Сівозміна після другої реконструкції включає чотири культури: однорічні трави, озиме жито, кукурудза на силос та овес. Активність ферментів визначали за стандартизованими методиками (ДСТУ 7928:2015, ДСТУ 7929:2015) і методом Хазієва. Результати показали, що загальний рівень ферментативної активності дерново-підзолистого ґрунту залишається відносно низьким, однак комбінація гною та сидератів сприяла найвищим показникам ферментативної активності, що свідчить про активізацію мікробіологічних і гуміфікаційних процесів, посилення кругообігу органічних речовин та зміни біологічних характеристик ґрунту. Здобуті результати підтверджують важливість поєднаного використання органічних добрив і сидератів для підвищення біологічної активності та родючості ґрунтів Полісся.

✉ as131296123@gmail.com

ORCID: 0009-0008-4350-1071

Форма цитування: Шовкун О. О. Вплив органічних систем удобрення на ферментативну активність дерново-підзолистого ґрунту. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків: 2025. Вип. 99. С. 64–69. doi: 10.31073/acss99-07

1. Вступ

Якість ґрунту — це поєднання його хімічних, фізичних та біологічних характеристик, які дозволяють виконувати широкий спектр функцій. Вона залежить від біології ґрунту, в якій мікроорганізми відіграють активну роль у його родючості та живленні рослин завдяки ферментативній активності, розкладанню органічних речовин та кругообігу поживних речовин.

Використання біоіндикаторів, таких як активність ґрунтових ферментів, є ефективним інструментом моніторингу стану ґрунту та оцінювання впливу органічних добрив, зокрема гною [1].

Ферментативна активність ґрунту є потужним біоіндикатором його родючості та біологічного стану, оскільки ферменти каталізують ключові реакції, що забезпечують кругообіг поживних речовин, трансформацію органічної речовини та процеси гуміфікації. Зокрема, дегідрогеназа відповідає за загальний окисно-

¹ Науковий керівник — д-р с.-г. наук, професор Є. В. Скрильник

відновний потенціал ґрунту та активність мікроорганізмів, поліфенолоксидаза бере участь у розкладанні фенольних сполук і лігніну, сприяючи утворенню проміжних продуктів, необхідних для синтезу гумусових речовин, а також відіграє важливу роль у стабілізації органічної речовини. Інвертаза каталізує гідроліз сахарозних сполук, забезпечуючи мікроорганізми легкодоступними вуглецевими джерелами енергії та підтримуючи загальну мікробіологічну активність ґрунту.

Дослідження показують, що у межах органічних систем землеробства, де застосовують органічні або ферментовані компостні добрива, активність зазначених ферментів істотно вища порівняно з мінеральними системами удобрення. Таке підвищення ферментативної активності свідчить про активізацію мікробіоценозу, збільшення кількості рухомих форм поживних елементів та стабілізацію гумусового стану ґрунту, що позитивно впливає на його продуктивність та здатність до саморегуляції [2].

У дерново-слабопідзолистих ґрунтах Західного Полісся, зазвичай зв'язно-піщаних, застосування ферментованих органічних добрив у сівозміні «картопля—овес—люпин» сприяло стабілізації гумусового стану, збільшенню вмісту рухомих форм поживних елементів та активації мікробіоценозу, що позитивно позначилося на ферментативній активності ґрунту [2].

Істотні зміни активності досліджуваних ферментів у дерново-підзолистому ґрунті викликає внесення навіть невисоких доз добрив. Так, норма внесення NPK 60 кг/га на фоні сидерації сприяє зростанню дегідрогеназної та інвертазної активностей ґрунту в 1,4–2,3 раза, що зумовлює формування більш сприятливого трофічного режиму ґрунту та поступове підвищення його родючості [3].

Досліджено, що комбіноване застосування вапнування та внесення органічних і мінеральних добрив стимулює накопичення гумінових кислот у дерново-підзолистому ґрунті, що опосередковано підтримує активність ключових ферментів, пов'язаних із органічним обміном і біологічною активністю ґрунту [4, 5].

У сучасних дослідженнях вплив органічних та біологічних систем удобрення на родючість і стан ґрунтів акцентується на органіці, біодеструкторах та сидератах. Це підтверджено польовими даними з досліджень на дерново-підзолистих ґрунтах, які демонструють підвищення продуктивності, вмісту гумусу та посилення мікробної активності саме за біологізованих систем удобрення [6, 7].

Таким чином, накопичені наукові дані свідчать, що застосування органічних та органо-мінеральних добрив і біопрепаратів на дерново-підзолистих ґрунтах є ефективним інструментом підвищення ферментативної активності, гумусового стану та загальної родючості. Це формує обґрунтовану мотивацію для дослідження ферментативної активності цих ґрунтів за різних систем удобрення.

2. Об'єкт і методи

Дослідження проводили у багаторічному польовому досліді, закладеному у 1990 р. на території Волинської державної сільськогосподарської дослідної станції Інституту сільського господарства Західного Полісся НААН України, що розташована в селищі Рокині Луцького району Волинської області, у природно-кліматичній зоні Полісся. Район досліджень характеризується помірно континентальним кліматом із середньорічною температурою повітря +7,3 °С та середньорічною кількістю опадів 600–650 мм, з яких 65–70 % припадає на теплий період року [7].

Ґрунтовий покрив дослідної ділянки представлено дерново-слабопідзолистим глинисто-піщаним ґрунтом (Albic Arenosols), який характеризується невисоким вмістом гумусу (1,14–1,41 %), кислою реакцією

ґрунтового розчину (рН_{сол} 6,2–7,0) і середнім рівнем забезпеченості рухомими формами елементів живлення.

Для дослідження ферментативної активності ґрунту обрано чотири варіанти досліду: 1 — без добрив; 2 — гній 10 т/га; 3 — гній 10 т/га + сидерат; 4 — сидерат.

Розмір обстежуваної ділянки — 76,5 м². Відбір проб ґрунту здійснювали в травні 2023 року із шару 0–20 см за допомогою бурового зонда. Проби ґрунту з кожної ділянки об'єднували формуючи середній зразок, який, після транспортування, очищали від рослинних решток і висушували до повітряно-сухого стану.

Активність дегідрогенази визначали відповідно до вимог ДСТУ 7929:2015²; метод ґрунтується на відновленні 2,3,5-трифенілтетразолію хлориду з утворенням трифенілформазану (ТФФ). Результат виражали у мг ТФФ на 100 г ґрунту за 24 год, що характеризує загальну біологічну активність ґрунтової мікрофлори.

Активність поліфенолоксидази оцінювали за ДСТУ 7928:2015³ методом окиснення пірокатехіну з подальшим визначенням утвореного 1,4-п-бензохінону. Результат подавали у мг на 100 г ґрунту за 1 год, що відображає здатність ґрунту до трансформації фенольних сполук.

Активність інвертази визначали модифікованим колориметричним методом Ф. Х. Хазієва, що базується на кількісному визначенні глюкози, яка утворюється під час гідролізу сахарози. Активність виражали у мг глюкози на 1 г ґрунту за 24 год [8], що дозволяє оцінити потенціал ґрунту стосовно розщеплення вуглеводів.

Сидератом у досліді слугувала сільськогосподарська культура «пелюшка олійна», яка цінується за скоростиглість (одна з найвищих серед бобових), що дає можливість використовувати її у проміжних посівах (перед озимими або після озимих і ранніх ярових зернових та овочів). Після розкладання в ґрунті біомаса стає добривом, яке легко засвоюють рослини. Завдяки бульбочковим бактеріям, які розвиваються на коренях, пелюшка олійна видобуває з повітря азот і накопичує його. Заглиблена біологічна маса рослин дренує ґрунт, підвищує його повітря- і вологоємність, поліпшує стан структури. Тим самим поліпшує умови життєдіяльності черв'яків і ґрунтових мікроорганізмів, а під час і після розкладання служить їм поживою. Все це призводить до зменшення захворюваності рослин і підвищення врожайності [9].

3. Результати досліджень

Ферментний пул ґрунту є складним комплексом ферментів різного походження, які надходять із мікроорганізмів, рослин та ґрунтової фауни. На його активність впливають численні фактори, що можуть як стимулювати, так і пригнічувати біохімічні процеси, фізико-хімічні властивості ґрунту, рівень кислотності [4, 7].

Сидерати можуть підтримувати сільськогосподарське виробництво, зберігати біорізноманіття та пом'якшувати деградацію ґрунту, спричинену тривалим застосуванням хімічних добрив. Крім того, застосування сидератів може покращити здоров'я ґрунту завдяки підвищенню його біологічної активності [10].

Одним із загальноприйнятих біохімічних індикаторів екологічного стану ґрунту є його дегідрогеназна активність, яка слугує показником наявності в ґрунті органічних решток і свідчить про інтенсивність дегідрування органічної речовини та фізіологічну активність мікробного пулу ґрунту [11].

² ДСТУ 7929:2015. Якість ґрунту. Визначення активності ґрунтового ферменту дегідрогенази фотоелектроколориметричним методом [Чинний від 2016-09-01]. Київ, 2016. 11 с.

³ ДСТУ 7928:2015. Якість ґрунту. Визначення активності ґрунтового ферменту поліфенолоксидази фотоелектроколориметричним методом [Чинний від 2016-09-01]. Київ, 2016. 11 с.

Активність дегідрогенази в орному шарі ґрунту (0–20 см) є істотно вищою на варіантах застосування систем удобрення, що поєднують внесення гною та сидератів, порівняно з контролем (Табл.). Це свідчить про більш високий рівень мікробіологічної активності та інтенсивності процесів мінералізації органічної речовини. Аналогічні результати отримано й іншими дослідниками, які зазначають, що підвищена дегідрогеназна активність спостерігається переважно у ґрунтах із значними надходженнями свіжих органічних решток, зокрема рослинних, що характеризуються вузьким відношенням вуглецю до азоту (C : N). У такому разі у ґрунті створюються оптимальні умови для розвитку мікробної біоти, активізуються процеси дихання та окисно-відновні реакції, що, своєю чергою, сприяє підвищенню біологічної складової родючості дерново-підзолистого ґрунту.

Таблиця

Ферментативна активність дерново-підзолистого ґрунту за різних систем удобрення

Варіант	Поліфенолоксидаза, мг 1,4-п-бензохінону в 100 г ґрунту за 1 годину	Дегідрогеназа, мг ТФФ у 100 г ґрунту за 24 години	Інвертаза, мг глюкози в 1 г ґрунту за 24 години
Без добрив (контроль)	370,00	26,25	0,92
Гній 10 т/га	396,85	34,69	1,12
Гній 10 т/га + сидерат	430,00	39,83	1,14
Сидерат	385,00	31,88	1,12
НІР 0,5	50,77	11,71	0,06

Ґрунтовий фермент поліфенолоксидаза бере участь у формуванні гумусових речовин і є показником, за яким оцінюють інтенсивність окиснювальних процесів конденсаційного синтезу. Найнижчий рівень поліфенолоксидазної активності зафіксовано у варіанті без добрив — 370,0 мг 1,4-п-бензохінону на 100 г ґрунту за 24 год, а також у варіанті із застосуванням лише сидерату — 385,0 мг/100 г. Це свідчить про відносне переважання процесів мінералізації органічної речовини над гуміфікаційними, що характерно для ґрунтів із недостатнім надходженням легкодоступного вуглецю. Натомість внесення органічних добрив у вигляді гною в дозі 10 т/га в поєднанні з сидератом зумовило найвищу активність поліфенолоксидази. Такий результат відображає активацію процесів полімеризації фенольних сполук і синтезу гумінових кислот, тобто посилення гуміфікації органічної речовини. Подібні закономірності відзначаються й у дослідженнях, проведених на чорноземах і сірих лісових ґрунтах, де застосування органічних добрив стимулює утворення стійких гумусових сполук і сприяє поліпшенню структурно-агрегатного стану ґрунту [5, 12].

Інвертаза каталізує гідроліз сахарози на глюкозу та фруктозу — прості цукри, які легко засвоюються мікроорганізмами і кореневими системами рослин, забезпечуючи їх доступним джерелом енергії. Наші дослідження показали істотне підвищення інвертазної активності за використання різних систем удобрення порівняно з контрольним (без удобрення) варіантом досліду, що свідчить про посилення мікробіологічних процесів у ґрунті. Найвищу активність інвертази відзначено у варіанті з внесенням гною в поєднанні з сидератом — 1,14 мг глюкози/г ґрунту за 24 год, тоді як на контролі цей показник становив лише 0,92 мг. Це підтверджує наявність прямолінійної залежності між активністю інвертази, дегідрогенази та вмістом гумусу в дерново-підзолистому ґрунті, сформульовану іншими авторами [8]. Така закономірність зумовлена тим, що підвищений рівень органічної речовини створює сприятливі умови для розвитку мікрофлори, яка продукує гідролітичні ферменти. Подібні результати отримано й при вивченні агроценозів Західного Полісся, де комбіноване застосування органічних добрив і

сидератів забезпечувало вищу ферментативну активність порівняно з їх окремим використанням, сприяючи активнішому кругообігу органічного вуглецю та зростанню родючості дерново-підзолистого ґрунту [6].

Отже, здобуті нами дані свідчать, що органічні системи удобрення, у яких поєднано внесення гною та вирощування сидератів, забезпечують найвищий рівень ферментативної активності дерново-підзолистого ґрунту. Така система сприяє балансу між мінералізацією й гуміфікацією органічної речовини, що в довгостроковій перспективі позитивно впливає на гумусовий стан і загальну родючість ґрунтів Полісся. Підвищення активності дегідрогенази, поліфенолоксидази та інвертази свідчить про активізацію мікробіологічних і гуміфікаційних процесів, посилення кругообігу органічної речовини та зростання біологічної родючості ґрунту.

4. Висновки

За умов тривалого (35 років) застосування різних систем удобрення дерново-підзолистий ґрунт Західного Полісся зберігає загалом невисокий рівень ферментативної активності, що зумовлено його природними властивостями — кислою реакцією середовища, низьким вмістом гумусу та слабкою буферністю. Водночас використання органічних систем удобрення, особливо поєднання гною з сидератами, істотно підвищує активність основних ферментів — дегідрогенази, поліфенолоксидази та інвертази порівняно з неудобреним варіантом. Це свідчить про активізацію мікробіологічних процесів, посилення гуміфікації та формування стабільних гумусових сполук.

Найвищі значення ферментативної активності спостерігали саме у варіанті «гній + сидерат», що відображає синергійний ефект органічних добрив, які забезпечують збалансоване надходження вуглецевих і поживних сполук. Отже, комбіновані органічні системи удобрення сприяють відновленню біологічної активності дерново-підзолистих ґрунтів.

Список використаних джерел

1. Antonious G. F., Turley E. T., Dawood M. H. Monitoring Soil Enzymes Activity before and after Animal Manure Application. *Agriculture*. 2020. Vol. 10, No. 5. Art. 166. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050166>
2. Єгоров О. В., Жидок Н. П., Грищенко О. М., Шабанова І. І. Вплив добрив на показники родючості дерново-підзолистих ґрунтів та продуктивність короткоротаційних сівозмін Полісся. *Агроекологічний журнал*. 2021. № 3. С. 119–126. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2021.240329>
3. Чебанова В. В., Мірошніченко М. М. Зрушення біохімічної активності ґрунту за систематичного удобрення в різних ґрунтово-кліматичних умовах. *Агрохімія і ґрунтознавство міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ ІГА. Харків*, 2018. Спецвип. до XI з'їзду ґрунтознавців та агрохіміків України (17–21 вер. 2018 р., м. Харків). Кн. 2. С. 318–319.
4. Дацько М. О. Зміна вмісту і запасів гумусу дерново-підзолистого осушуваного ґрунту за різних систем удобрення. *Вісник аграрної науки*. 2016. № 8. С. 63–66. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2016_8_14
5. Скрильник Є. В., Кутова А. М., Гетманенко В. А., Герасименко Я. О. Вплив систем удобрення на кількісний і якісний склад гумусу дерново-підзолистого ґрунту. *Вісник аграрної науки*. 2020. № 8. С. 14–19. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202008-02>
6. Потапенко Л. В., Горбаченко Н. І. Вплив систем удобрення і мікробних препаратів на формування поживного режиму дерново-підзолистого ґрунту. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2021. № 34. С. 53–60. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.34.53-60>
7. Савчук О. І., Приймачук Т. Ю., Кошицька Н. А., Штанько Т. А., Меша К. В. Родючість осушуваного дерново-підзолистого ґрунту в органічній сівозміні. *Вісник аграрної науки*. 2024. № 3. С. 67–73. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202403-10>
8. Хазієв Ф. Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 1976. 189 с.
9. Цицюра Я. Г., Неїлик М. М., Дідур І. М., Поліщук М. І. Сидерація як базова складова біологізації сучасних систем землеробства : монографія. Вінниця: Видавець ТОВ «Друк», 2022. 770 с. URL: <https://repository.vsau.gov/getfile.php/31996.pdf>
10. Asghar W., Kataoka R. Green manure incorporation accelerates enzyme activity, plant growth, and changes in the fungal community of soil. *Archives of Microbiology*. 2022. Vol. 204(1). P. 7. <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02614-x>
11. Чебанова В. В. Динаміка ферментативної активності чорнозему типового за використання різних видів добрив. *Екологічні науки*. 2019. Вип. 1(24). Т. 1. С. 82–86. <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-1-24-1-14>

12. Центилю Л. В. Ферментативна активність чорнозему типового залежно від основного обробітку ґрунту і удобрення. *Подільський вісник*. 2019. № 30. С. 66–71.
URL: https://journals.pdu.khmelniyskiy.ua/index.php/podilian_bulletin/article/view/130

UDC 631.445.2:631.465:631.86(477.82)

Effect of organic fertilization systems on the enzymatic activity of sod-podzolic soil

O. O. Shovkun

National Scientific Center “Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky”,
Kharkiv, Ukraine

✉ as131296123@gmail.com

ORCID: 0009-0008-4350-1071

Received 28.10.2025; Revised 08.12.2025; Accepted 26.12.2025; Available online 30.12.2025

Abstract. The study of soil enzymatic activity is an important tool for assessing its ecological condition and fertility, as enzymes serve as sensitive indicators of biological processes involved in the transformation of organic matter. This is especially relevant for sod-podzolic soils of the Western Polissia region, which are characterized by low humus content, increased acidity, and unstable nutrient regimes. Optimizing fertilization systems under such conditions is one of the key tasks for ensuring sustainable agriculture. The article presents the results of studying the effect of different fertilization systems (manure, green manure crops, and their combination) on the activity of the main soil enzymes—dehydrogenase, polyphenol oxidase, and invertase. The research was conducted in a long-term field experiment established in 1990 at the Volyn State Agricultural Research Station of the Institute of Agriculture of the Western Polissia of NAAS of Ukraine. After the second reconstruction, the crop rotation includes four crops: annual grasses, winter rye, silage maize, and oats. Enzyme activity was determined using standardized methods (DSTU 7928:2015, DSTU 7929:2015, Haziev's method). The results showed that the overall level of enzymatic activity in sod-podzolic soil remains relatively low; however, the combination of manure and green manure crops contributed to the highest enzymatic activity values. This indicates the activation of microbiological and humification processes, an enhanced cycle of organic matter, and changes in the biological properties of the soil. The obtained results confirm the importance of combined use of organic fertilizers and green manure crops for improving biological activity and increasing soil fertility in the Polissia region.

Keywords: soil enzymatic activity, sod-podzolic soil, dehydrogenase, polyphenol oxidase, invertase, organic fertilizers, green manure.

Citing: Shovkun, O. O. (2025). Effect of organic fertilization systems on the enzymatic activity of sod-podzolic soil. *AgroChemistry and Soil Science*, 99, 64–69. doi: 10.31073/acss99-07 [in Ukrainian].

References

1. Antonious, G. F., Turley, E. T., & Dawood, M. H. (2020). Monitoring soil enzyme activity before and after animal manure application. *Agriculture*, 10(5), 166. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050166>
2. Yehorov, O. V., Zhydok, N. P., Hryshchenko, O. M., & Shabanova, I. I. (2021). Influence of fertilizers on fertility indicators of sod-podzolic soils and productivity of short-rotation crop rotations in Polissia. *Agroecological Journal*, 3, 119–126. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2021.240329> [in Ukrainian].
3. Chebanova, V. V., & Miroshnychenko, M. M. (2018). Shifts in biochemical activity of soil under systematic fertilization in different soil-climatic conditions (pp. 318–319). In *Agrochemistry and Soil Science*. Special Issue. Proceeding of the XI Congress of Soil Scientists and Agrochemists of Ukraine, Vol. 2. ISSAR, Kharkiv. [in Ukrainian].
4. Datsko, M. O. (2016). Changes in the content and stocks of humus in drained sod-podzolic soil under different fertilization systems. *Bulletin of Agricultural Science*, 8, 63–66. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2016_8_14 [in Ukrainian].
5. Skrylnyk, Ye. V., Kutova, A. M., Hetmanenko, V. A., & Herasymenko, Ya. O. (2020). Influence of fertilization systems on the quantitative and qualitative composition of humus in sod-podzolic soil. *Bulletin of Agricultural Science*, 8, 14–19. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202008-02> [in Ukrainian].
6. Potapenko, L. V., & Horbachenko, N. I. (2021). Influence of fertilization systems and microbial preparations on the formation of the nutrient regime of sod-podzolic soil. *Agricultural Microbiology*, 34, 53–60. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.34.53-60> [in Ukrainian] [in Ukrainian].
7. Savchuk, O. I., Prymachuk, T. Yu., Koshytska, N. A., Shtanko, T. A., & Mesha, K. V. (2024). Fertility of drained sod-podzolic soil in an organic crop rotation. *Bulletin of Agricultural Science*, 3, 67–73. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202403-10> [in Ukrainian].
8. Khaziev, F. Kh. (1976). *Methods of soil enzymology*. Moscow: Nauka. [in Russian].
9. Tsytsiura, Ya. H., Neilyk, M. M., Didur, I. M., & Polishchuk, M. I. (2022). *Green manuring as a basic component of the biologization of modern farming systems* (Monograph). Vinnytsia: Druk Publishing. <https://repository.vsau.org/getfile.php/31996.pdf> [in Ukrainian].
10. Asghar, W., & Kataoka, R. (2022). Green manure incorporation accelerates enzyme activity, plant growth, and changes in the fungal community of soil. *Archives of Microbiology*, 204(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02614-x>
11. Chebanova, V. V. (2019). Dynamics of enzymatic activity of typical chernozem under the use of different types of fertilizers. *Ecological Sciences*, 1(24)(1), 82–86. <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-1-24-1-14> [in Ukrainian].
12. Tsentylo, L. V. (2019). Enzymatic activity of typical chernozem depending on primary tillage and fertilization. *Podilian Bulletin*, 30, 66–71. https://journals.pdu.khmelniyskiy.ua/index.php/podilian_bulletin/article/view/130 [in Ukrainian].

УДК 631.453:631.427.1(477.54)

Оцінка фітотоксичності орних ґрунтів Валківської громади за різними методичними підходами ¹

Ф. Ф. Коваль

Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 18.11.2025 Отримано після доопрацювання 08.12.2025 Затверджено до видання 26.12.2025 Доступно онлайн 30.12.2025	У статті обґрунтовано актуальність біотестування в оцінюванні екологічного стану ґрунту, зокрема шляхом визначення його фітотоксичності, як одного з найбільш чутливих та інформативних інтегрованих показників наявності токсичних компонентів у ґрунтового середовищі. Завдяки індикаторній функції цей показник використовують як для виявлення локальних осередків забруднення, так і для комплексного оцінювання загального рівня антропогенного навантаження на територію. Дослідженням охоплено два типи ґрунту — чорноземи типові (Haplic Chernozems) і чорноземи опідзолені (Chernic Phaeozems). Представлено результати визначення рівня фітотоксичності орних ґрунтів на території Валківської громади Харківської області з використанням двох методичних підходів — методу визначення ступеня забрудненості ґрунтів за способом Крайнюкова–Кривицької та інтегрованої методики фітотестування за Мірошніченком. Проби ґрунтів для тестування відбирали з орного шару (0–30 см). Для біотестування використовували насіння дводольних і однодольних рослин, яке пророщували впродовж 72 годин у водних витяжках із досліджуваних ґрунтів, а контрольний варіант — у дистильованій воді. Біоіндикаційні параметри визначали за морфометричними показниками проростків — довжиною пагонів та коренів, після чого розраховували різницю між довжиною у досліджуваних і контрольному варіантах, індекс пригнічення росту (I) та значення комплексних інтегрованих показників, передбачених обома методичними підходами. Шляхом порівняння ефективності двох методів, які відрізняються за принципами інтерпретації біоіндикаційних параметрів, визначено, що обидва підходи є подібними за характеристикою стану ґрунту. У підсумку зазначено, що поєднання двох методик дозволяє отримати більш повну та багатоконпонентну екологічну оцінку: спосіб Крайнюкова і Кривицької є придатним для швидкого експрес-аналізу та оперативної ідентифікації потенційно небезпечних ділянок, тоді як інтегрована методика фітотестування за Мірошніченком, завдяки більш широкому діапазону показників, забезпечує більш детальну характеристику фітотоксичності ґрунту. У сукупності дані свідчать про загалом задовільний стан ґрунтів Валківської громади з окремими проявами помірної фітотоксичності, що потребує регулярного моніторингу та подальшого аналізу можливих джерел впливу. За класифікацією ступеню токсичності у методі Крайнюкова–Кривицької більшість ґрунтів оцінено низьким або помірним рівнем токсичності, що свідчить про відсутність різко виражених локальних техногенних навантажень. За методикою Мірошніченка виявлено більш широкий діапазон варіацій параметрів інтегрованих індексів, що відображає реакцію рослин на комплексну дію факторів середовища, зокрема на загальну фітотоксичність. Зафіксовано відмінності між результатами оцінювання з використанням дводольних і однодольних культур, що підтверджує різну чутливість рослин до окремих типів токсикантів. Вказано на доцільність використання кількох тест-культур для більш об'єктивної оцінки стану ґрунтового середовища.
Ключові слова: фітотоксичність; фітотестування; індекс пригнічення росту; одnodольні; дводольні; Валківська громада; екологічний стан ґрунту.	

✉ kowalfdr@gmail.com

ORCID: 0009-0009-3667-2275

Форма цитування: Коваль Ф. Ф. Оцінка фітотоксичності орних ґрунтів Валківської громади за різними методичними підходами *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ «ІА ім. О. Н. Соколовського». Харків: 2025. Вип. 99. С. 70–82.
doi: 10.31073/acss99-08

1. Вступ

Збереження родючості ґрунтів є одним із ключових чинників сталого функціонування аграрного виробництва [1]. Стан ґрунтового покриву безпосередньо впливає на продуктивність агроєкосистем, а його деградація може призвести до зниження врожайності та викликати екологічний дисбаланс. Надмірне накопичення у ґрунтах залишків пестицидів, важких металів та інших токсикантів може зумовити істотне зниження врожайності, погіршення якості сільськогосподарської продукції й опосередковано загрожувати здоров'ю населення через трофічні ланцюги [2].

¹ Науковий керівник — д-р біол. наук, ст. н. сп. М. М. Мірошніченко

Одним із надійних біоіндикаторів екологічного стану ґрунту є його фітотоксичність — здатність завдавати шкоду стану рослин через наявність токсичних елементів або сполук [3] та з інших причин. Визначення рівня фітотоксичності ґрунту дозволяє оцінити не лише ступінь його забруднення, але й міру біологічної доступності токсикантів для рослин [4].

За даними сучасних досліджень, фітотоксичність ґрунту вважають інтегрованим показником екологічного стану ґрунтового середовища, що відображає сумарну дію антропогенних і природних факторів на біологічні об'єкти [5].

Особливості генетики та систематики ґрунтів також враховувалися у виборі тест-рослин та інтерпретації результатів фітотоксичності, що підвищує обґрунтованість порівняльної оцінки фітотоксичності за різними методичними підходами з урахуванням природних властивостей ґрунтів [6]. Порівняльний аналіз урбоземів і техногенних ґрунтів під час біотестування дає змогу оцінити антропогенний вплив на токсичність ґрунтів і розрізнити природні та штучні фактори [7]. Результати порівняльних досліджень стану ґрунтів у різних регіонах України підкреслюють необхідність регулярного моніторингу фітотоксичності для своєчасного виявлення деградаційних процесів [8].

Методичні підходи до оцінювання фітотоксичності ґрунту базуються на використанні тест-рослин для вирощування на досліджуваному ґрунті з подальшим вимірюванням фізичних параметрів проростків, визначенням їхньої біомаси та морфологічних змін [9]. Визначення фітотоксичності із використанням однодольних і дводольних рослин є доцільним, оскільки ці дві групи відрізняються морфологічними та фізіолого-біохімічними особливостями, що зумовлює різну чутливість до токсичних речовин. Дводольні рослини, характерні більш розгалуженою кореневою системою та широкою листковою пластинкою, ефективно виявляють ґрунтову та контактну токсичність, тоді як однодольні, із мичкуватою кореневою системою та високими темпами проростання, дозволяють швидко фіксувати гострий токсичний ефект і реагують на інший спектр забруднювачів. Поєднання цих тест-об'єктів забезпечує комплексність та репрезентативність оцінки, дозволяє врахувати селективність дії токсикантів і підвищує достовірність біотестування, що відповідає сучасним вимогам ґрунтово-біологічних досліджень [4].

Водночас низка дослідників наголошує на доцільності поєднання фітотестування з хімічним аналізом, що підвищує точність діагностики екотоксикологічного стану ґрунту [10]. За даними сучасних досліджень, рівень фітотоксичності визначають як інтегрований показник стану ґрунтового середовища, що відображає сумарну дію антропогенних і природних чинників [3].

Аналіз наявних методик фітотестування показує, що вони різняться за вибором тест-рослин, тривалістю експозиції, показниками оцінювання та критеріями інтерпретації результатів [11]. Так, різні види рослин мають неоднакову толерантність до конкретних токсикантів, що ускладнює зіставлення результатів і унеможливорює створення універсальної шкали токсичності [4]. З наведеного випливає, що метод визначення фітотоксичності ґрунту є перспективним, проте потребує адаптації до конкретних умов і комбінування з іншими методами оцінювання [12].

Мета статті — висвітлення результатів експерименту з визначення рівня фітотоксичності ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення Валківської територіальної громади у Харківській області за різними методичними підходами.

2. Методи дослідження

Було застосовано два різних методичних підходи. Перший підхід (А) ґрунтується на способі визначення ступеня забрудненості ґрунтів, запропонованому О. Крайнюковим та І. Кривицькою [2]. За цією методикою оцінювання фітотоксичності ґрунту проводиться шляхом визначення ступеня пригніченості росту тест-рослин у дослідному варіанті, як процент зниження довжини рослини відносно контролю, що дозволяє оцінити рівень токсичного навантаження на ґрунтове середовище.

Другий підхід (Б) розроблено відповідно до методики, описаної у науково-методичному виданні за редакцією М. Мірошніченка [3]. Метод базується на застосуванні двох типів тест-рослин — однодольних і дводольних — що дозволяє виявити видові відмінності у чутливості до токсикантів.

Основні характеристики обох застосовуваних методів аналітичного оцінювання ступеню фітотоксичності ґрунту коротко представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика застосованих методів визначення фітотоксичності ґрунту

Назва методу	Базовий принцип	Спосіб	Індикатор фітотоксичності
А Визначення ступеня забрудненості ґрунтів [2]	Визначення міри пригніченості (%) росту тест-рослин у дослідному варіанті відносно контролю	Насіння тест-рослин пророщують упродовж 72 годин у водній витяжці з досліджуваного ґрунту, а в контрольному варіанті — у дистильованій воді	Коефіцієнт токсичності ґрунту ($K_{гр}$), розрахований за різницею (%) довжини пагонів і коренів проростків порівняно з контролем
Б Визначення фітотоксичності ґрунту [3]	Інтегрована оцінка чутливості рослини за кількома морфометричними параметрами з використанням одно- і дводольних рослин		Інтегрований показник фітотоксичності (ІПФ), розрахований за 4-ма індексами (І) — схожості, енергії проростання, довжини кореня, довжини пагонів

Примітка: у цьому досліді індекси схожості та енергії проростання не враховували

Дослідженням охоплено два типи ґрунту — чорноземи типові (Haplic Chernozems) і чорноземи опідзолені (Chernic Phaeozems). У структурі ґрунтового покриву сільськогосподарських угідь Валківської громади Харківської області домінують чорноземи типові, які формують основну частку орних земель і визначають високий природний потенціал території. Чорноземи опідзолені трапляються значно рідше, утворюючи меншу частку ґрунтового масиву, переважно на ділянках із підвищеною зволоженістю та проявами слабого підзолистого процесу. Таке співвідношення узгоджується із структурою ґрунтового покриву Харківщини, де чорноземи типові становлять найбільшу частину ґрунтового покриву, а опідзолені — займають обмежені площі.

Проби ґрунту відбирали з орного шару (0–30 см) на 30-ти сільськогосподарських полях (об'єктах) території Валківської громади восени 2024 року, і на 4-х (31–34) — влітку 2025 р. Для відбирання використовували ручну лопату, що забезпечувала точне виділення ґрунту без порушення структури шару та дозволяла отримати репрезентативні проби для подальшого аналізу.

Схема відбирання проб була організована таким чином, щоб зібраний матеріал репрезентував різні типи агроєкосистем та відображав градації інтенсивності їх господарського використання: тип поля; історія його обробітку; вирощувана культура. Відбирання і підготовку проб до аналізування за обома методами здійснювали

відповідно до стандартів ДСТУ ГОСТ 17.4.3.01:2019² та ДСТУ ГОСТ 17.4.4.02:2019³, у яких регламентовано ці операції. Дотримання стандартних вимог гарантує репрезентативність проб і порівнянність результатів подальших біотестів. У процесі біотестування дотримувалися використання однорідного насіння, стандартних умов інкубації (пророщування) та порівняння результатів із контролем для кількісного визначення ступеня токсичності.

Біотестування за обома методами здійснювали із застосуванням насіння дводольної культури Гірчиця біла (*Sinapis alba*), яка характеризується високою чутливістю до токсичних елементів, та однодольної — ячменю (*Hordeum vulgare*). Насіння рослин пророщували у водних витяжках із ґрунтових проб, а в контрольному варіанті — у дистильованій воді, протягом 72 годин. Після інкубації вимірювали довжину пагонів і довжину кореневої системи. Основними тест-показниками виступають різниці між довжиною пагонів і коренів на тестовому і контрольному варіантах.

Ступінь фітотоксичності ґрунту у методі «А» визначали за коефіцієнтом забрудненості (токсичності) ґрунту (K_z), величину якого встановлювали відповідно до шкали оцінювання ступеня забрудненості через ступінь пригніченості росту, тобто, за різницею (%) довжини пагонів і коренів дослідних проростків порівняно з контролем [2]. Формула розрахунку виглядає так:

$$L = ((X_k - X_d)/X_k) \cdot 100,$$

де L — відношення довжини коренів/пагонів у досліді до контролю, %;

X_k — середнє арифметичне довжини коренів/пагонів у контролі, мм;

X_d — середнє арифметичне довжини коренів/пагонів у досліді, мм.

K_z визначали за шкалою оцінки якості ґрунту щодо забруднення (Табл. 2), де коефіцієнт «1,1» відповідає незабрудненому або екологічно безпечному ґрунту, у якому пригніченість ростових процесів не перевищує 20 %. Зі зростанням фітотоксичного ефекту величина коефіцієнта підвищується, що відображає погіршення екологічного стану ґрунтового середовища.

Таблиця 2

Класифікація якості ґрунту за ступенем забрудненості у методі А [2]

Клас якості ґрунту	Стан ґрунту за рівнем забрудненості	Рівень пригніченості ростових процесів (фітотоксичний ефект), L %	Ступінь забрудненості ґрунту, K_z
I	Незабруднений	0-20,0	1,1
II	Слабо забруднений	20,1-40,0	1,2
III	Помірно забруднений	40,1-60,0	1,3
IV	Брудний	60,1-80,0	1,4
V	Дуже брудний	80,1-100	1,5

У методі «Б» ступінь фітотоксичності ґрунту визначають за інтегрованим показником фітотоксичності (ІПФ), який інтегрує морфологічні та біофізіологічні показники росту рослин у єдиний критерій оцінки токсичності ґрунту. Формула для розрахунку ІПФ:

$$ІПФ = \sqrt[4]{I_c \times I_{en} \times I_k \times I_n}$$

де I_c — індекс схожості — відношення схожості насінин у дослідних варіантах до схожості у контрольному варіанті. Схожість — частка пророслих насінин (на 72-гу годину) від загальної кількості, %;

² ДСТУ ГОСТ 17.4.3.01:2019 (ГОСТ 17.4.3.01-2017, IDT) Охорона довкілля. Якість ґрунту. Загальні вимоги до відбирання проб. — [Втратив чинність з 01.01.2026]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 8 с. с.

³ ДСТУ ГОСТ 17.4.4.02:2019 Методи відбирання та підготування проб ґрунту для хімічного, бактеріологічного, гельмінтологічного аналізу [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/gost_17_4_3_01_2019/5-1-0-1845

I_{ep} — індекс енергії проростання — відношення енергії проростання насінин у дослідних варіантах до енергії проростання у контрольному варіанті. Енергія проростання — частка пророслих насінин (на 3-ю добу) від загальної кількості, %;

I_k — індекс довжини кореня — відношення довжини кореня (мм) у дослідних варіантах до довжини у контрольному варіанті;

I_p — індекс довжини пагона — відношення довжини пагона (мм) у дослідних варіантах до довжини у контрольному варіанті.

Однак, у нашому досліді індекси токсичності за показниками схожості та енергії проростання не враховано, оскільки їхній вплив на кінцевий результат було попередньо визначено статистично незначущим.

Градації ІПФ, що пропонуються методикою для визначення ступеню фітотоксичності ґрунту, наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Градації ступеню забруднення ґрунтів за інтегрованим показником фітотоксичності у методі Б [3]

Ступінь загальної фітотоксичності ґрунту	Інтегрований показник фітотоксичності, ІПФ
Фітотоксичність відсутня	>0,90
Слабкий	0,90-0,71
Середній	0,70-0,51
Сильний	0,50-0,31
Дуже сильний	0,30-0,16
Катастрофічний	<0,16

Таким чином, обидва методичні підходи спираються на єдину, біоіндикаційну основу — використання тест-рослин для оцінки токсичності ґрунтів, але різняться за принципами узагальнення результатів: перший орієнтується на відсоткове пригнічення росту, тоді як другий — на інтегровану оцінку чутливості за декількома морфометричними параметрами.

Визначення фітотоксичності проводили у відділі агрохімії імені акад. НААН Б. С. Носка ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського».

3. Результати та їх обговорення

3.1. Визначення фітотоксичності ґрунтів за методом А

Перед проведенням інтегрованої оцінки впливу ґрунтового середовища на тест-рослини було визначено фітотоксичність відібраних зразків за методом А, який базується на порівнянні морфометричних показників проростків у досліді та контролі. Для аналізу використовували дві групи тест-організмів — однодольні та дводольні рослини, що дало можливість комплексно оцінити чутливість різних типів культур до можливого токсичного впливу ґрунтів. У таблиці 4 наведено результати вимірювань довжини коренів і пагонів та розраховані коефіцієнти загальної фітотоксичності ($K_{зг}$) для кожного об'єкта дослідження.

Однодольні рослини. Біотестування, де як тест-культури використали однодольні рослини, показало, що у більшості досліджених проб (29 із 30) значення коефіцієнта фітотоксичності ($K_{зг}$) становили в середньому 1,1, що за класифікацією рівнів забрудненості за методом А (див. табл. 2) відноситься до категорії «незабруднений ґрунт» (різниця з контролем не перевищує 20 %). Це свідчить про відносно стабільний стан ґрунтового середовища та відсутність суттєвого негативного впливу на ріст і розвиток однодольних культур. Ці дані частково вже опубліковано раніше [13].

Таблиця 4

Показники фітотоксичності ґрунтів за методом А для однодольних і дводольних тест-рослин

№	Місце відбирання проб ґрунту (об'єкт)	Однодольні		Кзг'	Дводольні		Кзг'
		L, %			L, %		
		корені	пагони		корені	пагони	
1	ПСП "Маяк", поле 1	4,56	-10,79	1,1	-28,49	5,84	1,1
2	ПСП "Маяк", поле 2	4,45	5,62	1,1	-50,90	-31,43	1,1
3	ПСП "Маяк", поле 3	-26,29	-11,92	1,1	-51,01	-20,32	1,1
4	ФГ "Велес-В", поле 1	39,11	-10,06	1,2	-38,94	-37,94	1,1
5	ФГ "Велес-В", поле 2	36,58	3,92	1,2	-50,63	-46,77	1,1
6	ФГ "Марінда"	-20,92	-6,71	1,1	-29,48	-26,59	1,1
7	СВК "Дружба"	5,33	-14,86	1,1	-65,26	-25,78	1,1
8	ФГ "Колосок плюс"	-24,50	-0,71	1,1	-27,37	-53,14	1,1
9	С(Ф)Г "Пчелка", поле 1	-63,90	-14,74	1,1	-47,16	-24,13	1,1
10	С(Ф)Г "Пчелка", поле 2	17,15	5,17	1,1	-45,77	-49,81	1,1
11	Одноосібник	-12,06	-4,23	1,1	-34,89	1,11	1,1
12	ФОП "Коляда", поле 1	22,49	-2,05	1,2	-77,61	-77,73	1,1
13	ФОП "Коляда", поле 2	-80,55	-19,73	1,1	-52,79	-47,80	1,1
14	ФГ "Дорід"	-27,71	-13,92	1,1	-9,83	-44,87	1,1
15	ТОВ "Агрохол"	-38,23	-11,29	1,1	-10,77	-27,70	1,1
16	ФГ "Прогрес", поле 1	-73,74	-8,71	1,1	-65,35	-34,00	1,1
17	ФГ "Прогрес", поле 2	5,21	11,86	1,1	-21,74	-44,95	1,1
18	ПСП "Шарівка", поле 1	-23,70	-17,91	1,1	-55,23	-29,52	1,1
19	ПСП "Шарівка", поле 2	-16,94	-22,27	1,1	-47,80	-49,43	1,1
20	ТОВ "Омбілік", поле 1	-31,46	4,84	1,1	-34,17	-17,65	1,1
21	ТОВ "Омбілік", поле 2	-3,88	2,22	1,1	-9,76	-29,81	1,1
22	ТОВ "Омбілік", поле 3	33,73	15,47	1,2	-68,88	-37,90	1,1
23	ФГ "Кристина", поле 1	33,15	23,51	1,2	50,40	-28,38	1,3
24	ФГ "Кристина", поле 2	-52,79	-12,74	1,1	-61,00	-35,70	1,1
25	ФГ "Коваль"	0,89	-19,80	1,1	-29,40	-54,37	1,1
26	Одноосібник с. Литвинівка, поле 1	-49,88	-16,46	1,1	-53,42	-35,35	1,1
27	Одноосібник с. Литвинівка, поле 2	-28,22	-6,55	1,1	-18,70	-45,86	1,1
28	ФГ "Панасенко", поле 1	-12,15	9,40	1,1	-52,49	-44,27	1,1
29	ФГ "Панасенко", поле 2	29,30	15,96	1,2	-36,26	-54,74	1,1
30	ФГ "Панасенко", поле 3	5,20	5,56	1,1	-53,46	-35,65	1,1
31	Бараново	-43,06	-16,68	1,1			
32	Дружба, поле 1	-74,53	-0,10	1,1			
33	Дружба, поле 2	4,621	-4,623	1,1			
34	Огульчанське	-32,53	-18,04	1,1			

Примітка: L – відношення довжини коренів/пагонів у досліді до контролю, %;
Кзг' – коефіцієнт забруднення (фітотоксичності) ґрунту

Примітка: L – відношення довжини коренів/пагонів у досліді до контролю, %;

Кзг' – коефіцієнт забруднення (фітотоксичності) ґрунту

Виятком стала проба з об'єкта № 23 (поле №1 фермерського господарства «Кристина»), де спостерігали критично високий рівень фітотоксичності — 1,3, за якого довжина коренів проростків становила лише 50,4 % від контрольних значень. Такий рівень пригнічення розвитку рослин свідчить про наявність у ґрунті токсичних речовин у концентраціях, здатних значно впливати на рослинний покрив. Ймовірними джерелами локального забруднення є важкі метали, залишки агрохімікатів або пестицидів.

Дводольні рослини. Аналогічна оцінка для дводольних рослин показала, що більшість зразків ґрунту відповідали нормативам і відносилися до категорії «незабруднений ґрунт». Це свідчить про стабільний стан ґрунтового середовища на більшості обстежених територій та відсутність істотного негативного впливу землекористування на ріст і розвиток культурних рослин.

Разом із тим у шести пробах виявлено коефіцієнти фітотоксичності на рівні 1,2, що відповідає другому ступеню забруднення — «слабке забруднення» [2]. Це означає, що в окремих точках спостерігається концентрація токсичних компонентів, що перевищує природний фон, проте ще не створює критичної загрози для рослин. Такі ділянки потребують додаткового контролю та подальшого аналізу для встановлення джерел локального забруднення й запобігання його поширенню.

Висновки по результатах біотестування за методом А: порівняльний аналіз результатів для однодольних і дводольних культур засвідчив, що переважна більшість досліджених об'єктів у громаді знаходиться у безпечному для росту рослин стані, із переважно низьким рівнем фітотоксичності. Виявлені локальні зони підвищеного токсичного впливу потребують більш детального вивчення для визначення конкретних чинників забруднення та розробки заходів із відновлення й стабілізації стану ґрунтового середовища.

Для уточнення результатів біотестування за методом А та перевірки наявності статистично достовірних відмінностей між контрольними і дослідними варіантами було проведено статистичну обробку морфометричних даних із застосуванням критеріїв t-Ст'юдента та F-Фішера. Такий підхід дозволив оцінити не лише напрям і величину змін ростових параметрів, а й коректність їх порівняння з огляду на однорідність дисперсій.

У групі однодольних рослин (30 об'єктів) статистично достовірне зменшення або збільшення довжини коренів ($|t_{\text{факт}}| > 1,995$) встановлено у 30,0 % досліджених зразків, тоді як для паростка — у 33,3 % об'єктів. Водночас аналіз однорідності дисперсій показав, що нестабільність варіації довжини коренів ($F > 2,0$) спостерігалася у 6,7 % випадків, а паростків — у 10,0 %. Це свідчить, що в переважній більшості досліджень порівняння між контролем і дослідом було статистично коректним, а виявлені відмінності можна вважати надійними.

У дводольних рослин (34 об'єкти) статистично достовірну зміну довжини коренів виявлено у 58,8 % досліджених зразків, тоді як для паростків — у 26,5 % випадків. Однорідність дисперсій коренів ($F \leq 2,0$), що забезпечує коректність статистичного порівняння, встановлено у 52,9 % об'єктів. Разом із тим нестабільність дисперсій паростків ($F > 2,0$) зафіксовано у 17,6 % досліджених дводольних рослин, що потребує обережного трактування відповідних результатів.

Таким чином, статистичний аналіз даних, отриманих за методом А, показав, що в переважній частині досліджених ґрунтових зразків зміни ростових параметрів тест-рослин є достовірними. У випадках, де виявлено неоднорідність дисперсій ($F > 2,0$), отримані відмінності між контролем і дослідом слід інтерпретувати з урахуванням підвищеної мінливості показників, що може відображати нестабільний або просторово неоднорідний стан ґрунтового середовища.

3.2. Визначення фітотоксичності ґрунтів за методом Б

Далі ми здійснили розрахунки фітотоксичності ґрунтів за допомогою інтегрованої методики визначення забруднення ґрунту (Б) та методики фітотестування. У розрахунку інтегрованого показника фітотоксичності (ІПФ) не враховували множники «Іс» – схожість та «Іеп» – енергія проростання», оскільки в умовах досліді вони істотно не впливали на кінцевий результат, а також для того, щоб забезпечити більш наочне та коректне відображення даних на шкалі діаграм (Рис. 1, Рис. 2), де ключовим критерієм є ступінь забрудненості ґрунтів, $K_{\text{зг}}$ із методу А. Результати біотестування для дводольних і однодольних рослин за методом Б наведено в таблиці 5.

Результати для однодольних рослин із використанням насіння ячменю (*Hordeum vulgare*). За отриманими даними індекс пригнічення росту (І) в основному не перевищував одиницю, що свідчить, згідно з методикою визначення ІПФ (розділ, де наведено формулу порівняння показників росту рослин у досліді та контролі), про відсутність фітотоксичності ґрунту на більшості досліджених ділянок. Це узгоджується з інтерпретацією індекса пригнічення росту (І), відповідно до якої: $I < 1$ — показники росту в досліді нижчі, ніж у контролі, що свідчить про пригнічення розвитку та наявність фітотоксичності; $I = 1$ — показники однакові, що відображає відсутність впливу (норму); $I > 1$ — показники вищі за контроль, що вказує на стимуляцію проростання або росту, часто короточасну чи компенсаторну.

Таблиця 5

Результати біотестування фітотоксичності ґрунтів за методом Б для однодольних і дводольних тест-рослин

№	Місце відбирання проб ґрунту (об'єкт)	Однодольні			Дводольні		
		Ік	Іп	ІПФ	Ік	Іп	ІПФ
1	ПСП "Маяк", поле 1	1,28	0,94	1,10	0,95	1,11	1,03
2	ПСП "Маяк", поле 2	1,51	1,31	1,41	0,96	0,94	0,95
3	ПСП "Маяк", поле 3	1,51	1,20	1,35	1,26	1,12	1,19
4	ФГ "Велес-В", поле 1	1,39	1,38	1,38	0,61	1,10	0,82
5	ФГ "Велес-В", поле 2	1,51	1,47	1,49	0,63	0,96	0,78
6	ФГ "Марінда"	1,29	1,27	1,28	1,21	1,07	1,14
7	СВК "Дружба"	1,65	1,26	1,44	0,95	1,15	1,04
8	ФГ "Колосок плюс"	1,27	1,53	1,40	1,25	1,01	1,12
9	С(Ф)Г "Пчелка", поле 1	1,47	1,24	1,35	1,64	1,15	1,37
10	С(Ф)Г "Пчелка", поле 2	1,46	1,50	1,48	0,83	0,95	0,89
11	Одноосібник	1,35	0,99	1,15	1,12	1,04	1,08
12	ФОП "Коляда", поле 1	1,78	1,78	1,78	0,78	1,02	0,89
13	ФОП "Коляда", поле 2	1,53	1,48	1,50	1,81	1,20	1,47
14	ФГ "Дорід"	1,10	1,45	1,26	1,28	1,14	1,21
15	ТОВ "Агрохол"	1,11	1,28	1,19	1,38	1,11	1,24
16	ФГ "Прогрес", поле 1	1,65	1,34	1,49	1,74	1,09	1,37
17	ФГ "Прогрес", поле 2	1,22	1,45	1,33	0,95	0,88	0,91
18	ПСП "Шарівка", поле 1	1,55	1,30	1,42	1,24	1,18	1,21
19	ПСП "Шарівка", поле 2	1,48	1,49	1,49	1,17	1,22	1,20
20	ТОВ "Омбілік", поле 1	1,34	1,18	1,26	1,31	0,95	1,12
21	ТОВ "Омбілік", поле 2	1,10	1,30	1,19	1,04	0,98	1,01
22	ТОВ "Омбілік", поле 3	1,69	1,38	1,53	0,66	0,85	0,75
23	ФГ "Кристина", поле 1	0,50	1,21	0,80	0,67	0,76	0,72
24	ФГ "Кристина", поле 2	1,61	1,36	1,48	1,53	1,13	1,31
25	ФГ "Коваль"	1,29	1,54	1,41	0,99	1,20	1,09
26	Одноосібник с Литвинівка, поле 1	1,53	1,35	1,44	1,50	1,16	1,32
27	Одноосібник с. Литвинівка, поле 2	1,19	1,46	1,32	1,28	1,07	1,17
28	ФГ "Панасенко", поле 1	1,52	1,44	1,48	1,12	0,91	1,01
29	ФГ "Панасенко", поле 2	1,36	1,55	1,45	0,71	0,84	0,77
30	ФГ "Панасенко", поле 3	1,53	1,36	1,44	0,95	0,94	0,95
31	Бараново	—	—	—	1,43	1,17	1,29
32	Дружба, поле 1	—	—	—	1,75	1,00	1,32
33	Дружба, поле 2	—	—	—	0,95	1,05	1,00
34	Огульчанське	—	—	—	1,33	1,18	1,25

Примітка: Ік, Іп – індекси довжини коренів і пагонів; ІПФ – інтегрований показник фітотоксичності

Однак у кількох випадках спостерігалися локальні прояви фітотоксичності. Зокрема, на об'єкті №1 (ПСП «Маяк», поле 1) відмічено зниження довжини пагонів порівняно з контрольними рослинами. Подібна тенденція простежувалася й на об'єкті №11 (Одноосібник), де також спостерігалось ослаблення росту пагонів. Найбільш виражене пригнічення розвитку виявлено на об'єкті №23 (ФГ «Кристина», поле 1), для якого характерне істотне зменшення довжини кореневої системи, а інтегрований показник свідчить про наявність помірного токсичного впливу ґрунтового середовища на проростки.

Інтегрований показник фітотоксичності (ІПФ) загалом вказує на переважно сприятливий екологічний стан ґрунтів, де значення ІПФ для більшості проб становило 0,91–1,00. Це свідчить про відсутність токсичності, і такі ґрунти можна вважати безпечними для росту культурних рослин. Проте, проба з об'єкту № 23 має помірний рівень фітотоксичності, що може пригнічувати розвиток чутливих рослин на ранніх етапах росту. У таких випадках рекомендується використовувати більш стійкі рослини або проводити фіторемедіацію, наприклад, висівати гірчицю білу чи фацелію, що допоможе зменшити токсичність ґрунту.

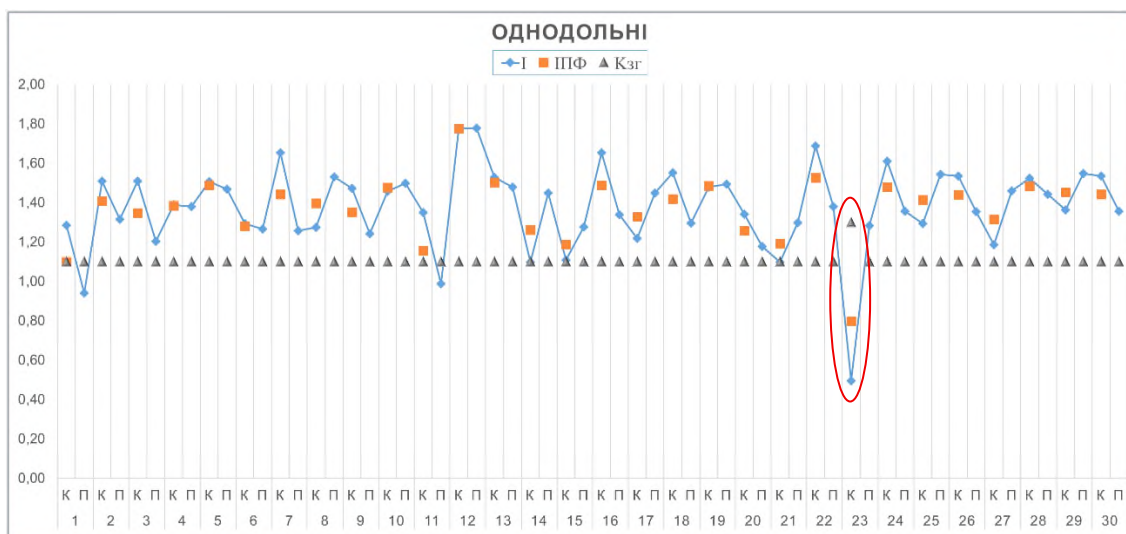
Результати для дводольних рослин із використанням насіння гірчиці білої (*Sinapis alba*) також показали, що більшість проб мають значення ІПФ в межах 0,91–

1,00, що підтверджує відсутність фітотоксичності й характеризує ґрунт як безпечний для агроєкосистем. Водночас у поодиноких випадках спостерігалось зниження індексу токсичності, що, згідно з градаціями значень ІПФ, показаними у таблиці 2, свідчить про слабкий рівень фітотоксичності ґрунту.

3.3. Порівняння двох методик

Результати визначення фітотоксичності ґрунту за двома методами для однодольних тест-рослин візуалізовано на рисунку 1 (слід зазначити, що дані для однодольних рослин вже опубліковані автором раніше [13]). Порівняння двох методик засвідчили загальну відповідність оцінок фітотоксичності, що підтверджує надійність отриманих даних. Зокрема, це свідчить про те, що обидві методики адекватно відображають вплив токсикантів на розвиток кореневої системи та пагонів однодольних рослин, забезпечуючи комплексну оцінку стану ґрунтового середовища.

Натомість за результатами аналізу проби на об'єкті № 23 інтегрованою методикою спостерігалось зниження індексу за коренями (Ik) та одночасне підвищення індексу за пагонами (Ip), що в сумі визначило інтегрований показник ІПФ на рівні, який вказує на слабкий рівень токсичності. Це свідчить про переважно несуттєвий вплив стресових факторів на проростки однодольних рослин. Такий результат підкреслює високу чутливість інтегрованого підходу до комплексного впливу різних факторів, оскільки методика одночасно враховує і розвиток кореневої системи і довжину пагонів, що забезпечує більш тонку та диференційовану оцінку стану рослин.



Позначення:

Показники оцінювання: І — індекс пригнічення росту (Ik та Ip у методі Б); ІПФ — інтегрований показник токсичності (метод Б); Кзг — коефіцієнт забрудненості ґрунту (метод А);

На вертикальній осі: значення показників оцінювання

На горизонтальній осі: К — корені; П — пагони; 1–30 — номери об'єктів

Рис. 1. Графічна візуалізація фітотоксичності ґрунтів за двома методиками. Тест-рослина — ячмінь (одnodольні).

Таким чином, на одному рисунку наочно порівнюються результати двох методів визначення фітотоксичності, де кожний метод оцінював реакцію рослин через корені і пагони проростків, що дозволяє визначити, чи спостерігаються відмінності в реакції окремих органів тест-рослини на забруднення ґрунту.

Незважаючи на відмінності у числових діапазонах та градаціях обох систем оцінювання, встановлено їхню екологічну узгодженість: обидві методики

демонструють схожу якісну характеристику стану ґрунту — слабу або помірну токсичність, без вираженого пригнічення росту. Це дозволяє зробити висновок, що наявні відхилення у розвитку однодольних культур є локальними і несуттєвими для агроєкосистеми загалом, а також свідчить про стабільність ґрунтового середовища та відсутність критичних концентрацій токсикантів.

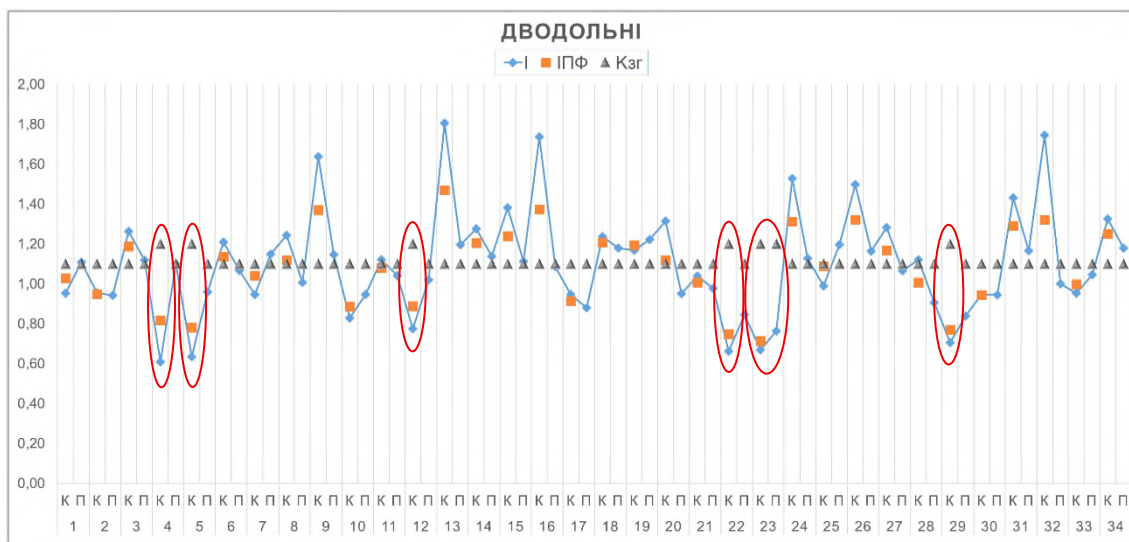
Порівняльний аналіз результатів також демонструє, що інтегровані показники дозволяють раннє виявлення потенційних стресових ділянок, що може бути корисним для оперативного коригування системи удобрення та заходів із захисту рослин.

Порівняння результатів для дводольних культур (Рис. 2) на прикладі досліджуваних полів також підтвердило узгодженість висновків між двома методиками. Таке порівняння дозволяє оцінити не лише загальний рівень токсичності, а й просторову варіабельність проявів фітотоксичності, що є важливим для локалізації потенційних проблемних зон.

Так, у господарстві «Велес-В», поле 1 (об'єкт № 4) за обома підходами засвідчили слабе забруднення, $I_k = 0,61$, $ІПФ = 0,82$, $K_{зг} = 1,2$, що, згідно з табл. 2, відповідає слабкому рівню токсичності. Ці дані свідчать про мінімальний вплив стресових агентів на проростки дводольних культур, що дозволяє очікувати нормальне формування кореневої системи та пагонів у польових умовах.

Для поля 2 (об'єкт № 5) цього ж господарства $I_k = 0,63$, $ІПФ = 0,78$ — значення відповідають межовому стану між слабкою та незначною токсичністю. Така невелика різниця між інтегрованим індексом і $ІПФ$ відображає локальні варіації у властивостях ґрунту, які можуть бути пов'язані з неоднорідним внесенням добрив, залишками агрохімікатів або природними особливостями верхнього горизонту.

На об'єкті № 12 (ФОП «Коляда», поле 1) отримано $I_k = 0,78$ та $ІПФ = 0,89$, що свідчить про узгоджений результат із діагностикою слабкої токсичності. Це означає, що дводольні культури на цьому полі відчують помірний стрес, який не має критичного впливу на їх проростання та розвиток.



Позначення:

Показники оцінювання: І — індекс пригнічення росту (I_k та I_p у методі Б); ІПФ — інтегрований показник токсичності (метод Б); $K_{зг}$ — коефіцієнт забрудненості ґрунту (метод А).

На вертикальній осі: значення показників оцінювання.

На горизонтальній осі: К — корені; П — пагони; 1–34 — номери проб ґрунту.

Рис. 2. Графічна візуалізація фітотоксичності ґрунтів за двома методиками: А і Б. Тест-рослина – гірчиця (дводольні).

Подібною виглядає реакція проростків на стан ґрунту на об'єктах № 22, № 23 і № 29, де низькі значення індексів пригнічення росту (метод Б) узгоджуються з більш високими значеннями $K_{зг}$ (метод А).

Збіг загальної тенденції дозволяє вважати результати аналізування за двома методиками як взаємодоповнювальні, що підвищує достовірність екологічної оцінки ґрунтового середовища. Комплексне використання обох методик дає змогу не лише оцінити середній рівень токсичності, а й виявити ділянки з потенційним ризиком для розвитку рослин, що є критично важливим для раціонального землекористування та прийняття управлінських рішень у сільському господарстві.

Здобуті результати засвідчили, що за класифікацією способу оцінювання токсичності ґрунтів за методом Крайнюкова і Кривицької більшість ґрунтових зразків характеризувалися низьким або помірним рівнем токсичності, тобто відсутністю різко виражених локальних техногенних навантажень. Водночас фітотестування за інтегрованою методикою Мірошніченка продемонструвало більш широкий діапазон варіацій інтегрованих індексів, що відображає реакцію рослин на комплексну дію факторів середовища, зокрема на загальну фітотоксичність. У ряді випадків зафіксовано відмінності між результатами дводольних і однодольних культур, що підтверджує їхню різну чутливість до окремих типів токсикантів і підкреслює доцільність використання кількох тест-об'єктів для більш об'єктивної оцінки стану ґрунтового середовища.

Висновки

Обидві застосовані методики показали узгоджені результати щодо оцінки рівня фітотоксичності орних ґрунтів Валківської громади.

Згідно з методикою визначення ступеня забрудненості ґрунтів, розробленою Крайнюковим та Кривицькою, фітотоксичність визначається за відсотковим пригніченням росту проростків відносно контролю, що дозволяє оперативно виявити локальні осередки забруднення. Такий підхід особливо корисний для первинного моніторингу, оскільки дозволяє швидко визначити окремі ділянки з підвищеною токсичністю, навіть якщо забруднення незначне або має нерівномірний характер.

Методика фітотестування, розроблена під керівництвом М. Мірошніченка, базується на інтегрованій оцінці фітотоксичного впливу з урахуванням динаміки росту та морфологічних змін різних видів тест-рослин (одnodольних і дводольних) упродовж періоду пророщування. Цей підхід дозволяє більш детально вивчити реакцію рослин на токсиканти, враховуючи не лише відсоткове пригнічення росту, а й комплекс морфологічних змін, що виникають під дією стресових факторів. Завдяки цьому методика дає змогу оцінити потенційні адаптаційні можливості рослин і агрофітоценозів та передбачити їхню стійкість до майбутніх впливів.

Порівняльний аналіз результатів, отриманих за двома методами, свідчить, що методи є взаємодоповнювальними: перший — чутливий до локальних забруднень і характеризується простотою виконання, другий — більш універсальний, оскільки інтегрує кілька біологічних параметрів у єдиний індекс, що підвищує точність екотоксикологічної оцінки. Поєднання цих методів дає змогу отримати комплексну картину екологічного стану ґрунту: виявити осередки підвищеної токсичності, одночасно оцінити загальний рівень стресу для рослин і передбачити можливі наслідки для агроєкосистем.

Для більшості ділянок, досліджених за обома методами, зафіксовано слабкий або помірний рівень токсичності, що свідчить про загалом задовільний екологічний стан орних ґрунтів громади. Такі результати вказують на стабільність ґрунтового середовища та відсутність критичних концентрацій токсикантів, що дозволяє планувати безпечне ведення сільськогосподарських культур.

Водночас окремі локальні відхилення можуть бути пов'язані з інтенсивним застосуванням агрохімікатів або нерівномірністю їх розподілу в агроландшафті.

Це підкреслює необхідність регулярного моніторингу та врахування просторової неоднорідності у процесі внесення добрив та використання засобів захисту рослин.

Отже, комплексне використання обох методів забезпечує більш достовірну оцінку екоотоксикологічного стану ґрунтів та може бути рекомендованим для моніторингу агроєкосистем у подальших дослідженнях. Застосування методик Крайнюкова та Кривицької паралельно з методикою Мірошніченка дозволяє не лише швидко виявляти осередки підвищеної фітотоксичності орних ґрунтів, а й прогнозувати потенційний вплив стресових факторів на ріст і розвиток сільськогосподарських культур, що є важливим для прийняття рішень у системі сталого управління ґрунтовими ресурсами.

Список використаних джерел

1. Балюк С. А., Медведєв В. В., Мірошніченко М. М., Скрильник Є. В., Тимченко Д. О., Фатєєв А. І., Христенко А. О., Цапко Ю. Л. Екологічний стан ґрунтів України // *Український географічний журнал*. 2012. № 2. С. 38–42. URL: <https://ukrgeojournal.org.ua/uk/node/331> <https://doi.org/10.15407/ugz>
2. Крайнюков О. М., Кривицька І. А. Спосіб визначення ступеня забрудненості ґрунтів : пат. на корисну модель № 113560 Україна. № u2016 11123; заявл. 10.11.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3. 3 с.
3. Визначення забруднення ґрунту і води гербіцидами сім-тріазинової групи за допомогою хлорели звичайної та методики фітотестування (методичні рекомендації) / за ред. чл.-кор. НААН М. Мірошніченка. Харків: Стильна типографія, 2024. 34 с.
4. Яковичина Т. С. Система біотестування токсичності ґрунту, забрудненого важкими металами. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Агрономія і біологія»*. 2014. Вип. 3 (27). С. 70–73. URL: http://visnyk.snau.edu.ua/sample/files/snau_2014_3_27_agronom/JRN/17.pdf
5. Alengebawy A., Abdelkhalek S. T., Qureshi S. R., & Wang M. Q. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: ecological risks and human health implications. *Toxics*. 2021. Vol. 9. Is. 3. P. 42. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
6. Хохрякова А. І., Михайлюк В. І. Ґрунти міста Одеси : монографія. Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2021. 146 с.
7. Lehmann A., Stahr K. Nature and significance of anthropogenic urban soils. *J. Soils Sediments*. 2007. Vol. 7. P. 247–260. <https://doi.org/10.1065/jss2007.06.235>
8. Trigub V., Adabovska M., Domuschy S. Features of an ecological condition of a soil cover of the city of Odessa (Ukraine) / *Proceedings of the XV International Conference on Quality Strategy in Industry and Education* (pp. 177–182). Dnipro-Varna., 2019. URL: <https://crust.ust.edu.ua/bitstreams/1cec7a9a-2229-4324-96b2-14465e7e6dec/download>
9. Khokhryakova, A. Determination of the level of toxicity of the soils of recreational areas of Odessa city by biotesting methods. *ScienceRise: Biological Science*. 2020. № 3(24). P. 4–23. <https://doi.org/10.15587/2519-8025.2020.211556>
10. Цветкова Н. М., Клименко Т. К. Техногенні аномалії важких металів у ґрунтах урболандшафтів степового Придніпров'я (на прикладі м. Дніпродзержинська). *Ґрунтознавство*. 2005. Т. 6, № 1-2. С. 45-52. URL: http://www.ussj.cv.ua/2005_t6_1-2/Tsvetkova_45-52.pdf
11. Lado L. R., Hengl T., Reuter H. Heavy metals in European soils: A geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database. *Geoderma*. 2008. Vol.148. Is. 2. P. 189-199. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.09.020>
12. Палапа Н. В., Гончар С. М. Екологічні ризики, пов'язані із сільськогосподарською діяльністю людини. *Агроекологічний журнал*. 2022. № 1. С. 68-80. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2022.255189>
13. Коваль Ф. Оцінка фітотоксичності як індикатора здоров'я ґрунтів у Валківській громаді Харківської області. *Внесок молодих учених у розвиток ґрунтознавчо-агрохімічної науки та забезпечення сталого розвитку аграрної сфери* : зб. тез Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 29 трав. 2025). [Електронне видання] / Харків: ННЦ «ІГА ім. О. Н. Соколовського», 2025. С. 37–39. URL: <http://www.issar.com.ua/uk/vydannya>

UDC 631.453:631.427.1(477.54)

Assessment of phytotoxicity of arable soils of Valkivska community according to different methodological approaches

F. F. Koval

National Scientific Center "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky",
Kharkiv, Ukraine

✉ kowalfdr@gmail.com

ORCID: 0009-0009-3667-2275

Received 18.11.2025; Revised 08.12.2025; Accepted 26.12.2025; Available online 30.12.2025

Abstract. The article substantiates the relevance of biotesting in assessing the ecological state of the soil, in particular by determining its phytotoxicity, as one of the most sensitive and informative integrated indicators of the presence of toxic components in the soil environment. Due to its indicator function, the soil phytotoxicity index is used both to identify local sources of pollution and for a comprehensive assessment of the overall level of anthropogenic load on the studied area. The study was conducted on two types of soil — typical chernozems (Haplic Chernozems) and podzolized chernozems

(Chernic Phaeozems). To determine the level of phytotoxicity of arable soils in the territory of the Valkivska community of the Kharkiv region, two methodological approaches used: (i) determining the degree of soil contamination according to the Krainyukov–Kryvytska method and (ii) integrated phytotesting methodology according to Miroshnychenko. Soil samples for testing taken from the arable layer (0–30 cm). Seeds of dicotyledonous and monocotyledonous plants used for biotesting. Seeds germinated for 72 hours in water extracts from the studied soils, and the control variant — in distilled water. Bioindicative parameters were determined by morphometric indicators of seedlings — the length of shoots and roots. After that, the difference between the length in the studied and control variants, the growth inhibition index (I) and the values of complex integrated indicators predicted by both methodological approaches were calculated. By comparing the effectiveness of two methods that differ in the principles of interpretation of bioindication parameters, it was determined that both approaches are similar in terms of soil condition characteristics. As a result, it was noted that the combination of the two methods allows for a more complete and multi-component ecological assessment. The method of Krainyukov and Kryvytska is suitable for rapid express analysis and operational identification of potentially dangerous areas. The integrated phytotesting method according to Miroshnychenko, due to a wider range of indicators, provides a deeper and more detailed characterization of soil phytotoxicity. Together, the data indicate a generally satisfactory condition of the soils of the Valkivska community with individual manifestations of moderate phytotoxicity, which requires regular monitoring and further analysis of possible sources of influence. According to the classification of the degree of toxicity in the Krainyukov–Kryvytska method, most soils assessed as having a low or moderate level of toxicity, which indicates the absence of pronounced local technogenic loads. According to the Miroshnychenko method, a wider range of variations of the parameters of integrated indices revealed, which reflects the reaction of plants to the complex effect of environmental factors, in particular to general phytotoxicity. Differences recorded between the results of the assessment using dicotyledonous and monocotyledonous crops, which confirms the different sensitivity of plants to individual types of toxicants. The feasibility of using several test crops for a more objective assessment of the state of the soil environment indicated.

Keywords: phytotoxicity; phytotesting; growth inhibition index; monocotyledons; dicotyledons; Valkivska community; ecological state of the soil.

Citing: Koval F. F. (2025). Assessment of phytotoxicity of arable soils of Valkivska community according to different methodological approaches. *AgroChemistry and Soil Science*, 99, 70-82. doi:10.31073/acss99-08

References

1. Baliuk, S., Medvedev, V., Miroshnychenko, M., Skrylnik, Ye., Timchenko, D., Fatieev, A., Khristenko, A., & Tsapko, Yu. (2012). Environmental state of soils in Ukraine. *Ukrainian Geographical Journal*, 2, 38–42. Retrieved from <https://ukrgeojournal.org.ua/uk/node/331> <https://doi.org/10.15407/ugz> [in Ukrainian].
2. Krainyukov, O. M., & Kryvytska, I. A. (2017). Method for determining the degree of soil contamination : patent for utility model No. 113560 Ukraine. No. u2016 11123; appl. 10.11.2016; publ. 10.02.2017, Bull. No. 3. [in Ukrainian].
3. Miroshnychenko, M. (Ed.). (2017). *Determination of soil and water contamination by herbicides of the seven-triazine group using chlorella vulgaris and phytotesting methods (methodological recommendations)*. Kharkiv: Styl'na Typography. [in Ukrainian].
4. Yakovyshyna, T. F. (2014). Biotesting system of the toxicity of the soil contaminated by the heavy metals. *Bulletin of Sumy National Agrarian University Series "Agronomy and Biology"*, 3(27), 70–73. Retrieved from http://visnyk.snau.edu.ua/sample/files/snau_2014_3_27_agronom/JRN/17.pdf [in Ukrainian].
5. Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., & Wang, M. Q. (2021). Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: ecological risks and human health implications. *Toxics*, 9(3), 42. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
6. Khokhryakova, A. I., & Mykhailiuk, V. I. (2021). *Soils of the City of Odesa : monograph*. Odesa: Helvetica Publishing House [in Ukrainian].
7. Lehmann, A., & Stahr, K. (2007). Nature and significance of anthropogenic urban soils. *J. Soils Sediments*, 7(4), 247–260. <https://doi.org/10.1065/jss2007.06.235>
8. Trigub, V., Adabovska, M., & Domuschy, S. (2019). Features of an ecological condition of a soil cover of the city of Odesa (Ukraine). In *Proceedings of the XV International Conference on Quality Strategy in Industry and Education* (pp. 177-182). Dnipro-Varna. Retrieved from <https://crust.ust.edu.ua/bitstreams/1cec7a9a-2229-4324-96b2-14465e7e6dec/download>
9. Khokhryakova, A. (2020). Determination of the level of toxicity of the soils of recreational areas of Odesa city by biotesting methods. *ScienceRise: Biological Science*, 3(24), 4–23. <https://doi.org/10.15587/2519-8025.2020.211556>
10. Tsvetkova, N. N., & Klimenko, T. K. (2005). Technogenic anomalies of heavy metals in the soils of urban landscape of steppe Pridneprovye (with examples of Dneprodzerzhinsk). *Gruntoznavstvo* [Soil Science], 6(1-2), 45-52. Retrieved from http://www.ussj.cv.ua/2005_t6_1-2/Tsvetkova_45-52.pdf [in Ukrainian].
11. Lado, L. R., Hengl, T., & Reuter, H. I. (2008). Heavy metals in European soils: a geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database. *Geoderma*, 148(2), 189-199. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.09.020>
12. Palapa, N., & Honchar, S. (2022). Environmental risks associated with human agricultural activity. *Agroecological Journal*, 1, 68-80. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2022.255189> [in Ukrainian].
13. Koval, F. (2025). Assessment of phytotoxicity as an indicator of soil health in the Valky Community of Kharkiv region / Contribution of young scientists to the development of Soil Science and Agrochemistry and ensuring sustainable development of the agrarian sector : collection of abstracts of the International scientific & practical conference (Kharkiv, May 29, 2025). [Electronic edition] Kharkiv: NSC ISSAR, 2025. Retrieved from <http://www.issar.com.ua/uk/vydannya> [in Ukrainian].

УДК 631.445.2:631.879.3(477.8)

Особливості целюлозолітичної активності ґрунту під впливом барди мелясної

Р. Я. Мелимука^{1 а}, А. В. Долюк^{2 б}¹ Поліська дослідна станція Національного наукового центру «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», Луцьк, Україна² Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 26.11.2025 Отримано після доопрацювання 19.12.2025 Затверджено до видання 26.12.2025 Доступно онлайн 30.12.2025	У статті наведено результати трирічних досліджень з оцінювання впливу барди мелясної на целюлозолітичну активність дерново-слабопідзолистого зв'язано-піщаного ґрунту (Albic Arenosols) Західного Полісся України. Дослідження проводили у 2023–2025 роках. Оцінювали ефективність прямої дії барди мелясної за вирощування картоплі та її післядії у перший (пшениця озима) та другий (овес) роки. Целюлозолітичну активність ґрунту визначали шляхом урахування інтенсивності розкладу целюлози за методом Мішустіна з використанням лляного полотна, яке закладали у два верхні шари ґрунту (0–20 і 20–40 см). Було встановлено, що внесення барди мелясної, незалежно від року спостереження, істотно посилює целюлозолітичну активність ґрунтової мікробіоти, й інтенсивність ефекту зростає пропорційно дозі внесення. Максимальні значення отримано за норми 30 т/га, що свідчить про високу ефективність барди як джерела легкодоступного органічного вуглецю та стимулятора мікробіологічних процесів. Під час досліджень встановлено пролонгований ефект дії барди мелясної на мікробіологічну активність. У період післядії першого року целюлозолітична активність залишається помітно підвищеною порівняно з контролем, у другий рік інтенсивність розкладу целюлози знижується, проте залишається більш високою, ніж на контрольному варіанті, що підтверджує пролонгований характер дії барди мелясної. Отримані результати вказують на здатність барди мелясної істотно посилювати ґрунтові мікробіологічні процеси, забезпечувати тривале збільшення інтенсивності розкладання органічної речовини та поліпшувати загальний біологічний стан ґрунту. Зроблено висновок про доцільність використання барди мелясної як ефективного органічного добрива на дерново-підзолистих ґрунтах, а також висловлено припущення щодо потенційно можливої оптимізації мікробіологічних процесів у малородючих ґрунтах Полісся.

Ключові слова:

барда мелясна;
целюлозолітична активність;
мікробіологічна активність ґрунту;
органічні добрива;
дерново-підзолисті ґрунти

✉ r.melymuka22@gmail.com

ORCID: ^a0000-0003-2133-5654, ^b0000-0001-9849-4720

Форма цитування: Мелимука Р. Я., Долюк А. В. Особливості целюлозолітичної активності ґрунту під впливом барди мелясної. Агрохімія і ґрунтознавство : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків: 2025. Вип. 99. С. 83–88. doi: 10.31073/acss99-09

1. Вступ

Інтенсивність розкладу органічної речовини є важливим показником біологічної активності ґрунту, що відображає функціонування мікробного ценозу та рівень кругообігу вуглецю в агроєкосистемах. Загалом, мікроорганізми відіграють важливу роль у природному кругообігу речовин, зокрема ґрунтові мікроорганізми є невід'ємними факторами ґрунтоутворення і формування родючості ґрунту [1].

Визначення целюлозолітичної активності ґрунту — це визначення інтенсивності процесів розкладу целюлози — основного структурного компоненту рослинних решток.

Целюлозолітична активність мікроорганізмів характеризує інтенсивність гуміфікації, мобілізації поживних елементів та загальну стійкість ґрунтових процесів, особливо на бідних органічною речовиною дерново-підзолистих ґрунтах Полісся, де мікробіологічний потенціал обмежений низьким вмістом гумусу та

легким гранулометричним складом. Окрім того дерново-підзолисті ґрунти Полісся історично характеризуються кислою реакцією ґрунтового середовища, що також впливає на активність ґрунтових мікроорганізмів [2, 4].

Відтак мікроорганізми відіграють провідну роль у розвитку та збереженні ґрунту, а заходи з підвищення мікробіологічного різноманіття та активності, шляхом збагачення необхідними для мікрофлори мінеральними елементами та органічними сполуками, набувають все більшої актуальності [3, 4, 6].

Застосування органічних добрив є одним із найефективніших шляхів стимулювання мікробіологічної активності ґрунту. Серед них вагоме місце займає барда мелясна — побічний продукт спиртового виробництва, збагачений легкодоступними органічними речовинами, калієм, азотом, мікроелементами та біологічно активними сполуками. За даними досліджень зарубіжних авторів, внесення барди сприяє активізації та чисельності ґрунтової мікробіоти [7].

Попри це існують і кардинально інші думки, зокрема барда мелясна, як побічний продукт спиртового виробництва, має у складі алкоголь, який виступає інгібітором росту мікроорганізмів, тобто він заважає бактеріям і грибам розмножуватися, пригнічує, уповільнює або повністю зупиняє певні біологічні процеси [5].

Водночас питання впливу барди мелясної на целюлозолітичну активність дерново-підзолистих ґрунтів Полісся, що характеризуються низьким вмістом гумусу та кислотністю, відтак можуть мати унікальну реакцію на барду мелясну, котра й підкислює ґрунт, створюючи диференційоване середовище для ґрунтової біоти та її активності, в сучасних умовах недостатньо висвітлене.

2. Об'єкти (матеріали) і методи досліджень

Дослідження з визначення впливу барди мелясної на целюлозолітичну активність ґрунту проводились у період 2023-2025 років на землях господарського призначення Колківського центру професійної освіти (Луцький район, Волинська область) в умовах Західного Полісся.

Мета досліджень — встановити особливості формування рівня целюлозолітичної активності дерново-підзолистого ґрунту за застосування барди мелясної.

Схема польового дослідження включає такі варіанти: 1. Контроль (без добрив); 2. Барда, 10 т/га; 3. Барда, 20 т/га; 4. Барда, 30 т/га; 5. $N_{90}P_{70}K_{170}$ (еквівалентно 10 т/га барди). На другий та третій роки, схему дослідження не змінювали. Повторність триразова, розміщення варіантів рендомізоване. Площа посадкових ділянок 21 м², облікова площа 10 м².

Ґрунт дослідної ділянки — дерново-підзолистий зв'язно-піщаний (Albic Arenosols).

Вирощувані сільськогосподарські культури за роками: 2023 — картопля; 2024 — пшениця озима; 2025 — овес. Технологія вирощування загальноприйнята для Західного Полісся, окрім чинників, які вивчали.

Целюлозолітичну активність визначали за методикою Мішустіна шляхом оцінювання інтенсивності розкладу лляного полотна у двох горизонтах ґрунту (0–20 та 20–40 см) згідно зі схемою досліджень.

Суть дослідження полягала у тому, що лляне полотно масою близько 3,0 г заковували у ґрунт і залишали там на 50 діб. Після того полотно викопували, висушували до повітряно сухого стану та зважували. Показник целюлозолітичної активності ґрунту наводиться у відсоткових значеннях маси розкладеної частини лляного полотна, відносно його початкової маси.

3. Результати досліджень

3.1. Вплив прямої дії внесення барди мелясної на целюлозолітичну активність ґрунту

У результаті проведених польових і лабораторних досліджень було встановлено особливості формування целюлозолітичної активності дерново-підзолистого зв'язно-піщаного ґрунту за умов прямого внесення барди мелясної, а також у періоди її післядії першого та другого років.

Результати дослідження прямої дії за вирощування картоплі, демонструють виражену диференціацію інтенсивності розкладу лляного полотна залежно від норми внесення барди (Табл. 1). На контролі, що відображає природний рівень мікробіологічної активності ґрунту, середня (за три роки) інтенсивність розкладу лляного полотна в шарі 0–20 см становила 81,8 %, а у шарі 20–40 см — 52,5 %, середні значення на контролі за відповідними горизонтами становили 81,8 та 52,0 %.

Внесення барди у нормі 10 т/га спричинило незначне підвищення целюлозолітичної активності, і середні значення як у верхньому (0-20 см), так і в нижньому (20-40 см) збільшилися на 2,3 % відносно неудобреного контролю.

Таблиця 1

Вплив прямої дії внесення барди мелясної на целюлозолітичну активність ґрунту (середні дані за 2023-2025 рр.)

Варіант досліджу	Шар ґрунту, см	Інтенсивність розкладу, %				Відносний приріст до контролю, %
		за роками			середня	
		2023	2024	2025		
1. Контроль (без добрив)	0-20	81,8	81,5	82,1	81,8	–
	20-40	52,5	51,8	51,7	52,0	–
2. Барда, 10 т/га	0-20	83,6	83,5	84,0	83,7	+2,3
	20-40	53,3	52,7	53,6	53,2	+2,3
3. Барда, 20 т/га	0-20	82,6	89,6	90,3	89,5	+9,4
	20-40	56,0	56,7	57,1	56,6	+8,8
4. Барда, 30 т/га	0-20	92,3	93,7	95,8	93,9	+14,8
	20-40	57,7	58,1	58,8	58,2	+11,9
5. N ₉₀ P ₇₀ K ₁₇₀ (еквівалентно 10 т/га барди)	0-20	84,3	84,8	85,1	84,7	+3,5
	20-40	53,4	53,7	54,0	53,7	+3,3

Більш суттєвим було посилення активності у варіанті внесення барди у нормі 20 т/га. У верхньому шарі середня інтенсивність розкладу лляного полотна зросла на 9,4 %, а в нижньому на 8,8 % вище середніх контрольних значень.

Максимальні значення — найвищий рівень мікробіологічної активності зафіксовано у варіанті з нормою внесення барди 30 т/га.

Для порівняння, мінеральні добрива (N₉₀P₇₀K₁₇₀) забезпечили лише незначне підвищення целюлозолітичної активності досліджуваних ґрунтів відносно удобреного варіанту. Таким чином виявлено, що мінеральні добрива не здатні забезпечити посилення мікробіологічної діяльності ґрунту щодо процесів розкладу целюлози, на відміну від органічної барди.

3.2. Вплив післядії внесення барди мелясної на целюлозолітичну активність ґрунту

Окрім досліджень спрямованих на визначення прямої дії (у рік внесення) барди мелясної на целюлозолітичну активність дерново-підзолистого ґрунту Західного Полісся, визначали вплив післядії, тобто, через один (Табл. 2) та два (Табл. 3) роки після внесення барди.

Таблиця 2

Вплив післядії першого року внесення барди мелясної на целюлозолітичну активність ґрунту (середні дані за 2024-2025 рр.).

Варіант досліджу	Шар ґрунту, см	Інтенсивність розкладу, %			Відносний приріст до контролю, %
		за роками		середня	
		2024	2025		
1. Контроль (без добрив)	0-20	79,8	80,4	80,1	—
	20-40	50,8	51,0	50,9	—
2. Барда, 10 т/га	0-20	80,5	80,9	80,7	+0,7
	20-40	51,0	51,4	51,2	+0,6
3. Барда, 20 т/га	0-20	86,9	87,6	87,3	+9,0
	20-40	53,3	53,3	53,3	+4,7
4. Барда, 30 т/га	0-20	90,9	92,7	91,8	+14,6
	20-40	55,2	55,6	55,4	+8,8
5. N ₉₀ P ₇₀ K ₁₇₀ (еквівалентно 10 т/га барди)	0-20	81,4	81,5	81,5	+1,7
	20-40	51,2	51,4	51,3	+0,8

У період післядії першого року також простежується виразний вплив попереднього внесення барди (Табл. 2). На контролі інтенсивність розкладу становила 80,1 % у верхньому шарі та 50,9 % у нижньому. За внесення барди у нормі 10 т/га активність дещо підвищилася (до 80,7 % та 51,2 %, відповідно), що відповідало відносним приростам 0,7 та 0,6 % у відповідних шарах ґрунту. Внесення 20 т/га забезпечило більш істотні зміни, але найвищі значення знову отримано у варіанті з нормою внесення барди 30 т/га, де інтенсивність розкладу перевищила контрольний варіант на 14,6 % та 8,8 % відповідно, що підтверджує пролонгований характер дії барди. Мінеральний варіант теж забезпечив підвищення у перший рік післядії – 1,7 % та 0,8 % у шарі 0–20 та 20–40 см.

Таблиця 3

Вплив післядії другого року внесення барди мелясної на целюлозолітичну активність ґрунту (дані за 2025 рік).

Варіант досліджу	Шар ґрунту, см	Інтенсивність розкладу, %	Відносний приріст до контролю, %
1. Контроль (без добрив)	0-20	80,4	–
	20-40	49,8	–
2. Барда, 10 т/га	0-20	80,8	+0,5
	20-40	49,9	+0,2
3. Барда, 20 т/га	0-20	82,0	+2,0
	20-40	50,6	+1,6
4. Барда, 30 т/га	0-20	82,8	+3,0
	20-40	51,2	+2,8
5. N ₉₀ P ₇₀ K ₁₇₀ (еквівалентно 10 т/га барди)	0-20	80,7	+0,4
	20-40	50,0	+0,4

У другий рік післядії загальна інтенсивність розкладу закономірно знизилася, проте навіть у цей період простежувалася позитивна реакція ґрунтових процесів на попереднє внесення барди (Табл. 3).

У варіанті з дозою барди 30 т/га активність становила 82,8 % у верхньому шарі та 51,2 % у нижньому, що відповідало відносним приростам 3,0 % та 2,8 %, відповідно.

4. Обговорення результатів

Здобуті у ході трирічних досліджень результати показали, що барда мелясна є потужним стимулятором целюлозолітичної активності дерново-підзолистого ґрунту. Підвищення інтенсивності розкладу лляного полотна свідчить про активацію мікроорганізмів, відповідальних за трансформацію органічної речовини, насамперед целюлози, яка на пряму відповідає за здатність розкладу рослинних решток.

У результаті проведених досліджень встановлено, що зі збільшенням дози від 10 до 30 т/га активність ґрунтових мікроорганізмів зростає і найбільший ефект отримано у верхньому шарі ґрунту. Післядія барди у першому та другому роках подальших спостережень є важливим свідченням її пролонгованої дії. Підвищена активність, особливо за норм 20 та 30 т/га, свідчить, що органічні компоненти барди мелясної розкладаються поступово, підтримуючи активність ґрунтових мікроорганізмів протягом тривалого часу. Збереження позитивного ефекту, навіть у другий рік після внесення, є підтвердженням того, що барда не лише моментально активізує біологічні процеси ґрунту, але й формує довготривалий ефект.

Відтак, отримані результати є аргументом для ствердження, що застосування барди здатне суттєво підвищити біологічний стан ґрунтів в агроекосистемах.

5. Висновки

Отримані результати показали, що барда мелясна істотно активізує целюлозолітичну діяльність дерново-слабопідзолистого ґрунту, і цей ефект найбільш виражений за внесення барди мелясної у дозі 30 т/га. Органічні сполуки барди забезпечують мікроорганізми доступним вуглецем, тому її дія є сильнішою, ніж вплив мінеральних добрив ($N_{90}P_{70}K_{170}$).

Підвищена активність мікробіоти зберігається не лише під час прямої дії, але й у період післядії першого та другого року, хоча й поступово знижується.

Отже, барда мелясна є ефективним добривом для посилення біологічної активності та поліпшення стану малородючих ґрунтів Західного Полісся.

Список використаних джерел

1. Іутинська Г. О. Ґрунтова мікробіологія: навчальний посібник. Київ: Арістей, 2006. 284 с.
2. Ковалець Ю. М. Трансформація гумусового стану дерново-підзолистих ґрунтів Західного Полісся України під впливом тривалого сільськогосподарського використання. *Збірник наукових праць Подільського аграрно-технічного університету*. 2007. Вип. № 15. С. 251-253.
3. Лико Д. В., Лико С. М., Портухай О. І., Безверха О. В. Целюлозолітична активність дерново-підзолистого ґрунту різних біотопів. *Агроєкологічний журнал*. 2017. Вип. № 4. С. 53-57. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2017.219729>
4. Повх О. В., Мерленко І. М. Стан мікробіоценозу дерново-підзолистого супіщаного ґрунту під впливом органічних добрив та мікробіологічних препаратів. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2013. Вип. 3. С. 61-64.
5. Ahmed, O., Suliman, A. M. E., & Elhardallou, S. B. Physicochemical, chemical and microbiological characteristics of vinasse, a by-product from ethanol industry. *American Journal of Biochemistry*. 2013. Vol. 3. № 3. P. 80-83. <https://doi.org/10.5923/j.ajb.20130303.03>

6. Anderson, T. H. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2003. Volume 98(1-3). 285-293. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00088-4)

7. Palmonari, A., Federiconi, A., Cavallini, D., Sniffen, C. J., Mammi, L., Turrone, S. ... Formigoni, A. Impact of molasses on ruminal volatile fatty acid production and microbiota composition in vitro. *Animals (Basel)*. 2023. Vol. 13. Is. (4). Art. 728. <https://doi.org/10.3390/ani13040728>

UDC: 631.445.2:631.879.3(477.8)

Features of soil cellulolytic activity under the influence of the molasses bard

R. Ya. Melymuka¹  ^a, A. V. Doliuk² ^b

¹ Polissia Research Station of the National Scientific Center "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky", Luts'k, Ukraine

² National Scientific Center "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky", Kharkiv, Ukraine

✉ r.melymuka22@gmail.com

ORCID: ^a0000-0003-2133-5654; ^b0000-0001-9849-4720

Received 26.11.2025; Revised 19.12.2025; Accepted 26.12.2025; Available online 30.12.2025

Abstract. The results of three-year studies assessing the impact of molasses on the cellulolytic activity of sod-podzolic sandy loam soil (Albic Arenosols) in Western Polissya of Ukraine presented. The studies conducted in 2023–2025. The effectiveness of the direct impact of molasses (during potato cultivation) and its aftereffects in the first (winter wheat) and second (oats) years assessed. The cellulolytic activity of the soil was determined by taking into account the intensity of cellulose decomposition according to the Mishustin method using linen fabric, which was laid in the two upper soil layers (0–20 and 20–40 cm). It is found that the application of molasses, regardless of the year of observation, significantly enhances the cellulolytic activity of soil microbiota, and the intensity of the effect increases in proportion to the application dose. The maximum values obtained at a dose of 30 t/ha, which indicates the high efficiency of molasses as a source of readily available organic carbon and a stimulator of microbiological processes. During the research, a prolonged effect of the action of molasses on microbiological activity was established. In the post-action period of the first year, cellulolytic activity remains significantly increased compared to the control, in the second year the intensity of cellulose decomposition decreases, but remains higher than in the control variant, which confirms the prolonged nature of the action of molasses. The results indicate the ability of molasses to significantly enhance soil microbiological processes, provide a long-term increase in the intensity of organic matter decomposition and improve the overall biological condition of the soil. A conclusion is made about the feasibility of using molasses as an effective organic fertilizer on sod-podzolic soils, and assumptions are made about the potential optimization of microbiological processes in low-fertility soils of Polissya.

Keywords: molasses; cellulolytic activity; soil microbiological activity; organic fertilizers; sod-podzolic soil.

Citing: Melymuka, R. Ya., & Doliuk, A. V. (2025). Features of cellulose-lytic activity of soil under the influence of molasses stillage. *AgroChemistry and Soil Science*, 99, 83-88. doi: 10.31073/acss99-09 [in Ukrainian].

References

1. Iutyn'ska, H. O. (2006). *Soil Microbiology*. Kyiv: Aristey [in Ukrainian].
2. Kovalets, Y. M. (2007). Transformation of humus status of sod-podzolic soils of Ukrainian Western Polissya under the influence of long-term agricultural use. *Collection of scientific papers of Podolsk Agrarian Technical University*, 1(15), 251–253 [in Ukrainian].
3. Lyko, D. V., Lyko, S. M., Portukhay, O. I., & Bezverkha, O. V. (2017). Cellulolytic activity of sod-podzolic soils on different biotops. *Agroecological Journal*, 4, 53-57. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2017.219729> [in Ukrainian].
4. Povkh, O. V., & Merlenko, I. M. (2013). State of microbiocenosis of sod-podzolic soil under the influence of organic fertilizers and bacterial substance. *Collection of scientific papers of Sumy National Agrarian University*, 3, 61–64 [in Ukrainian].
5. Ahmed, O., Sulieman, A. M. E., & Elhardallou, S. B. (2013). Physicochemical, chemical and microbiological characteristics of vinasse, a by-product from ethanol industry. *American Journal of Biochemistry*, 3(3), 80-83. <https://doi.org/10.5923/j.ajb.20130303.03>
6. Anderson, T. H. (2003). Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 98(1-3), 285-293. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00088-4)
7. Palmonari, A., Federiconi, A., Cavallini, D., Sniffen, C. J., Mammi, L., Turrone, S. ... Formigoni, A. (2023). Impact of molasses on ruminal volatile fatty acid production and microbiota composition in vitro. *Animals (Basel)*, 13(4), 728. <https://doi.org/10.3390/ani13040728>

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР «ІНСТИТУТ АГРОХІМІЇ ТА ҐРУНТОЗНАВСТВА
ІМЕНІ О. Н. СОКОЛОВСЬКОГО»**

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

АГРОХІМІЯ І ҐРУНТОЗНАВСТВО
міжвідомчий тематичний науковий збірник

2025
ВИПУСК 99

Періодичність видання – два рази на рік

Відповідальний за випуск **канд. с.-г. наук Т. М. Лактіонова**

Адреса редакції: 61024, Харків, вул. Михайля Семенка, 4,
тел.: (057) 704-16-69
e-mail: agrochemsoilsci.org@gmail.com;
[www. agrochemsoilsci.org](http://www.agrochemsoilsci.org)
