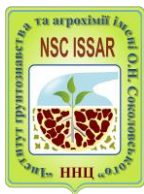




НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК
УКРАЇНИ



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

АГРОХІМІЯ і ҐРУНТОЗНАВСТВО

МІЖВІДОМЧИЙ
ТЕМАТИЧНИЙ
НАУКОВИЙ
ЗБІРНИК

98

ХАРКІВ
2025

УДК 636.4:001(062.552)

A 26

Агрохімія і ґрунтознавство : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ «ІґА імені О. Н. Соколовського». Харків, 2025. Вип. 98. 109 с.

Agrochemistry and Soil Science : Collected papers / NSC ISSAR named after O. N. Sokolovsky. Kharkiv, 2025. Is. 98. 109 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». Адреса: 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 (ІПРІ);
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 № 20 від 17.06.2025 р.

ISSN 0587-2596

e-ISSN 2616-6852

Media ID R30-02658

DOI: <https://doi.org/10.31073/acss98>

© Національний науковий центр
«Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О. Н. Соколовського»

ЗМІСТ / CONTENT

ВЛАСТИВОСТІ Й РЕЖИМИ ҐРУНТІВ SOIL PROPERTIES and MODES

Бігун О. М.

- Збереження ґрунтових даних в Україні: досягнення і перспективи
Bihun O. M. Soil data rescue in Ukraine: achievements and future opportunities 4–18

Dmytruk Y. M., Palamarchuk R. P., Zhukova Y. F., Stepanenko N. V.

- Pedotransfer functions for prediction of soil organic carbon content for Chernozems
Haplic and Calcic: A Case Study from the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine
*Дмитрук Ю. М., Паламарчук Р. П., Жукова Я. Ф., Степаненко Н. В. Педотрансферні
функції для прогнозування вмісту органічного вуглецю в чорноземах типових і
звичайних на прикладі Лівобережного Лісостепу України*..... 19–35

Соловей В. Б., Троценко О. О.

- Вплив гідротермічного режиму на міграцію карбонатів кальцію у темно-сірих
опідзолених ґрунтах на схилах різних експозицій у Харківській області
*Solovei V. B., Trotsenko O. O. The influence of the hydrothermal regime on the migration
of calcium carbonates in dark gray podzolized soils on slopes with different exposures
in Kharkiv region* 36–54

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ IMPROVEMENT OF RESEARCH METHODS

Солоха М. О., Винокурова Н. В.

- Важливість вибору індексу рефракції у визначенні ґранулометричного складу
ґрунту методом лазерної дифракції
*Solokha M. O., Vynokurova N. V. Importance of choosing the refractive index for determining
soil granulometric composition by laser diffraction*..... 55–68

Христенко А. О., Лісовий М. В., Волошенюк О. П.

- Рівень трофності орних ґрунтів України та перспективні напрями оптимізації
живлення сільськогосподарських культур у сучасних умовах (експертний аналіз)
*Khristenko A. O., Lisovyi M. V., Volosheniuk O. P. Trophic level of arable soils of Ukraine
and promising directions for optimizing nutrition of agricultural crops in modern conditions
(expert analysis)* 69–83

**Цапко Ю. Л., Водяк Я. М., Зубковська В. В., Паламарь Н. Ю., Троценко О. О.,
Шевченко Т. В.,**

- Науково-методичні аспекти культивування енергетичних культур на мілітарно
деградованому ґрунті в посушливих умовах
*Tsapko Y. L., Vodiak Y. M., Zubkovska V. V., Palamar N. Yu., Trotsenko O. O.,
Shevchenko T. V. Scientific and methodological aspects of cultivating energy crops on
militarily degraded soil in arid conditions*..... 84–90

ІСТОРІЯ НАУКИ HISTORY OF SCIENCE

Кунець В. В., Лактіонова Т. М., Парасочка І. Ф.

- Український поступ в історії створення Міжнародного та національного
товариств ґрунтознавців (1907–1928) (оглядова)
*Kunets V. V., Laktionova T. M., Parasochka I. F. The Ukrainian path in the history of the
creation of the International and National Soil Science Societies (1907–1928) (review)*..... 91–108

ВЛАСТИВОСТІ Й РЕЖИМИ ҐРУНТІВ SOIL PROPERTIES and MODES

УДК 631.4:004.65(477)

Збереження ґрунтових даних в Україні: досягнення та перспективи

О. М. Бігун

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

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 07.01.2025 Отримано після доопрацювання 14.05.2025 Затверджено до видання 17.06.2025 Доступно онлайн 01.07.2025 <i>Ключові слова:</i> ґрунтові дані; база даних «Властивості ґрунтів України»; національні ґрунтово-інформаційні продукти; інтеграція даних.	Ґрунти відіграють ключову роль у вирішенні суспільних викликів, таких як забезпечення продовольчої безпеки та адаптація до зміни клімату. Інформація, зібрана у ґрунтових базах даних, є важливим ресурсом для оцінювання якості ґрунтів та їхніх екосистемних функцій. В оглядовій статті проаналізовано досягнення України у збереженні ґрунтових даних, зокрема представлено поточний вміст бази даних «Властивості ґрунтів України» ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського» та національних ґрунтово-інформаційних продуктів, розроблених із її використанням. Також розглянуто інтеграцію даних про ґрунти України до міжнародних баз даних, зокрема EU-HYDI та SOTER-SOVEUR. База даних «Властивості ґрунтів України» містить 10095 записів про фізичні та хімічні параметри для 1923 ґрунтових профілів, а також 228 записів із результатами обстежень поверхневого шару ґрунтів. Близько 32,9 % записів представлено на Платформі нейтрального рівня деградації земель сільськогосподарського призначення ФАО-ГГП, частка інтеграції інформації до інших баз даних варіює від 1,6 % (база даних національної карти запасів органічного вуглецю) до 3,9 % (EU-HYDI). Надано опис джерел даних про властивості ґрунтів України у глобальній базі даних WoSIS (snapshot 2023), що є важливим для їх обґрунтованого використання у наукових дослідженнях. Визначено напрями розвитку національних баз даних, які передбачають інтеграцію заходів зі збереження ґрунтових даних до наукових програм та проєктів, налагодження обміну інформацією між установами та науковими колективами, а також визнання постачальників даних повноцінними співавторами інформаційних продуктів. Перспективним є використання накопиченої у національних БД інформації для створення тематичних наборів даних, узгоджених із принципами FAIR, а також розробки національних та регіональних карт засобами цифрового картографування та моделювання ґрунтів. Налагодження співпраці між дослідниками та зацікавленими сторонами є критично важливим для забезпечення сучасних інформаційних потреб та збереження ґрунтових даних для локальних і глобальних дослідницьких завдань. Підтримка принципів відкритої науки сприятиме збереженню та повторному використанню ґрунтових даних, їх інтеграції в міждисциплінарні дослідження задля вирішення локальних та глобальних екологічних проблем, а також розвитку нових наукових напрямів у ґрунтознавстві.

✉ oksana_bigun@ukr.net

ORCID: 0000-0002-8461-4928

Форма цитування: Бігун О. М. Збереження ґрунтових даних в Україні: досягнення та перспективи. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ «ІГА ім. О. Н. Соколовського». Харків, 2025. Вип. 98. С. 4–18. doi: 10.31073/acss98-01

1. Вступ

Ґрунт є цінним невідновлюваним ресурсом, що забезпечує низку екосистемних послуг та відіграє ключову роль у подоланні глобальних викликів, пов'язаних із продовольчою безпекою, зміною клімату та втратою біорізноманіття [1–3].

Упродовж останнього десятиліття, завдяки діяльності Глобального ґрунтового партнерства (ГГП) та національних ґрунтово-інформаційних центрів до політичних діячів поступово прийшло усвідомлення, що ґрунти, як і інші природні ресурси потребують правового захисту та невідкладних заходів відновлення. У зв'язку з чим, законодавчими органами багатьох країн було схвалено національні плани та ініціативи щодо їх збереження [3–6].

Ґрунти відіграють ключову роль у досягненні амбітної мети ЄС в межах Європейського зеленого курсу — стати першим вуглецево-нейтральним

континентом до 2050 р. й стійким до змін клімату, а також перейти до стійкої та циркулярної (біо)економіки [7, 8]. Для реалізації політики збереження та відновлення ґрунтів Європейська Комісія ухвалила нову Стратегію ЄС щодо ґрунтів, якою передбачено конкретні заходи для відновлення ґрунтових екосистем і забезпечення їх сталого використання до 2050 року. Для відстеження прогресу у досягненні цих цілей створено Ґрунтову обсерваторію, покликану інформувати суспільство про стан земельних ресурсів ЄС [9]. Одним із ключових завдань якої є інтерпретація даних, зібраних у ґрунтових базах даних (БД) (континентальній БД LUCAS Soil, національних та регіональних БД країн ЄС), для розробки узгоджених індикаторів здоров'я ґрунтів та програм моніторингу просторово-часових їх змін на національному й європейському рівнях [9, 10].

Ґрунтова інформація набуває дедалі більшої ваги в рамках глобальних міжнародних екологічних угод та ініціатив, таких як Конвенція про зміну клімату (UNFCCC), Конвенція про боротьбу з опустелюванням (UNCCD), Цілі сталого розвитку (UN SDG) і, відповідно, дані про ґрунти стають ключовими для розробки стратегій їх захисту та відновлення [11].

У багатьох частинах світу докладають значних зусиль щодо збереження ґрунтових даних. Зокрема, впродовж останнього десятиліття значно активізувалося створення баз даних, ґрунтово-інформаційних систем та відкритих платформ із доступом до інформації про ґрунти у країнах Південної Америки [12–16] та Африки [17].

Ґрунтові бази даних є інформаційною основою для різних дослідницьких цілей. Зокрема, дані про властивості ґрунтів використовуються ученими для оцінювання потенціалу земельних ресурсів, аналізу екологічних функцій ґрунту, а також для прогнозування поведінки ґрунтів у різних умовах [18–20].

В Україні існують поодинокі роботи, присвячені розробці ґрунтових баз даних та їх застосуванню. Найбільш примітним і добре задокументованим ресурсом ґрунтових даних є розроблена у 2000-х роках база даних «Властивості ґрунтів України» лабораторії геоєкофізики ґрунтів ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського» [21]. Ця база даних тривалий час слугує цінним джерелом інформації для широкого кола досліджень [22] і використана, зокрема для створення різних ґрунтово-інформаційних продуктів [23, 24].

Мета наукової публікації: узагальнити досягнення у збереженні ґрунтових даних в Україні, зокрема надати інформацію про поточний вміст БД «Властивості ґрунтів України» і залучення цих даних до національних і міжнародних БД; визначити перспективні напрями досліджень із використанням ґрунтових БД; висвітлити сучасні вимоги до поширення ґрунтової інформації. Метою також є визначити походження ґрунтових даних для України у глобальній БД WOSIS, щоб користувачі ґрунтової інформації могли оцінити доцільність їх застосування у власних наукових розробках.

2. Поточний стан та досягнення у збереженні ґрунтових даних

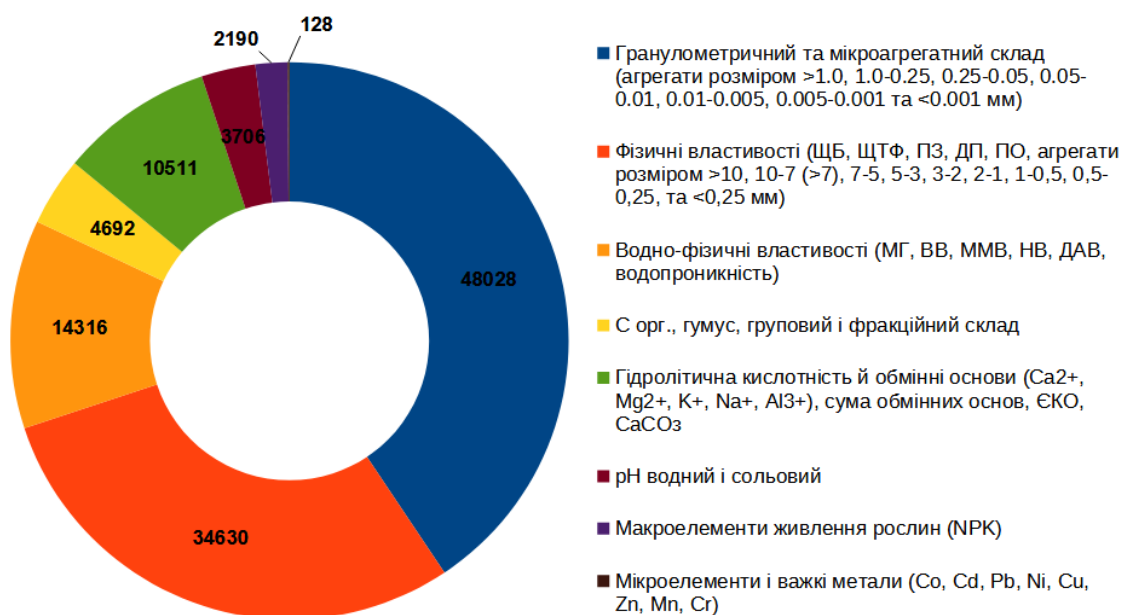
2.1. Збереження ґрунтових даних у БД «Властивості ґрунтів України»

База даних «Властивості ґрунтів України» є результатом багаторічної роботи колективу лабораторії геоєкофізики ґрунтів, спрямованої на систематизацію та узагальнення інформації про фізичні та водно-фізичні властивості ґрунтів України. Основою для створення БД і першим джерелом інформації став «Довідник агрофізичних властивостей», що містив результати експедиційних обстежень ґрунтів Степу України (1961–1974 рр.), і який згодом було доповнено відомостями про властивості ґрунтів інших природних зон країни [23]. На початку 2000-х років було розроблено структуру БД, а накопичений матеріал було введено в електронні

таблиці. У подальшому, наповнення БД здійснювали з використанням різноманітних джерел, таких як дисертації, наукові статті та монографії, архівні матеріали лабораторії та ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського» й особисті архіви науковців [23].

На етапі створення, уміст БД було структуровано за допомогою мови програмування та системи керування реляційними базами даних Visual FoxPro [21], нині її адміністрування здійснюється з використанням табличних процесорів.

БД містить 6 основних електронних таблиць, у яких систематизовано записи щодо загальної характеристики території, де закладено розріз, класифікаційної приналежності ґрунтових відмін та їх ідентифікації на картах різного масштабу, а також інформацію про джерела даних та методи визначення показників. На даний момент (станом на грудень 2024 р.) БД містить відомості про фізичні та хімічні властивості для різних ґрунтових відмін, обстежених у період 1955–2014 рр.. Означена БД є найбільшою компіляцією ґрунтових даних для України із 10095 записами про виміряні параметри, переважно фізичних показників (Рис. 1) для 1923 ґрунтових профілів, у тому числі 228 записів із результатами обстежень лише верхнього шару ґрунтів.



Скорочення: ЩБ — щільність будови, ЩТФ — щільність твердої фази, ПЗ — пористість загальна, ДП — диференційна пористість, ПО — питомий опір ґрунту; МГ — максимальна гігроскопічність, ВВ — вологість в'янення, ММВ — максимальна молекулярна вологоємність, НВ — найменша вологоємність, ДАВ — діапазон активної вологи, ЄКО — ємність катіонного обміну

Рис. 1. Кількість записів у БД «Властивості ґрунтів України»

Від моменту створення БД слугувала основним джерелом інформації для побудови тематичних карт властивостей ґрунтів, із використанням яких було розроблено агрономічно орієнтоване районування орних земель України [25], а також виконано оцінку їх інвестиційної привабливості для вирощування польових культур [26]. Крім того, дані, зібрані у БД, було використано для створення локальних педотрансферних моделей фізичних і водно-фізичних властивостей [27, 28]. Більш докладно про історію створення БД, опис структури та напрями її використання наведено у публікаціях Т. М. Лактіонової та ін. [21–23].

Саме дані, накопичені у БД «Властивості ґрунтів України», стали основою для інформаційних продуктів, які було розроблено за участі науковців ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського», таких як БД національної карти запасів органічного вуглецю [24], «Платформи нейтрального рівня деградації земель

сільськогосподарського призначення» [29], БД «Ґрунти України» Українського ґрунтового інформаційного центру [30]. Уміст БД також інтегровано до Європейської бази гідропедологічних даних (EU-HYDI) [31], а також баз даних SOTER-SOVEUR [23, 32] та WoSIS [19, 33] Міжнародного інституту ґрунтових досліджень (ISRIC).

На рисунку 2 показано хронологію створення ґрунтово-інформаційних продуктів, а нижче по тексту наведено інформацію про обсяги даних, експортованих із БД «Властивості ґрунтів України», зокрема зазначено перелік і кількість показників, включених до кожного продукту.

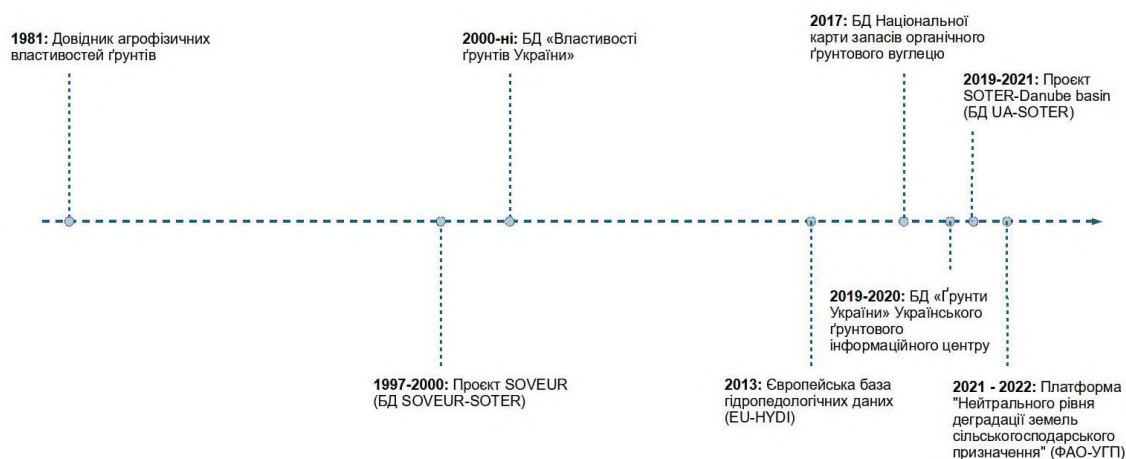


Рис. 2. Хронологія створення БД «Властивості ґрунтів України» та використання ґрунтових даних у національних та міжнародних ґрунтово-інформаційних продуктах

2.2. Збереження наборів ґрунтових даних у національних ґрунтово-інформаційних продуктах

Першою важливою ініціативою зі збереження ґрунтових даних саме у національних інформаційних продуктах стало створення карти запасів органічного вуглецю в ґрунтах України [34], реалізованої за підтримки Глобального ґрунтового партнерства. У розробці карти взяли участь дослідники із 11 наукових установ та 5 закладів вищої освіти.

Для створення репрезентативного набору даних національної карти відповідно специфікацій ФАО було розроблено структуру тематичної БД [24], яка включала перелік показників, необхідних для обліку запасів органічного вуглецю у ґрунтах із різним типом господарського використання (Рис. 3а).

Завдяки спільним зусиллям науковців створено базу даних, яка містить записи про властивості для 4379 ґрунтових профілів, 1121 із яких (21% від загальної кількості) делеговано із БД «Властивості ґрунтів України» (Рис. 3б).

Наступною ініціативою, підтриманою Продовольчою та сільськогосподарською організацією ООН (ФАО) та Глобальним екологічним фондом, стало створення загальнодоступного цифрового продукту — «Платформи нейтрального рівня деградації земель сільськогосподарського призначення» [29].

Платформа містить записи про властивості ґрунтів у межах ґрунтових профілів (шар «Ґрунтові розрізи»), а також дані обстежень поверхневого шару ґрунтів на моніторингових ділянках ДУ «Інститут охорони ґрунтів України» (шар «Моніторингові ділянки»).

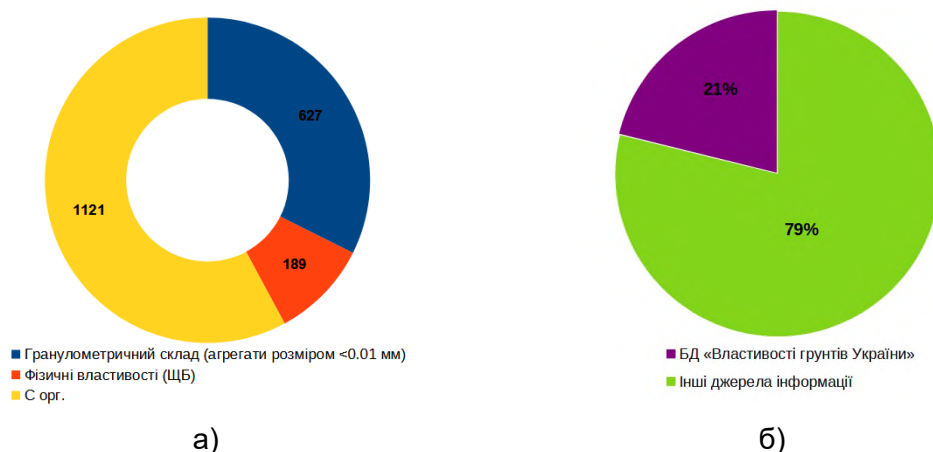


Рис. 3. Кількість записів властивостей ґрунтів (а) та їх частка (б) від загального вмісту даних, що інтегровано із БД «Властивості ґрунтів України» до БД Національної карти запасів органічного вуглецю (скорочення: ЩБ — щільність будови)

Основним джерелом інформації щодо морфологічних характеристик ґрунтових відмін, а також їхніх фізичних (7 показників) та хімічних (13 показників) властивостей по профілю ґрунту є БД лабораторії геоєкофізики (Рис. 4а). Усього на платформі представлено записи для 993 ґрунтових розрізів, експортованих із БД (99 % від загальної кількості записів представлених на платформі) та 7 ґрунтових профілів із інших джерел (Рис. 4б). Цей набір даних є доступним за посиланням: <https://ismld.com.ua/> (доступ станом на 22 жовтня 2024 р.).

Авторка статті не брала участі в передачі інформації до Платформи, лише виконала аналіз набору даних для підготовки цього рукопису.

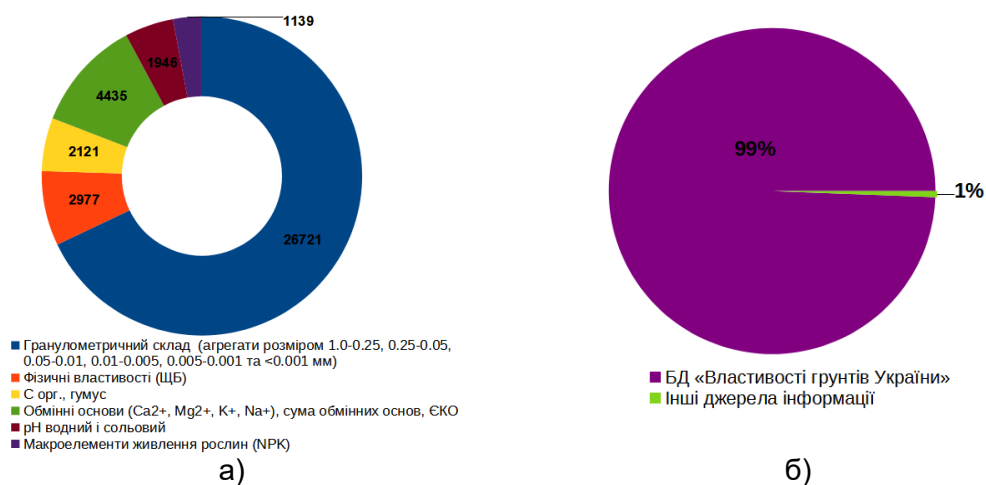


Рис. 4. Кількість записів властивостей ґрунтів (а) та їх частка (б) у загальному наборі даних, інтегрованих до «Платформи нейтрального рівня деградації земель сільськогосподарського призначення» (шар — «ґрунтові розрізи»). Скорочення: ЩБ — щільність будови; ЄКО — ємність катіонного обміну

2.3. Збереження ґрунтових даних у міжнародних ґрунтово-інформаційних продуктах

Уперше українські науковці долучилися до збору ґрунтових даних для глобальної бази даних ґрунтів та земель SOTER [35] у межах проекту SOVEUR (1997–2000 рр.), метою якого було оцінити вразливість ґрунтів Центральної та Східної Європи до дифузного забруднення, а також поширеність антропогенної деградації земель [36, 37].

Методологія формування БД SOTER включала створення геометричного компонента (карти полігонів територіальних одиниць SOTER, які охоплюють однотипні території з подібним рельєфом, літологією та ґрунтовим покривом) та наповнення реляційної бази даних інформацією про ґрунтові властивості кожної територіальної одиниці. Усього у межах проєкту було залучено 75 ґрунтових профілів на території України для SOTER-карти масштабу 1:2,5 млн [37].

Окрім параметрів фізичних та хімічних властивостей (Рис. 5) атрибутивна частина БД вміщує інформацію про морфологічну формулу ґрунту, його класифікаційне позначення за легендою карти FAO-88, а також клас гранулометричного складу за класифікацією USDA.

Уміст БД SOTER-SOVEUR є у вільному доступі на веб-сервісі ISRIC Soil Data Hub, а набори даних інтегровано до глобальних продуктів Міжнародного довідкового інформаційного центру із питань ґрунтів (ISRIC), зокрема до баз даних WISE [38] та WoSIS [19, 33].

Окрім того, 52 ґрунтові профілі з бази «Властивості ґрунтів України» було передано до SOTER у рамках проєкту Об'єднаного дослідницького центру Європейської Комісії (JRC), спрямованого на підтримку Дунайської стратегії [39]. Ці дані згодом теж стали частиною глобальної бази WoSIS.

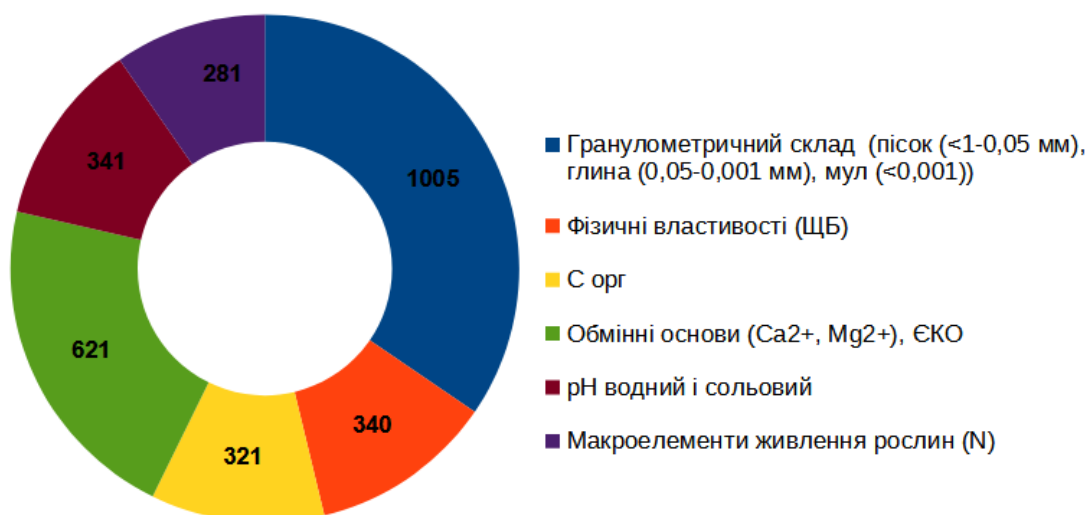


Рис. 5. Кількість записів властивостей ґрунтів у БД SOTER-SOVEUR (скорочення: ЩБ — щільність будови; ЕКО — ємність катіонного обміну)

У 2013 р. українські науковці долучилися до створення комплексної багатоцільової бази даних Європейського кадастру гідропедологічних даних (EU-HYDI), ініційованого JRC [31]. Набір даних для України включає 4692 записи про хімічні та фізичні властивості ґрунтів для 95 ґрунтових профілів (Рис. 6).

Спочатку, за спільною згодою авторів, первинні дані EU-HYDI були доступні лише її розробникам. Проте протягом багатьох років JRC отримував численні запити від зовнішніх організацій щодо доступу до вмісту БД. Частина постачальників, зокрема й Україна, погодилися надати ліцензію на публічне поширення національних наборів даних, і з липня 2024 р. вони доступні на платформі Європейського центру даних про ґрунти [40].

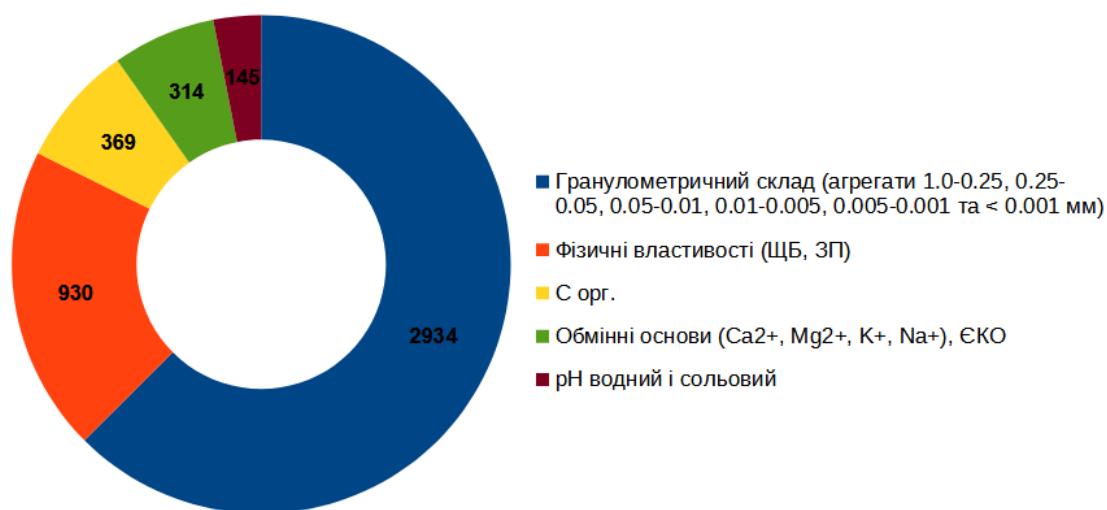


Рис. 6. Кількість записів властивостей ґрунтів у БД EU-HYDI (скорочення: ЩБ — щільність будови, ЗП — пористість загальна, ЄКО — ємність катіонного обміну)

2.4. Дані про властивості ґрунтів України у глобальній БД WoSIS

У цій публікації також докладніше розглянемо ґрунтові дані, представлені у глобальній базі даних WoSIS — сервісу Світового центру ґрунтових даних (WDC- Soils).

Міжнародний довідковий центр ґрунтів (ISRIC), акредитований Міжнародним програмним офісом Всесвітньої системи даних (WDS) як Світовий центр даних про ґрунти та має мандат на збір, аналіз і поширення інформації про ґрунти. Центр колекціонує та упорядковує дані з усього світу в ґрунтово-інформаційному сервісі WoSIS. Наповнення цієї бази даних здійснюється завдяки добровільним внескам власників та постачальників даних, які надають згоду на їх публікацію відповідно до ліцензії відкритого доступу. Зокрема, до БД інтегруються дані із національних баз даних і тематичних наборів, представлених у відкритому доступі, а також компіляційних БД, створених за участі ISRIC.

Стандартизовані дані БД WoSIS поширюються двома способами:

1. Динамічний набір даних (wosis_latest): постійно поповнюється новими точковими даними, доступний через такі сервіси, як ISRIC Data Hub і платформа SoilGrids;

2. Статичний набір даних (wosis_snapshot): фіксує вміст бази даних на певний момент часу, доступний у форматі TSV. Статичний набір обов'язково супроводжується публікацією, що описує зміни у структурі та моделі бази даних, процедури стандартизації й уніфікації підготовлених даних, а також їх кількість і якість [19, 33].

БД WoSIS вміщує фізичні та хімічні показники властивостей ґрунтів, а також специфічну інформацію щодо методів визначення властивостей (наприклад, обмеження розміру класу для текстурних фракцій ґрунту, співвідношення ґрунт/розчин під час вимірювання pH тощо). Для кожного профілю також надано класифікацію ґрунтів за системами FAO, WRB, USDA, а також позначення ґрунтових горизонтів, якщо вони були зазначені у вихідних базах даних.

Поточний набір даних у БД WoSIS для України містить 462 унікальні ділянки (site) та 543 ґрунтові профілі (WoSIS snapshot 2023), які включають інформацію про типи ґрунтів та їхні властивості. Джерелами інформації цього набору є шість різних баз даних: WD-ISIS, EU-SOTER, UA-SOTER, WD-WISE, EU-GEMAS та RU-SPDB (Рис. 7). Нижче представимо опис наборів ґрунтових даних із цих БД.

1. WD-ISIS — це база даних Колекції еталонних ґрунтових профілів ISRIC, яка містить описи репрезентативних ґрунтових одиниць, виділених у легенді ґрунтової карти світу [41]. Для України в цій базі даних представлено описи двох ґрунтових типів: чорнозему (Дніпропетровська обл.) та солонцю (Херсонська обл.).

2. EU-SOTER — набір даних, інтегрований у WoSIS із БД SOTER-SOVEUR [36]. Він містить 2400 записів про властивості ґрунтів, що становить 34 % від загального обсягу даних про властивості ґрунтів у WoSIS для України. Набір охоплює 81 ґрунтовий профіль, 9 з яких належать країнам, що межують з Україною.

3. UA-SOTER — набір даних, створений у межах проєкту із формування БД SOTER для басейну Дунаю [38], має 675 записів (9,6 % від загального обсягу даних для України) для 52 ґрунтових профілів, розташованих в Одеській, Чернівецькій, Львівській та Івано-Франківській областях.

4. WD-WISE — це дані, отримані ISRIC у межах проєкту WISE, шляхом заповнення прогалин у первинних базах SOTER за допомогою статистичного аналізу вибірок, згрупованих за таксономічними типами ґрунтів [37]. Набір даних для України охоплює 87 ґрунтових профілів і містить 2713 записів властивостей, що становить 38,5 % від загального обсягу даних.

5. EU-GEMAS — база даних із результатами обстеження ґрунтів, проведеного в межах проєкту GEMAS, який було спрямовано на створення якісного та порівняльного набору даних для оцінювання геохімічного фону та концентрацій елементів у ґрунтах сільськогосподарських і пасовищних угідь Європейського континенту [42]. Зразки ґрунтів відбирали на орних ділянках із шару 0–20 см та землях із постійним рослинним покривом із шару 0–10 см у 2008–2009 рр. за регулярною сіткою 50×50 км², а їх аналіз виконували в європейських лабораторіях. Для України цей набір містить 317 точок (158 — орні ділянки, 159 — перелогові) з показниками: рН, вмісту загального вуглецю, гранулометричних фракцій пилю (0,05–0,002 мм) і мулу (<0,002 мм). Загальна кількість записів даного набору — 1105, що становить 15,7 % від загального вмісту даних для України (Рис. 7).

6. RU-SPDB — містить 160 записів із інформацією про фізичні, водно-фізичні та хімічні властивості ґрунтів для 4 ґрунтових профілів у Сумській, Миколаївській та Одеській областях.

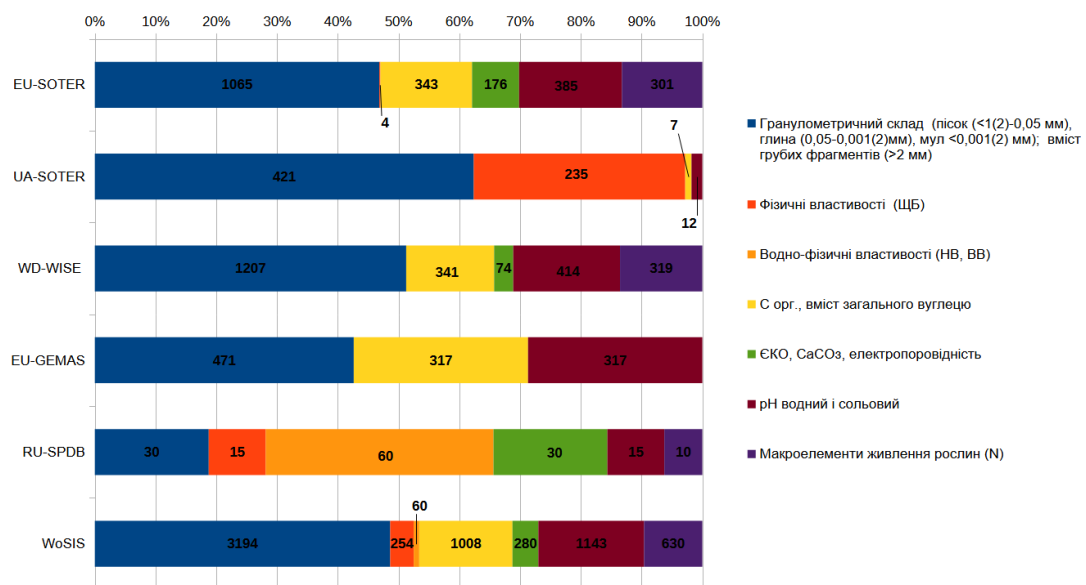


Рис. 7. Кількість записів окремих груп властивостей ґрунтів, відносний та загальний їх вміст у наборі даних WoSIS (WoSIS snapshot 2023) для України (скорочення: ЩБ — щільність будови, НВ — найменша вологемістність, ВВ — вологість в'янення, СКО — ємність катіонного обміну)

3. Перспективи збереження ґрунтових даних та напрями їх використання

База даних «Властивості ґрунтів України» стала основою для розробки національних ґрунтово-інформаційних продуктів та формування наборів даних про властивості ґрунтів у міжнародних базах (див. рис. 2). Найбільший обсяг даних (32,9 % поточного вмісту) інтегровано до національної «Платформи нейтрального рівня деградації земель сільськогосподарського призначення» ФАО-ГГП. Частка внесеної інформації до інших баз даних варіює від 1,6 % (БД національної карти запасів органічного вуглецю) до 3,9 % (EU-HYDI).

До різних баз даних включено записи про фізичні та хімічні властивості ґрунтів (див. рис. 3–6). Окрім того, БД містить цінну інформацію про водно-фізичні характеристики, які відсутні в інших базах даних і можуть слугувати основою для створення спеціалізованої тематичної бази. Подібні бази даних, такі як HYBRAS [43] у Бразилії, HUNSODA [44] і MARTHA [45] в Угорщині, HYPRESCZ [46] у Чехії та SOLHYDRO [47] у Франції, активно використовуються для розроблення локальних прогнозів водно-фізичних показників та оцінки продуктивних запасів ґрунтової вологи [48].

Збереження ґрунтових даних у національних ґрунтово-інформаційних продуктах здійснювалося завдяки участі дослідників із різних установ. Наприклад, до формування набору даних для карти запасів органічного вуглецю долучилося 104 науковці із різних наукових та освітніх закладів [24]. Зауважимо, що лише 21 % записів для цієї мапи отримано з бази даних «Властивості ґрунтів України», тоді як 79 % – залучено з інших джерел (див. рис. 3б). Це вказує на наявність значного обсягу ґрунтових даних, які залишаються незбереженими та зосереджені в особистих колекціях науковців і дослідницьких груп в Україні.

Приклади співпраці дослідників із різних установ у Чилі, Бразилії та Ефіопії у створенні національних баз ґрунтових даних та різних інформаційних продуктів підкреслюють важливу роль спільних зусиль у збереженні значних обсягів ґрунтової інформації, яка є необхідною для оцінки стану ґрунтових ресурсів. У Чилі, наприклад, дослідники із 39 приватних та національних організацій об'єдналися, щоб створити найбільшу БД запасів органічного вуглецю (CHLSOC), яка вміщує записи для 13 612 точок [13]. У Бразилії національне товариство ґрунтознавців за участі понад 60 науковців із різних установ створило платформу для стандартизованого зберігання та управління ґрунтовими даними «febrg», на якій вдалося акумулювати 14 477 записів ґрунтових обстежень [49]. В Ефіопії, група науковців ініціювала Коаліцію зацікавлених установ і фахівців зі збереження та обміну ґрунтовими та агрономічними даними. Завдяки зусиллям спеціально організованої в межах даної Коаліції робочої групи, до національної БД інтегровано понад 20 000 ґрунтових профілів із 88 різних джерел [50].

Збір, стандартизація та обмін ґрунтовими даними є ключовими для інтеграції інформації та забезпечення повторного використання наявних даних у процесі відпрацювання способів управління ґрунтовими ресурсами. Основними постачальниками такої інформації для національних баз даних та інформаційних систем України є наукові, освітні та державні установи, а також приватні компанії, які проводять ґрунтові обстеження в рамках дослідницької або виробничої діяльності.

Необхідно також забезпечити безперервний процес збирання ґрунтових даних, зокрема необхідно включити відповідні заходи до наукових програм і проєктів, а також сприяти обміну даними між науковими колективами у межах створення спільних дослідницьких продуктів. Наприклад, ISRIC активно та

безперервно працює над збиранням і стандартизацією ґрунтових даних, інтегруючи до БД WoSIS як історичні записи (зокрема, результати обстежень 1920-х років), так і нові набори даних, отримані в межах поточних європейських проєктів, таких як LUCAS та EU-HoliSoils. Завдяки цим зусиллям обсяг БД WoSIS збільшився у 2,4 раза — з 96 тисяч ґрунтових профілів у 2016 до 228 тисяч у 2023 р. [19]. Для України кількість профілів зросла з 79 до 469 за цей період. Варто також зауважити, що до збирання даних, а також їх верифікації та стандартизації залучено велику команду техніків, ґрунтознавців, геодезистів та інженерів.

Одним із важливих інструментів залучення нових учасників до процесу збереження ґрунтової інформації є дотримання авторських прав власників та постачальників даних. Загальноприйнятою практикою у межах спільних ініціатив зі збирання даних є визнання авторів, які самостійно заповнюють таблиці-шаблони у стандартизованому форматі, як рівноправних співавторів створених БД та ґрунтово-інформаційних продуктів. Наприклад, авторами Європейської бази даних водної ерозії (EUSEDcollab) стали 43 дослідники [51], національної чилійської БД запасів органічного вуглецю (CHLSOC) — 64 [13], бази даних ґрунтово-інформаційної системи Латинської Америки та Карибського басейну (SISLAC) — 43 [15].

Інформація про ґрунти та їх властивості здобувається шляхом трудомістких польових обстежень та лабораторних вимірювань, що спонукає ґрунтознавців до пошуку різних способів збереження та повторного використання отриманих даних. Ґрунтові дані, накопичені за понад 70 років у базах даних різних країн і відомі в міжнародній літературі як «успадковані» або «історичні», активно використовуються в цифровому картографуванні ґрунтів [52]. Вони слугують основою для створення карт ґрунтів і оцінки придатності ґрунтового покриття до сільськогосподарського використання [53–55], аналізу просторово-часових змін у властивостях ґрунтів [56], а також для розробки інноваційних методів удосконалення просторових прогнозів із використанням цифрових технологій картографування та моделювання [57–59].

Такі ініціативи, як GlobalSoilMap [51], GloSIS [60], SoilGrid [61], EUSO Soil Health Dashboard [9], OpenLandMap [62] та Soil Health Data Cube for pan-EU [63] демонструють успішну інтеграцію історичних ґрунтових даних для створення високоякісних інноваційних інформаційних продуктів.

Яскравим прикладом інтеграції ґрунтових даних для створення інноваційних національних інформаційних продуктів є досвід Австралії, яка вважається лідером у застосуванні цифрового картографування і є однією з перших країн, що поєднала історичні ґрунтові дані, нові спектроскопічні вимірювання, машинне навчання та просторове моделювання для створення високоточних карт ґрунтових властивостей із роздільною здатністю 90 м. Результатом таких зусиль стало впровадження національного цифрового продукту — Ґрунтової та ландшафтної сітки Австралії (SLGA), який широко використовується політиками, науковцями, освітянами, агроконсультантами, розробниками додатків та громадськістю [18].

У США історичні ґрунтові дані, зібрані у національній БД, використовуються в рамках ініціативи Soils2026, яка має на меті створення вичерпного і актуального кадастру ґрунтів усієї території країни шляхом розробки нових ґрунтових інформаційних продуктів із застосуванням технологій цифрового картографування — гнучких, детальних растрових карт для інтерпретації фізичних, хімічних і біологічних властивостей ґрунтів [64].

Дослідники Medeiros et al. [20] у своєму огляді, присвяченому використанню історичних ґрунтових даних для цифрового картографування, наголошують, що не лише наявність, але й доступність таких даних суттєво прискорюють розвиток цифрового картографування та слугують основою для нових локальних досліджень.

Принципи відкритої науки набувають все більшого поширення, зокрема в галузях ґрунтознавства та агрономії. Політика відкритих даних, яку вже прийняли багато наукових журналів, вимагає від авторів публікувати первинні дослідницькі дані разом зі статтями як додатковий матеріал або надавати посилання на місця їх зберігання в репозиторіях. Деякі журнали запровадили новий тип публікацій — Data Article, що дає можливість авторам детально описувати отримані набори даних, покращуючи їхню видимість і наукове використання [65].

Для забезпечення доступності та повторного використання наукових даних спільнота науковців та зацікавлених організацій розробила «принципи FAIR» — універсальні настанови для збереження та поширення дослідницьких цифрових активів [66]. Ці принципи поширюються не лише на дані у звичному розумінні, а й на алгоритми, інструменти та робочі процеси, що використовуються для їх створення.

Акронім **FAIR** визначає чотири основні принципи щодо наукових даних: *Findable* (придатні до пошуку через постійні ідентифікатори, як DOI чи URI, URL), *Accessible* (надані відповідно до визначених умов доступу), *Interoperable* (сумісні для машинної взаємодії) та *Reusable* (придатні для повторного використання). Дані повинні супроводжуватись повним і детальним описом метаданих, включаючи відомості про їх походження та контекст. Важливо зауважити, що докладні метадані є необхідними для забезпечення можливості їх повторного використання навіть через десятиліття після їх створення. Вони підвищують наукову цінність і інформативність результатів досліджень [67].

Принципами FAIR керуються провідні ґрунтові центри, зокрема ISRIC та Європейський центр даних про ґрунти (ESDC). Впровадження цих принципів також підтримує Глобальне ґрунтове партнерство, за підтримки якого 2024 року було проведено Глобальний симпозіум з ґрунтової інформації та даних (GSID24) для того, щоб підкреслити важливість відкритих ґрунтових даних для вирішення проблем продовольчої безпеки та зміни клімату.

Принципи FAIR додають цінності даним, зокрема застарілим наборам, підвищуючи їхню корисність і відкриваючи нові можливості для досліджень. Наприклад, залучення й інтеграція дослідницької інформації про ґрунти з іншими релевантними даними (про рослини, тварин, клімат, погоду, техніку, економіку, маркетинг, торгівлю тощо) відповідно до принципів FAIR можуть стати важливим чинником для досягнення стійких операційних і бізнес-результатів у сільському господарстві [68].

Національні бази даних містять значно більший обсяг інформації про локальні ґрунтові умови, ніж загальноєвропейські чи навіть глобальні БД (див. рис. 1, 5–7), що створює можливості для більш детальної оцінки ґрунтів на національному рівні з використанням сучасних технологій цифрового картографування. Історичні ґрунтові дані, зібрані в національних базах, є важливим науковим надбанням. Впровадження принципів FAIR у створенні національних ґрунтово-інформаційних продуктів (цифрових карт або тематичних ґрунтових наборів даних та БД з відкритим доступом) є важливим кроком для підвищення ефективності використання даних, розвитку відкритої науки та збільшення суспільного впливу ґрунтознавчих досліджень. Однак важливо зазначити, що впровадження цих принципів також передбачає відповідальне використання даних, зокрема, обов'язкове і належне цитування першоджерел та визнання внеску всіх учасників процесу збирання, збереження і поширення ґрунтової інформації.

4. Висновки

Представлено поточний вміст бази даних «Властивості ґрунтів України» та кількість записів про ґрунтові властивості, інтегрованих із цієї БД до різних ґрунтово-інформаційних продуктів. Наявна БД є найповнішою компіляцією інформації про властивості ґрунтів і слугує цінним ресурсом для накопичення відомостей і створення тематичних баз та наборів даних.

Встановлено, що до європейських, глобальних та національних ґрунтово-інформаційних продуктів було інтегровано різну частку інформації про властивості ґрунтів країни. Найбільша частка – близько 32,9 % від поточного вмісту БД – представлена на цифровій платформі "Нейтрального рівня деградації земель сільськогосподарського призначення" ФАО-ГГП.

Надано опис джерел інформації та походження ґрунтових даних для України у БД WoSIS (WoSIS snapshot 2023), що може допомогти користувачам ґрунтової інформації приймати обґрунтовані рішення щодо залучення цих даних у власні наукові дослідження.

Наголошено на необхідності впровадження безперервного процесу збирання та збереження даних у національних БД, зокрема шляхом включення цих заходів до наукових програм та проєктів, а також налагодження обміну ґрунтовими даними між установами та науковими колективами, що займаються дослідженнями й інвентаризацією ґрунтових ресурсів.

Окреслено основні перспективні напрями використання історичної ґрунтової інформації, накопиченої в ґрунтових БД, що включають її залучення до національних і регіональних прогностичних оцінок стану та властивостей ґрунтів за допомогою сучасних технологій цифрового картографування, а також створення тематичних наборів ґрунтових даних із дотриманням принципів FAIR для сприяння розвитку відкритої науки.

Список використаних джерел / References

1. Bouma, J. (2014). Soil science contributions towards sustainable development goals and their implementation: linking soil functions with ecosystem services. *Journal of plant nutrition and soil science*, 177(2), 111–120. <https://doi.org/10.1002/jpln.201300646>
2. Panagos, P., Montanarella, L., Barbero, M., Schneegans, A., Aguglia, L., & Jones, A. (2022). Soil priorities in the European Union. *Geoderma Regional*, 29, e00510. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00510>
3. Heuser, I. (2022). Soil governance in current European Union law and in the European green Deal. *Soil Security*, 6, 100053. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100053>
4. Panagos, P., Van Liedekerke, M., Borrelli, P., Köninger, J., Ballabio, C., Orgiazzi, A., ... Montanarella L. (2022). European Soil Data Centre 2.0: Soil data and knowledge in support of the EU policies. *European Journal of Soil Science*, 73(6), e13315. <https://doi.org/10.1111/ejss.13315>
5. Ginzky, H., & Ruppel, O. C. (2022). Soil protection law in Africa: Insights and recommendations based on country studies from Cameroon, Kenya and Zambia. *Soil Security*, 6, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100032>
6. Arias-Navarro, C., Panagos, P., Jones, A., Amaral, M. J., Schneegans, A., Van Liedekerke, M., ... P., Montanarella, L. (2023). Forty years of soil research funded by the European Commission: Trends and future. A systematic review of research projects. *European Journal of Soil Science*, 74(5), e13423. <https://doi.org/10.1111/ejss.13423>
7. Montanarella, L., & Panagos, P. (2021). The relevance of sustainable soil management within the European Green Deal. *Land use policy*, 100, 104950. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104950>
8. Panagiotakis, I., & Dermatas, D. (2022). New European Union soil strategy: A potential worldwide tool for sustainable waste management and circular economy. *Waste Management & Research*, 40(3), 245–247. <https://doi.org/10.1177/0734242X221079114>
9. Panagos, P., Broothaerts, N., Ballabio, C., Orgiazzi, A., De Rosa, D., Borrelli, P., ... Jones, A. (2024). How the EU Soil Observatory is providing solid science for healthy soils. *European Journal of Soil Science*, 75(3), e13507. <https://doi.org/10.1111/ejss.13507>
10. Cornu, S., Keesstra, S., Bispo, A., Fantappie, M., van Egmond, F., Smreczak, B., ... Chenu, C. (2023). National soil data in EU countries, where do we stand? *European Journal of Soil Science*, 74(4), e13398. <https://doi.org/10.1111/ejss.13398>
11. van Egmond, F. M., Andrenelli, M. C., Arrouays, D., Aust, G., Bakacsi, Z., Batjes, N. H., ... Yahiaoui R. (2021). Report on harmonized procedures for creation of databases and maps. *EJP Soil. Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12704083>
12. Samuel-Rosa, A., Dalmolin, R. S. D., Moura-Bueno, J. M., Teixeira, W. G., & Alba, J. M. F. (2019). Open legacy soil survey data in Brazil: geospatial data quality and how to improve it. *Scientia Agricola*, 77(1), e20170430. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0430>

13. Pfeiffer, M., Padarian, J., Osorio, R., Bustamante, N., Olmedo, G. F., Guevara, M., ... Zagal E. (2020). CHLSOC: the Chilean Soil Organic Carbon database, a multi-institutional collaborative effort. *Earth Syst. Sci. Data*, 12(1), 457–468. <https://doi.org/10.5194/essd-12-457-2020>
14. Armas, D., Guevara, M., Bezares, F., Vargas, R., Durante, P., Osorio, V., ... Oyonarte, C. (2022). Harmonized Soil Database of Ecuador (HESD): data from 2009 to 2015. *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 431–445. <https://doi.org/10.5194/essd-15-431-2023>
15. Díaz-Guadarrama, S., Varón-Ramírez, V. M., Lizarazo, I., Guevara, M., Angelini, M., Araujo-Carrillo, G. A., ... Rubiano, Y. (2024). Improving the Latin America and Caribbean Soil Information System (SISLAC) database enhances its usability and scalability. *Earth Syst. Sci. Data*, 16, 1229–1246. <https://doi.org/10.5194/essd-16-1229-2024>
16. Vásquez, A., Varón-Ramírez, V. M., Tobías, H., & Guevara, M. (2024). Guatemala soil organic carbon database (GTMSOC). *European Journal of Soil Science*, 75(1), e13450. <https://doi.org/10.1111/ejss.13450>
17. Nenkam, A. M., Wadoux, A. M. C., Minasny, B., Silatsa, F. B., Yemefack, M., Ugbaje S. U., ... McBratney, A. B. (2024). Applications and challenges of digital soil mapping in Africa. *Geoderma*, 449, 117007. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117007>
18. Kidd, D., Searle, R., Grundy, M., McBratney, A., Robinson, N., O'Brien, L., ... Triantafyllis, J. (2020). Operationalising digital soil mapping—Lessons from Australia. *Geoderma Regional*, 23, e00335. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00335>
19. Batjes, N. H., Calisto, L., & de Sousa, L. M. (2024). Providing quality-assessed and standardised soil data to support global mapping and modelling (WoSIS snapshot 2023). *Earth Syst. Sci. Data*, 16, 4735–4765. <https://doi.org/10.5194/essd-16-4735-2024>
20. Medeiros, B. M., Sequinato-Rossi, L., ten Caten, A., Pereira, G. E., Silva, E. B. D., & Dabot, K. T. U. (2024). Soil legacy data: An opportunity for digital soil mapping. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 48, e0230130. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20230130>
21. Laktionova, T. M., Medvedev, V. V., Savchenko, K. V., Bigun, O. M., Nakis'ko, S. G., & Sheyko, S. N. (2010). *Structure and use procedure for "Ukrainian Soil Properties Database" (Hand book) / Kharkiv: Apostrof* [In Ukrainian].
22. Laktionova, T. M., Medvedev, V. V., Savchenko, K. V., Bigun, O. M., Nakis'ko, S. G., Sheyko, S. M. (2015). "Ukrainian soil properties" database and its application. *Agricultural science and practice*, 2(3), 3–8. <https://doi.org/10.15407/agrisp2.03.003>
23. Laktionova, T. M. (2018). The experience of creating and using seven soil databases in the Soil-Geoeocophysics Laboratory. *AgroChemistry and Soil Science*, 87, 63–71. <https://doi.org/10.31073/acss87-10> [In Ukrainian].
24. Baliuk, S. A., & Bigun, O. M. (2019). Structure of a database of national digital map of stores of organic carbon in soils of Ukraine. *Bulletin of Agricultural Science*, 4, 5–10. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201904-01> [In Ukrainian].
25. Medvedev, V. V., Laktionova, T. M., Plisko, I. V., Bigun, O. M., Sheiko, S. M., & Nakisko, S. G. (2012). *Agronomically oriented zoning of lands according to soil properties (substantiation, methods, examples)*. Kharkiv [In Ukrainian].
26. Medvedev, V. V., Plisko, I. V., & Bigun, O. M. (2014). *Investment attractiveness of arable lands of Ukraine (methodology of determination and cartographic and analytical assessments)*. Kharkiv [In Ukrainian].
27. Laktionova, T., & Nakisko, S. (2014). Particle size distribution as a basic characteristic for pedotransfer prediction of permanent wilting point. *Agricultural Science and Practice*, 1(1), 13–19. <https://doi.org/10.15407/agrisp1.01.013>
28. Medvedev, V. V., Plisko, I. V., & Bigun, O. M. (2015). Experience with pedotransfer modeling in soil physics research. *Bulletin of Agricultural Science*, 1, 17–24. https://agrovisnyk.com/archive_ua_2015_01_02.html [In Ukrainian].
29. Agricultural Land Degradation Neutral Platform. Ukrainian Soil Partnership. Retrieved from <https://uasp.com.ua/2022/01/18/platforma-nejtralnogo-rivnya-degradacziyi-zemel-silskogospodarskogo-pryznachennya/> (date of application: 07.01.2025).
30. Solovei, V., Lebed, V., & Laktionova, T. (2022). Scientific methodological fundamentals of the functioning of the Ukrainian Soil Information Center. *Bulletin of Agricultural Science*, 100(9), 26–33. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202209-03> [In Ukrainian].
31. Joint Research Centre: Institute for Prospective Technological Studies. (2013). *European HYdropedological Data Inventory (EU-HYDI)*, Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2788/5936>
32. Soil and Terrain Database for Central and Eastern Europe (SOVEUR), version 1.1. *ISRIC Data Hub*. Retrieved from <https://data.isric.org/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/b1fa4988-b511-48e3-9548-3c48f0a908fa> (Accessed 07 January 2025).
33. Calisto, L., de Sousa, L.M., & Batjes, N.H. (2023). Standardised soil profile data for the world (WoSIS snapshot – December 2023). *ISRIC Data Hub*. <https://doi.org/10.17027/isric-wdcsoils-20231130>. (Accessed 07 January 2025).
34. Viatkin, K. V., Zalavskiy, Y. V., Lebed, V. V., Sherstyuk, O. I., Bihun, O. M., Plisko, I. V., Nakisko, S. G. (2019). Digital mapping of soil organic carbon stocks in Ukraine. *AgroChemistry and Soil Science*, 88, 5–11. <https://doi.org/10.31073/acss88-01> [In Ukrainian].
35. van Engelen, V. W. P., & Dijkshoorn, J. A. (2013). *Global and National Soils and Terrain Databases (SOTER). Procedures Manual*. Version 2.0. Wageningen: ISRIC - World Soil Information. Retrieved from https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public_path/shared_folder/SOTER/isric_report_2013_04.pdf. (Accessed 07 January 2025).
36. Batjes, N. M. (Ed.) (2000). *Soil Degradation and Vulnerability Assessment for Central and Eastern Europe - Preliminary Results of the SOVEUR Project: Report of concluding workshop* (Busteni, 26–31 October 1999). Wageningen: ISRIC. Retrieved from https://isric.org/sites/default/files/isric_report_2000_04.pdf. (Accessed 07 January 2025).
37. Medvedev, V. V., Laktionova, T. M., & Breus, N. M. (2000). Zoning of the territory of Ukraine according to the SOTER method. *AgroChemistry and Soil Science*, 60, 10–18 [In Ukrainian].
38. WISE Soil Property Databases. www.isric.org. Retrieved from <https://www.isric.org/explore/wise-databases> (Accessed 07 January 2025).
39. Soil and terrain database for the Danube basin. www.isric.org. Retrieved from <https://www.isric.org/projects/soil-and-terrain-database-danube-basin> (Accessed 07 January 2025).
40. European HYdropedological Data Inventory (EU-HYDI) database - ESDAC - European Commission. *ESDAC – European Commission*. Retrieved from <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/european-hydropedological-data-inventory-eu-hydi-database-0> (Accessed 07 January 2025).
41. Application to search the World Reference Collection. www.isric.org. Retrieved from <https://isis.isric.org/> (Accessed 07 January 2025).
42. Geochemical mapping of agricultural and grazing land soil. *GEMAS Project*. Retrieved from <https://gemas.eurogeosurveys.org/> (Accessed 07 January 2025).
43. Ottoni, M. V., Ottoni, F. T. B., Schaap, M. G., Lopes-Assad, M. L. R., & Rotunno, F. O. C. (2018). Hydrophysical database for Brazilian soils (HYBRAS) and pedotransfer functions for water retention. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1–17. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.05.0095>

44. Nemes, A. (2002). Unsaturated soil hydraulic database of Hungary: HUNSODA. *Agrokémia és Talajtan*, 51(1-2), 17-26. <https://doi.org/10.1556/agrokem.51.2002.1-2.3>
45. Makó, A., Tóth, B., Hernádi, H., Farkas, C., & Marth, P. (2010). Introduction of the Hungarian Detailed Soil Hydrophysical Database (MARTHA) and its use to test external pedotransfer functions. *Agrokémia és Talajtan*, 59(1), 29-38. <https://doi.org/10.1556/agrokem.59.2010.1.4>
46. Mihalikova, M., Matula, S., & Doležal, F. (2013). HYPRESCZ–Database of Soil Hydrophysical Properties in the Czech Republic. *Soil & Water Research*, 8(1), 34-41. <https://doi.org/10.17221/58/2012-SWR>
47. Al Majou, H., Bruand, A., Duval, O., Le Bas, C., Vautier, A. (2008). Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon. *Soil Use and Management*, 24(4), 383-391. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00180.x>
48. Dobarco, M. R., Cousin, I., Le Bas, C., & Martin, M. P. (2019). Pedotransfer functions for predicting available water capacity in French soils, their applicability domain and associated uncertainty. *Geoderma*, 336, 81-95. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.022>
49. Samuel-Rosa, A., Dalmolin, R. S. D., Gubiani, P. I., Teixeira, V. G., Oliveria, S. R. de M., Viana, J. H. M. ... Moura-Bueno, J. M. (2018). Bringing together Brazilian soil scientists to share soil data / A. Samuel-Rosa et al. *12th Southern Brazilian Soil Science Meeting, Xanxerê. Solo, água, ar e biodiversidade: componentes essenciais para a vida: anais.*, Chapecó. 2018. Retrieved from <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1094648> (Accessed January 7, 2025).
50. Ali, A., Erkossa, T., Gudeta, K., Abera, W., Mesfin, E., Mekete, T., ... Elias, E. (2022). Reference soil groups map of Ethiopia based on legacy data and machine learning-technique: EthioSoilGrids 1.0. *Soil*, 10, 189–209. <https://doi.org/10.5194/soil-10-189-2024>
51. Matthews, F., Verstraeten, G., Borrelli, P., Vanmaercke, M., Poesen, J., Steegen, A., ... Panagos, P. (2023). EUSEDcollab: a network of data from European catchments to monitor net soil erosion by water. *Sci Data*, 10, 515. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02393-8>
52. Arrouays, D., Leenaars, J. G., Richer-de-Forges, A.C., Adhikari, K., Ballabio, C., Greve, M., ... Rodriguez, D. (2017). Soil legacy data rescue via GlobalSoilMap and other international and national initiatives. *GeoResJ*, 14, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.grj.2017.06.001>
53. Heung, B., Hodúl, M., & Schmidt, M. G. (2017). Comparing the use of training data derived from legacy soil pits and soil survey polygons for mapping soil classes. *Geoderma*, 290, 51-68. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.12.001>
54. Reddy, N. N., Chakraborty, P., Roy, S., Singh, K., Minasny, B., McBratney, A. B., ... Das, B. S. (2021). Legacy data-based national-scale digital mapping of key soil properties in India. *Geoderma*, 381, 114684. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114684>
55. Minai, J. O., Schulze, D. G., & Libohova, Z. (2022). Renewal of archival legacy soil data: A case study of the Busia Area, Kenya. *Frontiers in Soil Science*, 1, 765248. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2021.765248>
56. Gobeze, T. B., Scott, S. D., Daggupati, P., Bedard-Haughn, A., & Biswas, A. (2024). Soil data recency: The foundation for harmonizing soil data across time. *Journal of Environmental Management*, 364, 121484. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121484>
57. Hendriks, C. M. J., Stoorvogel, J. J., Lutz, F., & Claessens, L. (2019). When can legacy soil data be used, and when should new data be collected instead? *Geoderma*, 348, 181-188. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.026>
58. Sorenson, P. T., Shirliffe, S. J., & Bedard-Haughn, A. K. (2021). Predictive soil mapping using historic bare soil composite imagery and legacy soil survey data. *Geoderma*, 401, 115316. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115316>
59. Xia, Y., Sanderman, J., Watts, J. D., Machmuller, M. B., Ewing, S., & Rivard, C. (2024). Leveraging legacy data with targeted field sampling for low-cost mapping of soil organic carbon stocks on extensive rangeland properties. *Geoderma*, 448, 116952. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116952>
60. FAO. (2025). Introducing the Global Soil Information System. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Retrieved from <https://www.fao.org/global-soil-partnership/areas-of-work/soil-information-and-data/en/> (Accessed 07 January 2025).
61. Poggio, L., De Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B., Kempen, B., Ribeiro, E., Rossiter, D. (2021). SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *Soil*, 7(1), 217-240. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
62. Hengl, T. (2018). Silt content in % (kg / kg) at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution (v0.2) [Data set]. *Zenodo*. 2018. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2525676> (Accessed 07 January 2025).
63. Hengl, T., Minarik, R., Tian, X., Parente, L., Ho, Y.-F., Consoli, D., Simoes, R., and contributors. (2024). Soil Health Data Cube for pan-EU technical manual (Version v0.1). 2024. OpenGeoHub Foundation. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13838797>, Retrieved from <https://shdc.ai4soilhealth.eu/> (Accessed 07 January 2025).
64. Thompson, J. A., Kienast-Brown, S., D'Avello, T., Philippe, J., Brungard, C. (2020). Soils2026 and digital soil mapping – A foundation for the future of soils information in the United States. *Geoderma regional*, 22, e00294. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00294>
65. Rossiter, D. G., Dungait, J. A., Mulder, V. L., & Heuvelink, G. B. (2022). A new article type: The 'Data Article'. *European Journal of Soil Science*, 73(3), e13265. <https://doi.org/10.1111/ejss.13265>
66. Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., ... Mons, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific data*, 3(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
67. Hauschke, C., Nazarovets, S., Altermeier, F., & Kaliuzhna, N. (2021). Roadmap to FAIR research information in open infrastructures. *Journal of Library Metadata*, 21(1-2), 45-61. <https://doi.org/10.1080/19386389.2021.1999156>
68. Ali, B., & Dahlhaus, P. (2022). The role of FAIR data towards sustainable agricultural performance: A systematic literature review. *Agriculture*, 12(2), 309. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020309>

UDC 631.4:004.65(477)

Soil data rescue in Ukraine: achievements and future opportunities**O. M. Bihun****National Scientific Center "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky", Kharkiv, Ukraine**

✉ oksana_bigun@ukr.net

Received 07.01.2025; Revised 14.05.2025; Accepted 17.06.2025; Available online 01.07.2025

Abstract

Soil is a key component in addressing the global challenges humanity currently faces, including food security and climate change mitigation. The data stored in soil databases is crucial for assessing soil quality and ecosystem services. This paper examines the achievements in rescuing soil data in Ukraine, focusing on the current content of the "Ukrainian Soil Properties" database developed by the National Scientific Center "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky" and the national soil information products derived from it. The integration of Ukrainian soil data into international databases, such as EU-HYDI and SOTER-SOVEUR, is examined. The "Ukrainian soil properties" database compiles 10095 records on physical and chemical parameters for 1923 soil profiles and 228 records of surface soil layer surveys. Approximately 32.9% of the records are included in the Information System for Monitoring Land Degradation Neutrality of Agricultural Land; the integration of soil data into other databases ranges from 1.6% (National Organic Carbon Stock Map Database) to 3.9% (EU-HYDI). The paper provides an overview of the data sources included in the WoSIS database (snapshot 2023), emphasizing their appropriate use in scientific research. Directions for advancing national soil databases are outlined, including the integration of soil data rescue efforts into scientific programs and projects, promoting information exchange among institutions and research teams, and recognizing data providers as co-authors of information products. Creating thematic datasets aligned with FAIR principles and developing national and regional maps using digital soil mapping and modeling techniques represent a promising avenue for utilizing soil legacy data. Strengthening collaboration among researchers and stakeholders is essential to address current information needs and ensure the preservation of soil data for both local and global research purposes. Adopting open science principles will facilitate the preservation and re-use of soil data, its integration into interdisciplinary research to address local and global environmental challenges, and encourage the development of new soil science research.

Keywords: soil data; "Ukrainian soil properties" database; national soil information products; data integration.

Citing: Bihun, O. M. (2025). Soil data rescue in Ukraine: achievements and future opportunities. *AgroChemistry and Soil Science*, 98, 4-18. doi:10.31073/acss98-01 [in Ukrainian].

UDC 631.417.1:631.445.4(292.485:477.5)

Pedotransfer functions for prediction of soil organic carbon content for Chernozems Haplic and Calcic: A Case Study from the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine

Y. M. Dmytruk^{1,2 a}✉, R. P. Palamarchuk^{1 b}, Y. F. Zhukova^{1 c}, N. V. Stepanenko^{1 d}¹ State Institution "Soil Protection Institute of Ukraine", Kyiv, Ukraine;² HEI "Podillya State University", Kamianets-Podilskyi, Ukraine

ARTICLE INFO

Received 12.05.2025
Received in revised form 14.06.2025
Accepted 17.06.2025
Available online 01.07.2025

Keywords:

soil organic Carbon;
Chernozems Haplic
and Calcic;
pedotransfer function

ABSTRACT

The aim of the present research is to simulate and evaluate pedotransfer functions (PTF) for predicting soil organic carbon in Chernozem Haplic and Chernozem Calcic of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine using data from agrochemical soil certification. Soil samples were collected from the upper arable horizon (0–20 cm) within the Left Bank Upland Province of the Forest-Steppe zone for Chernozem Haplic and Chernozem Calcic. According to the Ukrainian national soil classification system, the studied soils are classified as Typical Chernozems and Ordinary Chernozems. In addition to standard agrochemical analyses made by Poltava branch of State Institution «Institute for Soil Protection of Ukraine», in the Kyiv laboratory of this Institution determined the total carbon (TC), total inorganic carbon (TIC), and total organic carbon (TOC) contents. The Carbon content was determined using an analyzer Multi EA 4000 analyzer (Jena) via combustion. The total carbon released was automatically measured using a non-dispersive infrared detector (NDIR). The TOC content was determined as: $TOC = TC - TIC$ (g/kg of soil). The descriptive statistical analysis and correlation and regression analyses were carried out using Excel; to assess the accuracy of the models and the agreement between the predicted and measured values of TOC (RMSE, NRMSE, MAE, R^2 and MAD). The statistically significant of the differences between the groups of predicted values of the TOC content was assessed using the t-test: Two-Sample Assuming Unequal Variances. The Humus and TOC content practically follow a normal distribution, which allows us to correctly estimate confidence intervals and significance levels; apply parametric statistical tests. The Humus content did not appear to be a key factor driving the TOC content. Taking into account the wide variability in TOC-to-Humus ratios observed in our study (ranging from 0.495 to 0.92), the use of a conventional conversion factor (e.g., 0.58) to estimate TOC content from Humus content may lead to substantial inaccuracies. The predicted values of TOC content using the PTFs, can be considered statistically interchangeable with the observed ones under the tested conditions, thereby confirming the adequacy of the models for practical application in TOC estimation. Given the absence of bias and the acceptable levels of prediction error ($NRMSE < 10\%$ for all models), the tested PTFs may be reliably used for TOC assessment in monitoring, land-use planning, and carbon stock estimation. Our vision of the practical use of modeled PTFs is as follow: if no exact information on the taxonomic classification of soils is available, it is better making use of PTF3 ($TOC \text{ (g/kg)} = 11.0 + 2.394 \cdot \text{Humus} - 0.049 \cdot P + 0.065 \cdot K$); if the soil type is determined clearly, then for Chernozems Haplic – PTF5 ($TOC \text{ (g/kg)} = 32.1 + 1.21 \cdot \text{Humus} + 0.0017N + 0.088K - 0.085P - 2.71 \cdot pH$), and for Chernozems Calcic – PTF7 ($TOC \text{ (g/kg)} = 15.4 + 1.81 \cdot \text{Humus}$).

✉ dmytruk.yur@gmail.com

ORCID: ^a0000-0002-3157-0503, ^b0000-0002-5965-1305, ^c0000-0002-2755-5431, ^d0009-0005-6641-5887

Citing: Dmytruk, Y. M., Palamarchuk, R. P., Zhukova, Y. F., & Stepanenko, N. V. (2025). Pedotransfer functions for prediction of soil organic carbon content for Chernozems Haplic and Calcic: A Case Study from the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. *AgroChemistry and Soil Science*, 98, 19–35. doi: 10.31073/acss98-02

1. Introduction

The global imperative to address climate change and promote sustainable agriculture has underscored the critical role of soil management practices in enhancing carbon sequestration and reducing greenhouse gas emissions. Statistical analyses and modeling are employed to quantify carbon sequestration rates, evaluate treatment effects, and assess environmental and agronomic benefits. Data collection and analysis techniques involve comprehensive soil sampling, greenhouse gas flux measurements,

soil health assessments, and crop yield monitoring over multiple growing seasons. Statistical analyses and modeling approaches are employed to quantify the carbon sequestration rates, assess treatment effects on soil health and greenhouse gas emissions, and evaluate the overall environmental and agronomic benefits of the soil management practices [1].

Soil organic Carbon (SOC) is as a key determinant of yield in Europe. But the complex SOC-yield relationship highlights the necessity for tailored soil management strategies that consider specific site conditions to optimize C storage and crop yield [2]. SOC plays a crucial role in soil fertility, crop productivity, and agricultural sustainability. Long-term application of organic manure significantly increases SOC content, which is positively correlated with crop yields up to a critical level of about 9 g kg⁻¹ [3]. Higher SOC content is associated with improved soil gas transport capability, potentially enhancing root growth and carbon input [4]. Optimal levels of decomposable organic carbon range from 0.2% to 0.6%, contributing to high crop yields when combined with mineral fertilization [5]. SOC provides nutrients to plants and improves water availability, enhancing soil fertility and food productivity [6]. These findings highlight the importance of maintaining appropriate SOC levels through balanced organic and mineral fertilization to optimize crop productivity and environmental sustainability in arable lands. The capacity of soils to store carbon (C) has substantial implications as for climate change mitigation as sustainable global crop production

While dry combustion is considered the standard method, in situ analytical techniques are being developed to offer increased accuracy, precision, and cost-effectiveness [7]. A recent photocatalytic approach using a PeCOD analyzer combined with GIS technology has shown promising results for on-site SOC determination. This method revealed that finer soil materials have higher SOC content, and SOC decreases with soil depth. Land management practices, precipitation, and temperature significantly affect SOC formation and residence time. GIS mapping of SOC distribution can identify hotspot areas, informing sustainable farming practices and climate change mitigation strategies [8].

Raising the organic matter content of soils is desirable for guaranteeing that soils will be able to keep fulfilling essential functions and services in spite of fast-changing environmental conditions. There is a thought, since at least 90% of plant residues added to soils to increase their carbon content over the long term are mineralized relatively rapidly and are released as CO₂ to the atmosphere, farmers would have to apply to their fields 10 times more organic carbon annually than what they would eventually expect to sequester [9]. Recent studies demonstrate that organic farming practices significantly increase SOC compared to conventional methods. A meta-analysis revealed higher SOC concentrations and mass storage under organic agriculture, with fine soil textures showing the greatest improvements [10]. Similarly, research in the Netherlands found that organic arable systems had higher SOC content, mineralization rates, and water-stable aggregation than conventional systems, though still lower than permanent pasture [11]. While organic farming generally improves soil biochemical properties, physical aspects like susceptibility to compaction should also be considered [11, 12]. These findings highlight the potential of organic farming practices to enhance soil carbon sequestration and contribute to climate change mitigation and sustainable agriculture.

To advance sustainable and resilient agricultural management policies, especially during land use changes, it is imperative to monitor, report, and verify SOC content rigorously to inform its stock. However, conventional methods often entail challenging, time-consuming, and costly direct soil measurements [13]. The availability of quality data determines the accuracy of the model; therefore, it is necessary to build a general dataset that includes a carefully selected range of variables that, as a whole, influence the values of the variable we predict [14].

Pedotransfer functions (PTFs) are mathematical models used to predict soil properties, including SOC content. Studies have shown that PTFs can effectively predict SOC in subsurface horizons across Europe [15]. Machine learning techniques have been employed to develop generalized PTFs for predicting soil electrical conductivity and SOC content in Australia [16]. However, the choice of PTF for bulk density can significantly impact SOC storage estimates at regional scales, with uncertainties ranging from 10.61 % to 70.46 % in Chinese terrestrial ecosystems [17]. Key predictors for SOC content include soil depth, pH, soil texture, and geomorphology [16]. While PTFs show promise for estimating SOC content across various landscapes, careful consideration of the selected PTF and its limitations is crucial for accurate regional-scale assessments.

PTFs were developed to predict organic carbon content in subsurface horizons of European soils. The PTFs showed high reliability with adjusted R^2 values above 0.62 and good predictive ability with RMSE values between 2.43 and 13.82 g C kg⁻¹ soil. The use of bulk density as a predictor variable improved the performance of the PTFs, and they are suitable for continental-scale applications in Europe. Employed multiple linear regression with predictor variables: SOC in topsoil, depth of subsurface horizons, texture, bulk density, mean annual temperature, and precipitation [15].

PTF model types included: Regression-based models; Machine learning models; Process-based models and Additive/mixed statistical models. For forming PTF Models measured different soil properties: SOC content and SOC stock; SOC fractions (including humic substances, stable SOC). Other properties included SOC dynamics, total carbon and total nitrogen, bulk density, SOM and labile carbon. Various indicators were used to assess the effectiveness of the models, such as: R^2 (or adjusted R^2) and RMSE. The coefficient of determination (R^2) was used to assess the goodness of fit between predicted and measured values. Higher R^2 values indicated better model performance. Other metrics included RPD, MAE, MSE, ME, Willmott's d, and normalized RMSE [13, 18]. We should note that in recent studies, the mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), and their normalized versions are widely used to validate predictive models in soil science research. These metrics are commonly used to evaluate model performance, and RMSE is more sensitive to outliers and potentially more suitable for Gaussian error distributions [19, 20]. Recently, researchers have applied these metrics to evaluate machine learning algorithms for digital soil mapping, achieving high accuracy in predicting soil nitrogen content [21]. In addition, these metrics were used to compare the effectiveness of different statistical approaches in predicting soil properties based on mid-infrared spectral data [22]. Note that in some cases, RMSE can be misleading in understanding the uncertainty of the forecast [19, 22]. Some authors [23] argue for RMSE as the optimal metric for normal errors, refuting the idea that MAE should be used exclusively. They do not contend RMSE is inherently superior and instead advocate that a combination of metrics, including both RMSE and MAE, should be used to evaluate model performance.

So, key predictors that are most often used in the researches analyzed by us are [18, 24, 25]: Soil properties (such as pH, texture, carbon/nitrogen ratio, cation exchange capacity, nitrogen, phosphorus, fertility); Spectral predictors (hyperspectral or MIR spectra); Environmental factors: topographic variables (curvature, elevation, aspect, wetness, valley depth, catchment area); Land use or management variables (ploughing, land use, reclamation); Climate variables (temperature, ESPI, nitrogen deposition). The authors recognized that the limiting factors may include related to predictor availability, sample size, model suitability for nonlinear data, and calibration dependencies [26, 27]. Mitigation strategies of the forecasting results provide for: data expansion (auxiliary predictors, open data, satellite/digital elevation model); model selection or optimization (nonlinear models, parameter optimization); laboratory or sample standardization; management recommendations [13, 28].

Determining the spatio-temporal dynamics of SOC content and stocks remains a critical task for ensuring food security, addressing climate change challenges, and halting land degradation [29, 30], which aligns with the United Nations Sustainable Development Goals [31]. Achieving these objectives is unattainable without systematic soil monitoring, which is currently lacking in Ukraine. In particular, there is no operational national system for observing soil properties over time and space, including SOC – one of the key indicators of soil fertility and ecosystem resilience [32]. As a result, the only available source of soil-related data for decision-making at all levels of agro-environmental governance in Ukraine is the agrochemical certification of farmlands. However, this certification does not include measurements of SOC, and given the ongoing war and limited government funding, a fundamental reform of the SOC monitoring system is not anticipated in the near future.

To overcome the information gaps on the soil organic carbon content, the modeling based on available agrochemical indicators is of crucial importance. A database of analytical data on SOC content for specific locations and for soils of different genesis should become a platform for modeling.

The aim of the present research is to simulate and evaluate pedotransfer functions for predicting soil organic carbon content in Chernozems Typical and Ordinary (Chernozem Haplic and Chernozem Calcic accordingly) of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine using data from agrochemical soil certification.

Objectives of the study: 1. To analyze the total organic Carbon (TOC) content of and agrochemical parameters (Humus content, available Phosphorus, Potassium, alkaline hydrolyzed Nitrogen, Soil acidity) in soil samples collected from the arable horizon of the study area. 2. Using both individual and complexes of soil indicators as predictors, build a series of PTF for predicting the content of TOC. 3. For different variants, to give a comparative assessment of the models' effectiveness in terms of Predictive power and Explanatory capability using statistical criteria (MAE, RMSE, NRMSE, R^2 and MAD). 4. To identify the possibilities of applying the constructed PTFs for practical use in the context of supporting decisions on sustainable soil resource management.

Author's contribution: Y. Dmytruk – idea, selection of methods, writing, conceptualization; Y. Zhukova – calculations, description of results, methodology; R. Palamarchuk – editing, synthesis and conclusions; N. Stepanenko – analytical research, software.

2. Materials and Methods

For agrochemical certification, soil samples were collected from the upper arable horizon (0–20 cm) within the Left Bank Upland Province of the Forest-Steppe zone (according to the agro-soil zoning of Ukraine). This territory corresponds to the Eastern Poltava Upland physical-geographical region and is classified as a zone of insufficient moisture in agro-climatic zoning (Hydrothermal Coefficient = 1,0–1,3). According to the Ukrainian national soil classification system, the studied soils are classified as Typical Chernozems and Ordinary Chernozems. These subtypes conditionally correspond to Chernozems Haplic and Chernozems Calcic, respectively, within the WRB framework (IUSS Working Group WRB, 2022), based on the presence or absence of a diagnostic calcic horizon and associated morphological and chemical properties.

In addition to standard agrochemical analyses [33] including Humus content, hydrolyzable Nitrogen (N), available Phosphorus (P), available Potassium (K), and Actual acidity (pH in water) made by Poltava branch of State Institution «Institute for Soil Protection of Ukraine»; in the Kyiv laboratory of the State Institution «Institute for Soil Protection of Ukraine» determined the total carbon (TC), total inorganic carbon (TIC),

and total organic carbon (TOC) contents in the same samples (Table 1). The dataset ($n = 29$) comprised two subtypes of Chernozems: Chernozem Haplic ($n = 18$) and Chernozem Calcic ($n = 11$).

The carbon content of soils was determined using an analyzer Multi EA 4000 analyzer (Jena) via combustion, during which carbon is oxidized to CO_2 in an oxygen-rich gas stream at temperatures above 900°C . TC was determined via combustion at 1200°C in an oxygen atmosphere. The total carbon released was automatically measured using a non-dispersive infrared detector (NDIR).

The previously collected soil samples were dried indoors to an air-dry state without sunlight at a temperature not exceeding 40°C . After drying, inclusions (coarse debris, organic residues (plant roots, leaves, seeds, etc.)) were removed manually from the soil samples, if any. Subsequently, the soils were sifted through sieves with a 2-mm mesh diameter, and after obtaining a representative sample (weighing 200–300 g), it was sifted again, but on sieves with a mesh diameter of 0.76 mm in accordance with the requirements for using the specified multielement analyzer. Prior to the analysis, the Multi EA® 4000 was calibrated using calcium carbonate CaCO_3 (12% C) of analytical strength. Organic carbon was determined by the combustion method, in which soil carbon is oxidized to carbon dioxide (CO_2) in an oxygen-containing gas stream at a temperature above 900°C . To determine total carbon, a 300 mg sample was taken in duplicate. The combustion in an oxygen atmosphere was performed at a temperature of 1200°C . The amount of total carbon (TC) released was determined automatically using a non-dispersive infrared (NDIR) detector. The inorganic carbon (TIC) determination was carried out according to the requirements for the device using the appropriate module of the analyzer. TIC was determined by adding 1500 mg of a 40 % solution of orthophosphoric acid (H_3PO_4) to the soil sample. The carbon dioxide (CO_2) released during the reaction was recorded by NDIR. The carbon content measurement in soil samples was controlled using CRM No. B2176 (Elemental Microanalysis) and CRM No. B2237 (Elemental Microanalysis) with a carbon content of 15.95 % and 2.75 %, respectively. The TOC content was determined as the difference between total carbon and inorganic carbon: $\text{TOC} = \text{TC} - \text{TIC}$. The results are expressed in g/kg of soil.

The statistical analysis and correlation and regression analyses were carried out using Excel: mean, standard deviation (SD), coefficient of variation (V, %), variance, Student's t-test ($p < 0.05$) were estimated; to assess the accuracy of the models and the agreement between the predicted and measured values of soil organic carbon the parameters used were: root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (NRMSE), mean absolute error (MAE), coefficient of determination (R^2) and, as a complementary indicator, median absolute deviation (MAD). The use of MAE, RMSE, MAD, and R^2 simultaneously allows to cover different aspects of model quality: accuracy, robustness to outliers, and the explanatory power [19, 23]. The statistical significance of the differences between the groups of predicted values of the TOC content was assessed using the t-test: Two-Sample Assuming Unequal Variances. To evaluate the agreement between the predicted and measured values of soil TOC, both statistical accuracy metrics and hypothesis testing were employed. The predictive performance of the models was assessed using MAE, MAD, RMSE, NRMSE, and the coefficient of determination (R^2), while two-sample t-tests were used to determine whether differences between measured and predicted TOC values were statistically significant.

3. Results

3.1. Overall analysis of soil parameters

The values of soil indicators resulting from the analysis of the soil samples are presented in Table 1.

Table 1
Soil indicators of Chernozems

Samples №№	AISG*	TC**	TIC	TOC	Humus	N	P	K	pH _{aq}
		g/kg***			%	mg/kg			
P1	55e	22.7	2.22	20.48	3.70	147.2	115.5	105.5	6.10
P2	55e	22.17	1.31	20.86	3.72	135.1	105.0	103.0	6.0
P3	55e	22.705	0.88	21.825	3.16	114.8	81.0	118.3	6.20
P4	53д	20.29	0.21	20.08	3.51	132.4	122.0	110.0	6.10
P7	65e	24.445	1.53	22.915	3.62	98.2	136.6	149.8	6.20
P8	65e	25.06	1.60	23.46	4.16	130.2	145.2	96.6	6.20
P9	65e	20.935	0.79	20.145	2.61	87.5	62.5	80.5	6.0
P10	65e	20.795	0.74	20.055	3.30	107.4	95.7	86.3	6.10
P11	65e	20.835	0.79	20.045	3.69	145.1	82.1	77.8	6.10
P12	53д	19.945	0.84	19.105	3.30	112.8	81.5	78.5	6.0
P13	53д	20.035	0.88	19.155	3.12	124.5	66.0	52.0	6.20
P14	53д	17.7	0.027	17.673	2.81	97.8	63.0	70.3	7.10
P15	53д	17.75	0.021	17.729	3.31	118.4	112.0	90.7	6.10
P16	53д	17.415	0.023	17.392	3.51	110.4	125.7	94.3	6.20
P17	53г	17.42	0.022	17.398	2.97	127.8	121.0	96.3	6.10
P18	53г	17.735	0.023	17.712	2.95	125.1	116.0	95.0	6.0
P19	53г	17.505	0.024	17.481	3.18	110.2	70.5	53.0	6.0
P20	65д	21.705	0.026	21.679	3.57	110.0	83.5	79.6	6.0
P21	65д	21.635	0.026	21.609	3.06	136.2	98.0	122.3	6.0
P22	65д	22.095	0.024	22.071	3.22	119.2	96.2	96.6	5.70
P23	58e	22.13	0.026	22.104	3.62	117.2	96.3	100.7	5.80
P24	58e	21.52	0.012	21.508	3.25	115.1	78.0	103.7	5.80
P25	58e	19.62	0.016	19.604	2.51	91.4	81.0	98.0	6.0
P26	53д	20.93	0.041	20.889	2.95	95.2	94.7	70.3	5.80
P27	53д	20.81	0.03	20.78	2.60	88.9	191.0	194.0	5.80
P28	53д	21.08	0.021	21.059	2.29	75.4	67.7	68.0	5.90
P29	53д	16.905	0.021	16.884	2.59	78.5	90.3	71.0	6.0
P30	53д	15.965	0.019	15.946	2.79	95.7	100.0	78.3	5.90
P31	53д	16.205	0.021	16.184	2.56	92.3	93.7	69.3	6.0
Mean		20.2	0.42	19.79	3.16	112	99.0	93.4	6.0
Minimum		15.965	0.012	15.9	2.29	75.4	62.5	52.0	5.70
Maximum		25.06	2.22	23.5	4.16	147	191	194	7.10

* – agro-industrial soil groups; due to the fact that there is no AISG in English, AISG are shown in Ukrainian transcription;
 ** – Carbon content: total (TC), inorganic (TIC) and organic (TOC); *** – the units of measuring in the all next tables are the similar

The analysis of soil indicators with the use of descriptive statistics suggests that all Chernozems are soils with a considerable fertility potential.

The statistical parameters (Table 2) characterizing the distribution of key soil properties demonstrate varying degrees of dispersion and deviation from normality.

Nitrogen and Humus contents exhibit relatively low variability, as indicated by low standard deviations (19.2 and 0.45, respectively) and moderate coefficients of variation (Table 2). Both parameters display near-symmetric distributions, with skewness values close to zero (-0.03 for nitrogen and 0.02 for humus), and negative kurtosis values (-0.73 and -0.52, respectively), suggesting slightly platykurtic distributions. TOC is characterized by moderate variability (SD = 2.07), a near-symmetric distribution (Skewness = -0.25), and slightly platykurtic shape (Kurtosis = -0.96) statistically significant.

Table 2
Statistical parameters of the dataset (n = 29)

Parameters	Nitrogen	Phosphorus	Potassium	Humus	pH _{aq}	TOC
Mean	112	99.0	93.4	3.16	6.05	19.79
Median	113	95.7	94.3	3.18	6.0	20.1
St. Deviation	19.2	28.1	28.5	0.45	0.24	2.07
Variance	368	789	812	0.20	0.06	4.30
Kurtosis	-0.73	2.78	4.77	-0.52	12.2	-0.96
Skewness	-0.03	1.32	1.70	0.02	2.81	-0.25
Minimum	75.4	62.5	52.0	2.29	5.70	15.9
Maximum	147.2	191	194	4.16	7.10	23.5

In contrast, Phosphorus and Potassium contents demonstrate higher variability, with Significant values of standard deviations and variances. Their positive Skewness values (1.32 and 1.70) and leptokurtic profiles (Kurtosis 2.78 and 4.77, respectively) indicate right-skewed distributions with a higher probability of extreme values (Table 2). Notably, the pH_{aq} values exhibit a highly peaked and right-skewed distribution. This suggests the presence of outliers or concentration of values near the lower boundary.

The average Humus content across all soils was 3.16 ± 0.45 %, indicating a moderate level of variability. The distribution of values is close to normal (skewness ≈ 0.02 ; kurtosis ≈ -0.52), suggesting that the results are representative of the general population. According to the data obtained, Chernozems Calcic are characterized by a higher mean Humus content (3.33 ± 0.48 %) and slightly greater spatial heterogeneity. The slight left-skewness (-0.27) indicates a prevalence of relatively high Humus values with a small number of lower values. In contrast, Chernozems Haplic are more homogeneous in terms of Humus content (mean 3.06 ± 0.41 %), showing lower variability and a nearly symmetrical distribution (skewness ≈ -0.03).

Soil organic carbon is a key indicator of soil fertility, resistance to degradation, and organic matter accumulation. The average TOC content in all analyzed samples was 19.79 g/kg, with a standard deviation of 2.07, indicating moderate variability. The Skewness (-0.25) and Kurtosis (-0.96) suggest a slightly left-skewed and flattened distribution relative to the normal, which is typical for agroecosystems characterized by uneven organic fertilization regimes and crop diversity (Table 2).

In Chernozems Haplic, the mean TOC content (18.81 g/kg) was lower than the overall average, with higher variability ($\sigma = 1.87$). This may be associated with the effects of intensive tillage, leading to humus mineralization and partial loss of organic carbon [34]. Nonetheless, the skewness (0.096) is close to zero, indicating a near-normal distribution, which supports the applicability of regression and ANOVA methods. In contrast, Chernozems Calcic exhibited a higher mean TOC content (21.38 g/kg) and lower dispersion ($\sigma = 1.27$) compared to Chernozems Haplic, indicating more homogeneous impact drivers on the plough layer. The Skewness was near zero (0.066), and the negative Kurtosis (-1.09) points to a slightly platykurtic distribution. Overall, TOC

distributions in all soils studied approximate a normal distribution, thereby justifying the use of parametric statistical approaches for further analysis (Table 2).

The some soil indicators deviate from a normal distribution, particularly Phosphorus, Potassium, and pH. At the same time, the Humus content and TOC content practically follow a normal distribution, which allows us to correctly estimate confidence intervals and significance levels; apply parametric statistical tests (in particular, t-test, F-test). Additionally and important for us, the distribution's normality is a pre-requisite for using linear regression.

If the input data and residuals do not have significant deviations from normality, the model will be more stable and less sensitive to outliers, and the confidence intervals will be more precise.

To justify the selection of predictors for constructing PTFs aimed at estimating TOC content, pairwise correlation coefficients among soil properties were analyzed (Table 3). Correlation analysis provides an initial assessment of the strength and direction of linear associations between potential predictors and the target variable TOC, which is essential for informed model development. A moderate positive correlation was observed between TOC and both humus content ($r = 0.46$) and available Potassium ($r = 0.45$), suggesting their relevance as explanatory variables in the predictive models. In contrast, Nitrogen ($r = 0.23$), Phosphorus ($r = 0.16$), and soil pH ($r = -0.22$) showed weak or negligible correlations with TOC, indicating a limited linear predictive capacity in isolation (Table 3). Nevertheless, variables with low pairwise correlation should not be automatically excluded, especially in multifactor models, where interactions or nonlinear contributions may enhance model performance.

Table 3
Pairwise correlation coefficients ($n = 29$)

Parameters	N	P	K	Humus	pH _{aq}	TOC
N	1.0					
P	0.15	1.0				
K	0.08	0.77	1.0			
Humus	0.74	0.30	0.13	1.0		
pH _{aq}	0.06	-0.16	-0.16	0.09	1.0	
TOC	0.23	0.16	0.45	0.46	-0.22	1.0

3.2. Pedotransfer functions (models) for prediction of TOC

For the purpose of the study, we chose the local area of Chernozems Haplic and Calcic to prevent the need to take into account variability in climate, relief, and vegetation indices. The predictive power of the models varies significantly for different types of land use, so we chose only arable land. However, it is quite difficult to separate out the difference in the impact of management practices on TOC content.

The selection of an appropriate pedotransfer function (PTF) for practical application should strike a balance between predictive accuracy, explanatory capability, and operational simplicity. Ideally, models should incorporate as few predictors as possible to facilitate efficient field or laboratory use, without compromising reliability. On the other hand, increasing the number of input variables inevitably raises the model's complexity, not only due to the need for more extensive soil analysis but also because of the greater potential for cumulative analytical errors during data collection.

Based on a review of relevant literature (see Introduction), the most informative and commonly used predictors for estimating TOC content include humus (organic matter) content, particle-size distribution (texture fractions), total nitrogen content, bulk

density, and its probable other properties [13–18], as well as the use, if possible, of spectral libraries, which is considered to be a perspective trend [35, 36]. These factors should be prioritized depending on the specific context, available data, and analytical capacities.

To forecast the content of TOC in soils using the results of laboratory analyzes and agrochemical certification data, 9 PTFs were created (Table 4), of which four functions were built for the whole collection (without dividing soils into subtypes). The constructed PTFs based on linear regression demonstrate varying levels of effectiveness in estimating TOC content across different subtypes of Chernozems. The models differ in terms of input variables, determination coefficients (R^2), F-statistics, and statistical significance (p-values).

Table 4

Regression parameters and statistical characteristics of linear pedotransfer functions for TOC estimation

Pedotransfer Functions	a_0	Coefficients (b)	R^2	F	p-value
Chernozems (n = 29)					
PTF1 p-value: Humus – 0.013	13.13	2.106*Humus	0.21	7.12	0.013
PTF2 p-value: Humus – 0.0016; K – 0.0002; P – 0.004; N – 0.166	11.4	3.4*Humus+0.066*K - 0.05*P - 0.031N	0.57	7.85	0.0003
PTF3 p-value: Humus – 0.0013; K – 0.0004; P – 0.006	11.0	2.394*Humus - 0.049*P + 0.065*K	0.53	9.40	0.00025
PTF4 p-value: Humus – 0.016; K – 0.019	11.2	1.97*Humus+0.026*K	0.36	7.40	0.003
Chernozems Haplic (n = 18)					
PTF5 p-value: Humus – 0.45; K – 0.001; P – 0.004; N – 0.96; pH – 0.06	32.1	1.21*Humus + 0.0017N + 0.088K - 0.085P - 2.71*pH	0.63	4.1	0.021
PTF6 р-значення: K – 0.003; P – 0.016	18.3	0.077*K - 0.06*P	0.45	6.17	0.011
Chernozems Calcic (n = 11)					
PTF7 p-value: Humus – 0.019	15.4	1.81*Humus	0.47	8.12	0.019
PTF8 p-value: Humus – 0.21; K – 0.45; P – 0.22; N – 0.55; pH – 0.09	34.1	1.32*Humus - 0.01N + 0.01K + 0.03P - 3.33pH	0.85	5.6	0.04
PTF9 p-value: Humus – 0.19; K – 0.30; P – 0.54	13.9	1.26*Humus + 0.02K + 0.013P	0.71	5.79	0.026
Comment: a_0 – intercept; b – regression coefficients					

For both Chernozems (n = 29), PTF1, which relied solely on Humus content, exhibited limited predictive power ($R^2 = 0.21$), indicating that single-variable models may be insufficient for reliable TOC estimation in soils of diverse agricultural land. Although PTF4 improved performance slightly by adding available K ($R^2 = 0.36$), it still lagged behind the more comprehensive models. Among the developed pedotransfer functions, PTF2 and PTF3 showed the highest explanatory performance for estimating TOC content, with coefficients of determination (R^2) of 0.57 and 0.53, respectively. These models incorporated multiple routinely measured agrochemical indicators, including humus, available potassium (K), and phosphorus (P), all of which were statistically significant predictors ($p < 0.01$). The inclusion of these variables enhanced the models' ability to capture TOC variability across Chernozems. That is, explanatory capability of PTF3 increased by more than 30 % in terms of the determination coefficient R^2 , which meets the criteria for high model accuracy [37]. Considering both model accuracy and practical applicability, PTF2 can recommended for use in agricultural land monitoring,

particularly where full agrochemical dates (including humus, K, and P) are available. For cases with restricted laboratory access or where nitrogen data are not consistently reliable, PTF3 offers a more parsimonious yet sufficiently accurate alternative.

In the case of Chernozems Haplic, model PTF5 includes five predictors, but the p-value for humus ($p = 0.45$) and nitrogen ($p = 0.96$) suggests weak its individual contributions, despite the relatively high R^2 of 0.63. Conversely, PTF6, based only on K and P, shows better individual significance for both variables ($p = 0.003$ and $p = 0.016$ respectively), although with a slightly lower R^2 of 0.45 (Table 4).

For Calcic Chernozems, PTF7, which relies solely on humus, achieves a decent R^2 of 0.47 ($p = 0.019$). Model PTF8, which integrates five variables, demonstrates the highest explanatory power among all models ($R^2 = 0.85$), but some predictors (e.g., humus and nutrients) lack strong statistical significance ($p > 0.20$). PTF9, a reduced model excluding pH and N, still provides high predictive ability ($R^2 = 0.71$) with improved variable significance.

Thus, the inclusion of multiple predictors generally increases the determination coefficient; however, not all variables contribute significantly. Models such as PTF3 (Chernozems Haplic) and PTF9 (Chernozems Calcic) strike a balance between parsimony and predictive strength. The effectiveness of each model is context-dependent, and overfitting remains a risk when including statistically insignificant variables.

4. Discussion

4.1. Soil indicators

Descriptive statistics of the soil properties provide insights into the variability of TOC content across the studied sample set. The mean TOC concentration was 19.79 g/kg, with a standard deviation of 2.07 g/kg, indicating moderate variability within the dataset. In contrast, Humus content showed limited dispersion ($\sigma = 0.45$ %; range: 2.29–4.16 %), suggesting a relatively uniform this indicator among others.

The narrow range of humus variation likely contributed to its lower statistical influence in linear regression models. Although Humus is a primary source of TOC and proven relationship between carbon and Humus, its stable levels across samples may have diminished its predictive power in statistical modeling. On the other hand, more pronounced variability in the concentrations of available potassium (range = 142 mg/kg; $\sigma = 28.5$) and phosphorus (range = 128.5 mg/kg; $\sigma = 28.1$) was associated with their greater significance as predictors in multifactor models.

Additionally, the high skewness ($Sk = 2.81$) and excess kurtosis ($Kurt = 12.25$) observed in soil pH values highlight notable heterogeneity in the soil acid–base balance, which can substantially affect organic matter mineralization and carbon sequestration dynamics. This underscores the importance of including broader fertility indicators (e.g., mobile nutrient forms, pH) in predictive models for SOC, particularly in agroecosystems where Humus content remain within a narrow amplitude.

Therefore, the findings suggest that predictive models incorporating multiple soil fertility parameters—especially Potassium, Phosphorus, and pH – are statistically more robust and practically applicable in environments with relatively stable Humus content.

The Humus content did not appear to be a key factor in driving the TOC content, as a number of studies have shown. The reasons for this may be: a) limited variability of Humus content in the samples. If, for example, in Chernozems Haplic, the Humus content ranges within the limits insufficient to form a strong statistical dependence, its contribution may be devalued compared to more variable indicators (e.g., Potassium or Phosphorus); b) the effect of multicollinearity, since Humus correlates with Nitrogen

(Table 3) and therefore loses its individual significance in the multivariate model; the specific features of the soil texture were not taken into account, but the effect of specific fractions on the content of organic matter is known [41, 42].

As a reminder, there is a mismatch between soil organic matter (SOM) and Humus. In the vast majority of studies, correlations have been established between SOM and SOC, not between humus and SOC. In fact, the conversion factor of 0.58 is based on the assumption that soil organic matter (not humus) contains about 58 % carbon on average. But this is a topic for a scientific discussion of a different character than our planned tasks.

Based on our results the average TOC/Humus ratio across all Chernozems samples was 0.635 (ranging from 0.495 to 0.92), indicating substantial variation in the proportion of TOC within the organic matter pool (Table 5). Similar values were observed for Chernozems Haplic (mean: 0.625) and Chernozems Calcic (mean: 0.650) subtypes. Considering of previous studies reporting average conversion ratios between 0.55 and 0.60 e.g. [36, 37], and underscores the necessity of site-specific calibration in SOC modeling.

Table 5
Statistical parameters of the Humus (%) and TOC (g/kg) content

Parameters	Chernozems (n = 29)		Chernozems Haplic (n = 18)		Chernozems Calcic (n = 11)	
	Humus	TOC	Humus	TOC	Humus	TOC
Mean	3.16	19.79	3.06	18,8	3,33	21,4
St. Error	0.08	0.385	0.096	0,44	0,14	0,38
Median	3.18	20.08	3.045	18,4	3,30	21,6
St.Deviation	0.45	2.07	0.41	1,87	0,48	1,27
Variance	0.20	4.30	0.17	3,49	0,23	1,60
Kurtosis	-0.52	-0.96	-0.72	-1,46	0,007	-1,09
Skewness	0.02	-0.25	-0.03	0,10	-0,27	0,07
Minimum	2.29	15.946	2.29	15,946	2,51	19,604
Maximum	4.16	23.46	3.72	21,825	4,16	23,46
Average TOC/Humus Ratio (min-max)	0.635 (0.495 – 0.92)		0.625 (0.495 – 0.92)		0.65 (0.54 – 0.78)	

Taking into account the wide variability in TOC-to-humus ratios observed in our study (ranging from 0.495 to 0.92), the use of a conventional conversion factor (e.g., 0.58) to estimate TOC content from Humus may lead to substantial inaccuracies. Our results clearly illustrate that such a generalized approach does not reflect the actual diversity of soil organic matter composition. Therefore, this underlines the critical need for site-specific or regionally calibrated studies aimed at improving the accuracy of TOC estimations, particularly in the context of carbon stock modeling and climate-smart soil management.

Taken together, these findings underline the importance of considering soil subtype when evaluating organic matter pools. The differences in both central tendency and variability between Haplic and Calcic Chernozems have implications for carbon budgeting, nutrient management, and the selection of pedotransfer functions in region-specific models.

4.2. The assessment of predictive power and explanatory capability of the PTF

Model agreement and statistical significance. Across all model variants tested, the results of the two-sample t-tests showed no statistically significant differences

between the predicted and measured TOC values at the 95 % confidence level ($p > 0.05$ for all comparisons; Table 6). For instance, model PTF1 yielded a mean TOC prediction nearly identical to the measured value (19.784 vs. 19.787 g/kg, $p = 0.994$), while models PTF3 and PTF5 showed similarly close alignment ($p = 0.997$ and 0.974 , respectively). Even in comparisons between model pairs, such as PTF3 vs. PTF1 or PTF7 vs. PTF9, no significant differences were observed ($p = 0.996$ and 0.21 , respectively), indicating internal consistency among the modeling approaches (Table 6).

Table 6
Results of two-sample t-test comparing predicted and measured TOC values

Model	Mean, g/kg	Variance	t Stat	P(T<=t) two-tail	t Critical two-tail
PTF1 / measured	19.784 / 19.787	0.90 / 4.30	0.007	0.994	2.02
PTF3 / measured	19.786 / 19.787	2.29 / 4.30	0.003	0.997	2.01
PTF3 / PTF1	19.786 / 19.784	2.29 / 0.90	0.004	0.996	2.01
PTF5 / measured	18.83 / 18.81	2.21 / 3.49	0.032	0.974	2.04
PTF6 / measured	19.16 / 18.81	1.64 / 3.49	0.66	0.514	2.04
PTF5 / PTF6	18.83 / 19.16	2.21 / 1.64	-0.72	0.475	2.03
PTF7 / measured	21.86 / 21.38	0.76 / 1.60	-1.04	0.312	2.10
PTF9 / measured	21.32 / 21.38	1.02 / 1.60	0.12	0.909	2.09
PTF7 / PTF9	21.86 / 21.32	0.76 / 1.02	1.30	0.210	2.09

Comment: t Stat – computed value of the t-statistic; P(T ≤ t) two-tail – two-sample p-value; t Critical two-tail – critical t-value for a two-sample t-test at $\alpha = 0.05$

Model accuracy across soil groups. In terms of predictive power, performance varied depending on the soil subtypes. For the total dataset ($n = 29$), model PTF3 outperformed PTF1, showing a lower RMSE (1.40 vs. 1.81 g/kg), lower NRMSE (7.06 % vs. 9.16 %), and higher R^2 (0.54 vs. 0.21), suggesting improved model generalizability (Table 7).

Table 7
Statistical Characteristics of the Derived Pedotransfer Functions

Parameters	PTF1*, PTF5, PTF7	PTF3, PTF6, PTF9
<i>Chernozems (n=29)</i>		
MAE, g/kg	1.61	1.07
MAD, g/kg	0.78	1.22
RMSE, g/kg	1.81	1.40
NRMSE, %	9.16	7.06
R^2	0.21	0.54
Model quality	Moderate	Good
Usability	Moderate	High
<i>Chernozems Haplic</i>		
MAE, g/kg	0.87	1.22
MAD, g/kg	0.95	0.89
RMSE, g/kg	1.10	1.40
NRMSE, %	5.87	7.42
R^2	0.63	0.45
Model quality	Good	Moderate
Usability	High	Moderate
<i>Chernozems Calcic</i>		
MAE, g/kg	0.71	0.54
MAD, g/kg	0.53	0.34
RMSE, g/kg	0.97	0.65
NRMSE, %	4.53	3.04
R^2	0.47	0.71
Model quality	Good	High
Usability	High	Good

Comment: PTF1, PTF3 – only for all Chernozems; PTF5, PTF6 – only Chernozems Haplic; PTF7, PTF9 – only Chernozems Calcic

When models were tested within soil subtypes, PTF5 (applied to Chernozems Haplic) demonstrated better performance than PTF6, with lower MAE (0.87 vs. 1.22 g/kg), lower RMSE (1.10 vs. 1.40 g/kg), and higher R^2 (0.63 vs. 0.45). Similarly, for Chernozems Calcic, PTF9 showed superior accuracy compared to PTF7, achieving a notably lower RMSE (0.65 vs. 0.97 g/kg), NRMSE (3.04 % vs. 4.53 %), and a higher R^2 (0.71 vs. 0.47).

These differences, although not statistically significant in terms of mean values, as confirmed by the t-test, may be practically important when selecting models for operational TOC estimation in soil subtypes. The greater predictive power of PTF9 and PTF5 in their respective domains highlights the advantage of tailoring models to concrete soil with similar physicochemical properties.

4.3. General implications

The overall absence of significant bias between predicted and measured TOC values, combined with moderate-to-high R^2 values (especially for subtypes-specific models), confirms the feasibility of using these models for local-level TOC estimation. The highest predictive accuracy was achieved in Chernozems Calcic (R^2 up to 0.71), suggesting that TOC distribution in these soils may follow more consistent patterns compared to the broader dataset. The obtained results a two-sample t-test was applied for each model variant indicate an overall absence of statistically significant differences at the 0.05 level between the predicted and measured SOC values for all models considered (Table 6).

In particular, for the models PTF1, PTF3, and PTF5, the predicted means closely matched the measured TOC values (e.g., 19.784 vs. 19.787 g/kg for PTF1), with p-values significantly exceeding 0,05 ($p = 0.994$, 0.997 , and 0.974 , respectively). Similarly, comparisons between the model pairs (PTF3 vs. PTF1, PTF5 vs. PTF6, and PTF7 vs. PTF9) also revealed no significant differences, suggesting model stability and internal consistency across tested approaches.

Even the model PTF6, which, despite exhibiting a slightly higher mean TOC prediction (19.16 g/kg) compared to the measured value (18.81 g/kg), did not yield a statistically significant difference ($p = 0.514$). This further supports the robustness of the model under the current dataset.

It's interesting, models PTF7 and PTF9, which had the highest predicted means among all models tested (21.86 and 21.32 g/kg, p-values of 0.312 and 0.909, respectively), also showed non-significant deviations from the measured mean (21,38 g/kg). The direct comparison between these two models (PTF7 vs. PTF9) indicating the absence of bias between model variants predicting higher TOC contents.

Taken together, these results confirm that none of the tested models exhibit systematic bias relative to the measured TOC data. Therefore, the predicted values can be considered statistically interchangeable with the observed ones under the tested conditions, thereby confirming the adequacy of the models for practical application in TOC estimation. Given the absence of bias and the acceptable levels of prediction error (NRMSE < 10 % for all models), the tested PTFs may be reliably used for TOC assessment in agricultural monitoring, land-use planning, and carbon stock estimation, particularly when tailored to specific soil types.

The decision to choose a PTF model for practical application should take into account the best predictive power and explanatory capability of the model, and contain as few predictors as possible, which will ensure the efficiency of the model. At the same time, a larger number of predictors will a priori have a higher complexity both because of the need to determine the appropriate soil indicators and because of the increased possibility of errors (more analyzes - more probability of errors). Reducing the number of

predictors helps minimize the influence of variability and potential analytical uncertainty in different scale assessments.

Future research should focus on expanding the model database across diverse soil-climatic zones, incorporating additional predictor variables (e.g., texture, bulk density, pH), and validating models using independent datasets under field conditions. Future work should explore the generalizability of the most accurate models (e.g., PTF2, PTF9) to broader soil types and under varying climatic and topographic conditions. Additionally, expanding model calibration with remote sensing data (e.g., NDVI, LST) may improve estimation in data-scarce regions.

5. Conclusions

This study evaluated the predictive accuracy and statistical validity of pedotransfer functions (PTFs) for estimating soil TOC content across Chernozems Haplic and Calcic. The following key conclusions can be drawn:

1. The models were assessed in terms of their robustness, accuracy, and predictive ability across diverse soils and input variables. No statistically significant differences were observed between predicted and measured TOC values for any of the models, as confirmed by two-sample t-tests ($p > 0.05$). This indicates that the models provide unbiased estimates and are statistically consistent with observed TOC measurements.

2. Model performance varied across soil subtypes. Among models for all Chernozems, PTF3 demonstrated superior accuracy over PTF1 for the entire dataset. Soil-specific models yielded higher performance: PTF5 showed better accuracy for Chernozems Haplic than PTF6; PTF9 outperformed PTF7 in Chernozems Calcic, reaching the highest overall R^2 (0.71) and the lowest NRMSE (3.04 %). Models calibrated separately for Chernozems Haplic and Calcic showed notably better performance than models developed for the entire dataset. This highlights the importance of considering soil classification when developing or applying PTFs for TOC estimation.

3. The decision to choose a model for predicting TOC content is the prerogative of a researcher. Our vision of the practical use of modeled PTFs is as follow: if no exact information on the taxonomic classification of soils is available, PTF3 (balance of simplicity, Predictive ability and Power); for Chernozems Haplic, PTF5 (highest accuracy, takes into account pH, K, P indicators), and for Chernozems Calcic, PTF7 (Predictive performance and Predictive ability).

4. The proposed models have some restrictions: 1) our sample concerned two soil subtypes in a specific location, which may affect the external validity of the models; 2) the factor that narrows the representativeness of pedotransfer functions is the quality of input data, both in terms of the accuracy of laboratory measurements and the representativeness of field soil sampling. The results should be interpreted taking into account the existing limits of PTF applicability.

Therefore, for practical TOC prediction, we recommend using adapted PTFs for the respective soils, taking into account the importance of the inputs and the ease of application.

References

1. Kaur, M., Nagabhooshanam, N., & Sharma, P. (2024). Quantifying the carbon sequestration potential of different soil management practices aimed at increasing organic content in soil and reducing the usage of chemical inputs. *Global NEST Journal*, 26(7). <https://doi.org/10.30955/gnj.05932>
2. Campos-Cáliz, A., Valencia, E., Plaza, C., Garland, G., Edlinger, A., Herzog, C., ... García-Palacios, P. (2024). The positive effects of soil organic carbon on European cereal yields level off at 1.4 %. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 3, e70017. <https://doi.org/10.1002/sae2.70017>

3. Xie, E., Chen, J., Peng, Y., Yan, G., & Zhao, Y. (2024). Historical and future dynamics of cropland soil organic carbon stocks in an intensive human-impacted area of southeastern China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 372, 109098. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109098>
4. Colombi, T., Walder, F., Büchi, L., Sommer, M., Liu, K., Six, J., ... Keller, T. (2019). On-farm study reveals positive relationship between gas transport capacity and organic carbon content in arable soil. *SOIL*, 5(1), 91–105. <https://doi.org/10.5194/soil-5-91-2019>
5. Körschens, M. (2002). Importance of soil organic matter (SOM) for biomass production and environment: A review. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 48(2), 89–94. <https://doi.org/10.1080/03650340214162>
6. Kanaujia, A., Gupta, J., Banerjee, S., & Malik, S. (2022). Correlation of organic carbon content of soil on paddy productivity: A case study. *International Journal of Advances in Agricultural Science & Technology*, 9(3), 43–46. <https://doi.org/10.47856/ijaast.2022.v09i03.003>
7. Chatterjee, A. Lal, R., Wielopolski, L., Martin, M. Z. & Ebinger, M. H. (2009). Evaluation of different soil carbon determination methods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(3), 164–178. <https://doi.org/10.1080/07352680902776556>
8. Abu El Haija, K., Chiang, Y. W., & Dos Santos, R. M. (2024). On-site determination of soil organic carbon content: A photocatalytic approach. *Clean Technologies*, 6(2), 784–801. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6020040>
9. Berthelin, J., Laba, M., Lemaire, G., Powison, D., Tessier, D., Wander, M., & Baveye, P. C. (2022). Soil carbon sequestration for climate change mitigation: Mineralization kinetics of organic inputs as an overlooked limitation. *European Journal of Soil Science*, 73(1). <https://doi.org/10.1111/ejss.13221>
10. Zhao, T., Kubota, H., Hernandez-Ramirez, G. (2024). Contrasting soil organic carbon concentrations and mass storage between conventional farming and organic farming: A meta-analysis. *Sustainability*, 16(24), 11260. <https://doi.org/10.3390/su162411260>
11. Pulleman, M. M., Jongmans, A. G., Marinissen, J. C. Y., & Bouma, J. (2003). Effects of organic versus conventional arable farming on soil structure and organic matter dynamics in a marine loam in the Netherlands. *Soil Use and Management*, 19(2), 157–165. <https://doi.org/10.1079/SUM2003183>
12. Sheoran, S., Meena, R. S., & Sharma, D. K. (2019). Impact of organic and conventional farming practices on soil quality: A global review. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(1), 951–968. https://doi.org/10.15666/aeer/1701_951968
13. Segura, C., Neal, A. L., Castro-Sardiña, L., Harris, P., Rivero, M. J., Cardenas, L.M., & Irisarri, J. G. N. (2024). Comparison of direct and indirect soil organic carbon prediction at farm field scale. *Journal of Environmental Management*, 365, 121573. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121573>
14. Wadoux, A. M. J.-C., Minasny, B., McBratney, A. B. (2020). Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions. *Earth-Science Reviews*, 210, 103359. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103359>
15. Fernandez-Ugalde, O., Tóth, G. (2017). Pedotransfer functions for predicting organic carbon in subsurface horizons of European soils. *European Journal of Soil Science*, 68, 716–725. <https://doi.org/10.1111/ejss.12464>
16. Benke, K. K., Norng, S., Robinson, N. J., Chia, K., Rees, D. B., & Hopley, J. (2020). Development of pedotransfer functions by machine learning for prediction of soil electrical conductivity and organic carbon content. *Geoderma*, 366, 114210. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114210>
17. Xu, L., He, N. P., Yu, G. R., Wen, D., Gao, Y., & He, H. L. (2015). Differences in pedotransfer functions of bulk density lead to high uncertainty in soil organic carbon estimation at regional scales: Evidence from Chinese terrestrial ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(8), 1567–1575. <https://doi.org/10.1002/2015JG002929>
18. Hateffard, F., Szatmári, G., & Novák, T. (2023). Applicability of machine learning models for predicting soil organic carbon content and bulk density under different soil conditions. *Soil Science Annual*, 74(1), 165879. <https://doi.org/10.37501/soilsa/165879>
19. Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7, 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
20. Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not. *Geoscientific Model Development*, 15, 5481–5487. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>
21. Auzzas, A., Carpa, G. F., Jani, A. D., & Ganga, A. (2024). An improved digital soil mapping approach to predict total N by combining machine learning algorithms and open environmental data. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10, 6519–6538. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02127-8>
22. Dangal, S. R. S., Sanderman, J., Wills, S., & Ramirez-Lopez, L. (2019). Accurate and precise prediction of soil properties from a large mid-infrared spectral library. *Soil Systems*, 3(1), 11. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3010011>
23. Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
24. Voltr, V., Menšík, L., Hlisenkovský, L., Hruška, M., Pokorný, E., & Pospíšilová, L. (2021). The soil organic matter in connection with soil properties and soil inputs. *Agronomy*, 11, 779. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040779>
25. Zhang, H. Wu, P., Yin, A., Yang, X., Zhang, M., & Gao, C. (2017). Prediction of soil organic carbon in an intensively managed reclamation zone of eastern China: A comparison of multiple linear regressions and the random forest model. *Science of the Total Environment*, 592, 704–713. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.146>
26. Ribeiro, S. G., Oliveira, M., Lopes, L. M., Costa, M. C. G., Toma, R. S., Araújo, I. C. S., ... Teixeira, A. S. (2023). Reflectance spectroscopy in the prediction of soil organic carbon associated with humic substances. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 47, e0220143. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220143>
27. John, K., Abraham Isong, I., Michael Kebonye, N., Okon Ayito, E., Chapman Agyeman, P., & Marcus Afu, S. (2020). Using machine learning algorithms to estimate soil organic carbon variability with environmental variables and soil nutrient indicators in an alluvial soil. *Land*, 9, 487. <https://doi.org/10.3390/land9120487>
28. Ľupek, B., Ortiz, C. A., Hashimoto, S., Stendahl, J., Dahlgren, J., Karlun, E., & Lehtonen, A. (2016). Underestimation of Boreal Soil Carbon Stocks by Mathematical Soil Carbon Models Linked to Soil Nutrient Status. *Biogeosciences*, 13, 4439–4459. <https://doi.org/10.5194/bg-13-4439-2016>

29. Lal, R. (2008). Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society: Biological Sciences*, 363(1492), 815-830. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>
30. Lal, R. (2015). Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustainability*, 7, 5875-5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
31. Klaus, L., Lal, R., Ehlers, K. (2019). Soil organic carbon stock as an indicator for monitoring land and soil degradation in relation to United Nations' Sustainable Development Goals. *Land Degradation & Development*, 30(7), 824-838. <https://doi.org/10.1002/ldr.3270>
32. Romanova, S., Dmytruk, Y., Zhukova, Y. (2024). Soil monitoring infrastructure in response to war. *International Journal of Environmental Studies*, 81(1), 189–198. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2314892>
33. Yatsuk, I. P., Balyuk, S. A. (Eds.). (2019). *Methodology for Agricultural Chemical Certification of Agricultural Land: Guidance Document*. Kyiv [In Ukrainian].
34. Haddaway, N. R., Hedlund, K., Jackson, L. E., Kätterer, T., Lugato, E., Thomsen, I. K., ... Isberg, P.-E. (2017). How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review. *Environmental Evidence*, 6:30. <https://doi.org/10.1186/s13750-017-0108-9>
35. Nocita, M., Stevens, A., Toth, G., Panagos, P., Wesemael, B., & Montanarella, L. (2014). Prediction of soil organic carbon content by diffuse reflectance spectroscopy using a local partial least square regression approach. *Soil Biology and Biochemistry*, 68, 337-347. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.10.022>
36. Grunwald, S., Congrong, Y.U., & Xiong, X. (2018). Transferability and Scalability of Soil Total Carbon Prediction Models in Florida, USA. *Pedosphere*, 28(6), 856-872. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60048-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60048-7)
37. Willmott, C. J. & Matsuura, K. (2005). Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the Root Mean Square Error (RMSE) in Assessing Average Model Performance. *Climate Research*, 30, 79-82. <http://dx.doi.org/10.3354/cr030079>
38. Minasny, B., McBratney, A. B., Malone, B. P., & Wheeler, I. (2013). Chapter One – Digital Mapping of Soil Carbon. *Advances in Agronomy*, 118, 1-47. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405942-9.00001-3>
39. Jensen, J. L., Christensen, B. T., Schjørring, P., Watts, C. W., & Munkholm, L. J. (2018). Converting loss-on-ignition to organic carbon content in arable topsoil: pitfalls and proposed procedure. *The European Journal of Soil Science*, 69(4), 604-612. <https://doi.org/10.1111/ejss.12558>
40. Prout, J. M., Shepherd, K. D., McGrath, S. P., Kirk, G. J. D., & Haefele, S. M. (2021). What is a good level of soil organic matter? An index based on organic carbon to clay ratio. *The European Journal of Soil Science*, 72(6), 2493-2503. <https://doi.org/10.1111/ejss.13012>
41. Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A. & Paustian, K. (2002). Stabilization Mechanisms of Soil Organic Matter: Implications for C-Saturation of Soils. *Plant Soil*, 241, 155-176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
42. Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., Lützw, M., Marin-Spiotta, E. ... Kögel-Knabner, I. (2019) Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>

УДК 631.417.1:631.445.4(292.485:477.5)

Педотрансферні функції для прогнозування вмісту органічного вуглецю в чорноземах типових і звичайних на прикладі Лівобережного Лісостепу України

Ю. М. Дмитрук^{1,2} ✉, Р. П. Паламарчук¹, Я. Ф. Жукова¹, Н. В. Степаненко¹

¹ Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України», Київ, Україна

² ЗВО «Подільський державний університет», Кам'янець-Подільський, Україна

✉ dmytruk.yur@gmail.com

Отримано 12.05.2025; Доопрацьовано 14.06.2025; Затверджено 17.06.2025; Доступно online 01.07.2025

Розширена анотація

Наразі в Україні моніторинг ґрунтів у його науковому розумінні відсутній, а реальним контролем стану ґрунтів на землях с.-г. призначення є агрохімічна сертифікація. Проте її методика не передбачає вимірювання вмісту органічного вуглецю у ґрунті (ОВГ) і, враховуючи триваючу війну та обмежене державне фінансування, фундаментальна реформа системи моніторингу ґрунтів найближчим часом не очікується. Для подолання інформаційних прогалин щодо кількості та запасів ОВГ вирішальне значення має моделювання на основі доступних агрохімічних показників. Метою цього дослідження є створення з використанням даних агрохімічної паспортизації ґрунтів та оцінка педотрансферних функцій (ПТФ) для прогнозування вмісту ОВГ у чорноземах типових і звичайних Лівобережного Лісостепу України. **Цілі дослідження:** 1. З використанням сучасного аналізатора Multi EA 4000 в зразках ґрунтів, відібраних з орного горизонту, визначити вміст ОВГ та агрохімічні показники (вміст гумусу, доступних форм фосфору та калію, лужногідролізованого азоту, рН_{NH2O}); 2. Як предиктори для моделювання серії ПТФ в цілях прогнозу вмісту ОВГ використати вказані ґрунтові показники як окремі, так і їх поєднання; 3. Для створених варіантів ПТФ провести порівняльне оцінювання ефективності моделей з огляду на їхню прогностичну силу та пояснювальну здатність, використовуючи статистичні критерії (MAE, RMSE, NRMSE, R² та MAD); 4. Визначити можливості застосування побудованих ПТФ для практичного використання в контексті підтримки рішень щодо сталого управління ґрунтовими ресурсами. **Матеріали та методи.** У процесі агрохімічної сертифікації зразки ґрунтів було відібрано з верхнього (орного) горизонту (0–20 см) у межах Лівобережної височинної провінції Лісостепової зони для двох підтипів чорноземів: типовий (n = 18) та звичайний (n = 11). Окрім стандартних агрохімічних аналізів, здійснених в лабораторії Полтавської філії Державної установи «Інститут охорони ґрунтів України», у київській лабораторії цієї ж установи визначали загальний вміст вуглецю (ТС), загальний вміст неорганічного вуглецю (ТІС) та загальний вміст органічного вуглецю (ТОС) у тих самих зразках ґрунтів. Вміст вуглецю визначали за допомогою аналізатора Multi EA 4000 (Jena) шляхом спалювання, під час якого вуглець окиснюється до CO₂ за різної температури в кисневій атмосфері. Загальний обсяг вивільненого

вуглецю вимірювали автоматично за допомогою недисперсійного інфрачервоного детектора (NDIR). Загальний вміст органічного вуглецю (ТОС) визначали як різницю між загальним вмістом вуглецю і вмістом неорганічного вуглецю: $ТОС = ТС - ТІС$ (г/кг ґрунту). Статистичний, кореляційний та регресійний аналізи проводили з використанням програми Excel для оцінювання точності моделей та узгодженості між прогнозованими та вимірними значеннями ТОС. Статистично значущість відмінностей між групами прогнозованих значень вмісту ТОС оцінювали за допомогою двовибіркового t-критерію з припущенням нерівних дисперсій. В оцінці узгодженості між прогнозованими та вимірними значеннями ТОС використовували як статистичні показники точності, так і перевірку гіпотез. **Результати та висновки.** Вміст гумусу та ОБґ (ТОС) практично відповідають нормальному розподілу, що дозволяє нам правильно оцінювати довірчі інтервали та рівні значущості, застосовуючи параметричні статистичні тести. Крім того, що особливо важливо, нормальність розподілу є передумовою для надійного використання лінійної регресії. Також для обґрунтування вибору предикторів для побудови ПТФ, спрямованих на оцінку вмісту ОБґ (ТОС), були проаналізовані парні коефіцієнти кореляції між властивостями ґрунтів. Вміст гумусу не завжди був ключовим фактором, що впливає на вміст органічного вуглецю. Можливими причинами цього можуть бути: а) обмежена амплітуда вмісту гумусу у відібраних нами зразках; б) вплив мультиколінеарності, оскільки гумус достовірно корелює, наприклад, з умістом азоту, а тому втрачає своє індивідуальне значення в багатовимірній моделі; в) відсутні дані про гранулометричний склад ґрунтів, окремі фракції якого можуть мати значний вплив на органічну речовину ґрунтів. Беручи до уваги широку мінливість співвідношень ТОС і гумусу, що спостерігалися в нашому дослідженні (від 0,495 до 0,92), використання звичайного коефіцієнта перетворення (0,58) для оцінки вмісту ТОС на основі вмісту гумусу може призвести до суттєвих неточностей. Наші результати чітко ілюструють, що такий узагальнений підхід не відображає фактичної різноманітності складу органічної речовини ґрунтів. Це підкреслює критичну потребу в локальних дослідженнях, з урахуванням специфіки та структури ґрунтового покриву в конкретних ареалах, спрямованих на підвищення точності оцінок ТОС, особливо в контексті моделювання запасів вуглецю та програми кліматично розумного управління ґрунтами. Прогнозовані значення вмісту ТОС з використанням створених нами ПТФ можна вважати статистично взаємозамінними зі спостережуваними в протестованих умовах, що підтверджує адекватність створених нами моделей для практичного застосування в оцінці вмісту ТОС. Враховуючи відсутність зміщення та прийнятні рівні похибки прогнозування ($NRMSE < 10\%$ для всіх моделей), протестовані ПТФ можуть бути надійно використані для оцінювання ТОС у програмах моніторингу орних ґрунтів з наступною оцінкою запасів ТОС, у плануванні заходів вуглецевого землеробства та вуглецевої сертифікації, особливо якщо за використання ПТФ будуть враховані конкретні таксони ґрунтів. Рішення про вибір моделі для прогнозування вмісту ТОС є прерогативою дослідника. Наше бачення практичного використання змодельованих ПТФ є таким: якщо бракує точної інформації про класифікаційну приналежність ґрунтів, доцільно використовувати створену нами ПТФ3: $ТОС$ (г/кг) = $11,0 + 2,394 \text{Гумус} - 0,049P + 0,065K$; якщо точно визначено тип ґрунту, то для чорноземів типових оптимальним варіантом буде ПТФ5: $ТОС$ (г/кг) = $32,1 + 1,21 \text{Гумус} + 0,0017N + 0,088K - 0,085P - 2,71pH$, а для чорноземів звичайних — ПТФ7: $ТОС$ (г/кг) = $15,4 + 1,81 \text{Гумус}$. Вказані пропозиції не виключають можливості використання всіх створених нами ПТФ. Запропоновані моделі мають певні обмеження: 1) наша вибірка стосувалася двох підтипів ґрунтів у конкретних умовах, що може вплинути на зовнішню валідність моделей; 2) чинником, що звужує репрезентативність ПТФ, є якість вхідних даних, як зі сторони точності лабораторних вимірювань, так і щодо репрезентативності ґрунтових зразків. Змодельовані результати необхідно інтерпретувати з урахуванням існуючих обмежень у застосуванні ПТФ.

Ключові слова: органічний вуглець ґрунту; чорноземи типові і звичайні; педотрансферні функції

Форма цитування: Dmytruk Y. M., Palamarchuk R. P., Zhukova Y. F., Stepanenko N. V. Pedotransfer functions for prediction of soil organic carbon content for Chernozems Haplic and Calcic: A Case Study from the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків, 2025. Вип. 98. С. 19–35. doi: 10.31073/acss98-02

УДК 631.436.5.6:631.423.2(477.54)

Вплив гідротермічного режиму на міграцію карбонатів кальцію у темно-сірих опідзолених ґрунтах на схилах різних експозицій у Харківській області

В. Б. Соловей^а, О. О. Троценко^б ✉

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

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 02.04.2024 Отримано після доопрацювання 14.06.2025 Затверджено до видання 17.06.2025 Доступно онлайн 01.07.2025	Представлено результати дослідження особливостей гідротермічного режиму темно-сірих опідзолених ґрунтів (Luvic Greyzemis Phaeozem (Loamic)) на схилах різної експозиції та сезонної динаміки міграції карбонатів кальцію у їхніх профілях. Дослідження проведено в Харківській області України на чотирьох близько розміщених локаціях: на схилах північно-західної та південно-східної експозицій, а також на рівнинній території та на дні балки. Встановлено, що сезонна глибина залягання карбонатів, як важлива морфологічна характеристика ґрунту, значною мірою залежить від динаміки температури і вмісту вологи у профілі ґрунту, зумовленої експозицією схилів. Вміст вологи у ґрунті визначали термостатно-ваговим методом, проби відбирали у шарі 0–120 см з кроком 10 см. Температуру ґрунту вимірювали цілодобово (з інтервалом 30 хвилин) протягом усього періоду досліджень за допомогою термосенсорів, оснащених цифровими датчиками DS18B20, встановленими з кроком 10 см (до 120 см) і одним датчиком на поверхні ґрунту (0 см). Кількість опадів вимірювали за допомогою опадоміра. Висоту снігового покриву і ступінь покриття фіксували щоденно за наявності снігу. Особливу увагу приділено ролі сезонних змін вологості ґрунту в процесах міграції та осадження карбонатів. Описано механізми вертикальної диференціації вмісту неорганічного вуглецю у ґрунтового профілі у формі карбонатів. Проаналізовано моделі їх міграції та її залежність від кліматичних, гідрологічних і біологічних чинників. Встановлено, що на північно-західному схилі, де тривалий час ґрунт залишається у стані підвищеної вологості, переважає низхідна вертикальна міграція розчинених карбонатів. На південно-східному схилі, в умовах високої інсоляції та інтенсивного випаровування, карбонати концентруються у верхніх горизонтах. На рівнинній ділянці спостерігаються проміжні (відносно схилових) гідротермічні характеристики ґрунту (сезонні коливання температури та вологості), які зумовлюють двоспрямовану міграцію карбонатів — їх вимивання в нижні горизонти восени та взимку і підйом угору навесні. У роботі розглянуто можливу індикаційну роль карбонатних конкрецій у ґрунтового профілі — як свідчення міграційно-аккумулятивних процесів, напрямку та інтенсивності міграції карбонатів, а також зміни гідротермічних умов у процесі ґрунтоутворення. Зазначено, що конкреції можуть мати як реліктове походження від материнської породи, так і бути результатом процесу ґрунтоутворення. За результатами спостережень доведено, що рельєф, гідротермічні умови та біологічна активність є ключовими факторами, які визначають розподіл і динаміку карбонатів у профілях досліджуваних темно-сірих опідзолених ґрунтів.

✉ trea140981@gmail.com

ORCID: ^а 0000-0001-9820-1780, ^б 0009-0007-0317-2907

Форма цитування: Соловей В. Б., Троценко О. О. Вплив гідротермічного режиму на міграцію карбонатів кальцію у темно-сірих опідзолених ґрунтах на схилах різних експозицій у Харківській області. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків, 2025. Вип. 98. С. 36–54. doi: 10.31073/acss98-03

1. Вступ

Вивчення змін гідротермічного режиму та сезонної динаміки глибини залягання карбонатів кальцію у профілях темно-сірих опідзолених ґрунтів на схилах різної експозиції дозволяє виявити морфологічні особливості ґрунтів та чинники, що визначають перерозподіл карбонатів. Схили з різною орієнтацією створюють різні умови для термічних і гідрологічних процесів, що безпосередньо впливають на глибину залягання карбонатів та, відповідно, на морфологічні характеристики ґрунтів. Ці характеристики відображають реакцію ґрунтів на зовнішні чинники, зокрема на зміни кліматичних/погодних умов. Сезонні коливання зволоженості ґрунтів впливають на міграцію карбонатів, їх розчинення та осадження. Ґрунтовий вуглець представлений двома формами: органічним

вуглицем ґрунту (SOC) та неорганічним (SIC) [1]. Неорганічні компоненти включають мінеральні сполуки, що утворюються в результаті геохімічних процесів, пов'язаних з вивітрюванням вихідної породи та подальшим осадженням карбонатів у ґрунтовій товщі [2]. З огляду на походження, SIC поділяється на літогенний та педогенний [3]. Літогенні карбонати успадковані від вихідної породи, тоді як педогенні карбонати утворюються *in situ* у процесі педогенезу. Розмежування цих форм вимагає застосування морфологічних та ізотопних геохімічних методів аналізу [4]. Формування педогенних карбонатів відбувається за таких умов: а) лужна реакція ґрунтового розчину; б) наявність джерела CO₂, головним чином, у вигляді кореневого та мікробного дихання (для вироблення HCO₃⁻); в) доступність кальцію в іонній формі; г) помірний вміст вологи, тобто, утворення карбонату кальцію можливе за наявності у ґрунті води [5].

Фактори, що сприяють накопиченню педогенних карбонатів, включають як зовнішні джерела, такі як еолові пилові відкладення [6] і вплив ґрунтових вод [2], так і участь розчинених бікарбонат-іонів (HCO₃⁻) та іонів Ca²⁺/Mg²⁺, що надходять із ґрунтового розчину або опадів [7, 8] та з материнської породи [6, 9]. Особливе значення у вивченні ґрунту надається вертикальній диференціації SIC, яка визначається комплексом процесів — «осадження–розчинення–повторне осадження» та описується рівнянням: CaCO₃(тв.) + H₂CO₃(водн.) ↔ Ca²⁺ + 2HCO₃⁻ [10]. Накопичення SIC найбільш характерне для посушливих та напівпосушливих зон, де створюються сприятливі умови для збереження карбонатів у ґрунті [10]. Birkeland (1999) та Royer (1999), на яких посиляється Monger (2014) у роботі [5], зазначають, що педогенний карбонат не утворюється в ґрунтовому профілі при кількості опадів понад 500-760 мм. Також, було зазначено, що у посушливих зонах сучасних пустель, де відсутня рослинність, педогенний карбонат не формується. Це свідчить про те, що його утворення почалося лише після еволюції рослинного покриву, завдяки процесам кореневого дихання та виділенню CO₂. Більш сучасне дослідження вказує, що формування педогенних карбонатів можливо у пустелі в умовах тривалої аридності, з епізодичним зволоженням [11], що сприяло розвитку розрідженої рослинності, яка прискорювала накопичення педогенних карбонатів.

У роботі [5] виділяють два режими вуглецевого циклу: в умовах зволоження переважає вимивання розчинених форм у нижні горизонти або в систему підґрунтових вод (ґрунти, що промиваються), тоді як у посушливих регіонах зберігається стійкий запас карбонатів у верхній частині профілю (не промивні ґрунти). Осадження і вилугування карбонатів на глибоких рівнях ґрунту розглянуто [12].

Міграція карбонатів у ґрунтовому профілі може змінюватися з різних причин: низхідними рухами розчинів (*perdescendum*), висхідними рухами розчинів (*perascendum*), за відсутності значного руху (*in situ*) та під впливом біологічних факторів [13]. Однак, як відмічається в роботі [14] ні низхідне, ні висхідне переміщення розчинів не пояснюють повністю утворення карбонатних конкрецій у лесових відкладах. Автори [14] пропонують альтернативну модель — «евапотранспіраційну» (*perevapotranspiration*), де ключову роль відіграють процеси випаровування та транспірації. Модель *perevapotranspiration* пояснює формування вапняних конкрецій (CN — *calcareous nodules*, вміст CaCO₃ у яких коливається в межах 30–70 %) на схилах і біля коренів рослин через випаровування, міграцію розчинених речовин і вплив рослинності. Модель враховує спорадичний розподіл та асиметричні форми CN, а також їх розташування залежно від інтенсивності випаровування та щільності рослинного покриву. Модель також враховує вплив транспірації рослин і випаровування на переміщення карбонатів, що особливо важливо в умовах різної експозиції схилів (наприклад, південні схили характеризуються вищою інтенсивністю

випаровування). У пониженнях рельєфу (улоговини в межах схилу), накопичується більше води (завдяки поверхневому стоку), тому процеси осадження карбонатів можуть відрізнятися. Модель більш ефективна в посушливих регіонах, де випаровування перевищує інфільтрацію. У регіонах із сезонними змінами водного балансу (наприклад, зволоження в період осінь-зима і випаровування влітку) можливі періодичні коливання концентрації карбонатів у поверхневих шарах. Рослинність з високою транспірацією (наприклад, багаторічні трави) може локально підвищувати концентрацію кальцію та сприяти утворенню CN у кореневій зоні. Модель інтегрує концепцію «папілярів стоку» [15], яка розглядає процеси формування поверхневого стоку на схилах. Утворення мікрорельєфу і локального накопичення води, впливає на мікроклімат, вологість і формування CN. Апарат «папілярів стоку», пояснює механізм формування стоку на схилах, особливо в умовах, коли потік води є локальним та розосередженим. Це може пояснити механізм утворення CN, особливо в зонах з характерним для схилів рельєфом та водоутримувальними характеристиками ґрунту.

Опосередкований вплив підвищення температури ґрунту пов'язаний з активністю мікроорганізмів та ферментів, які прискорюють розкладання органічної речовини ґрунту (SOM) та виділення CO₂, що, своєю чергою, впливає на SIC. Вплив температури на біологічні та хімічні процеси в ґрунті має нелінійний характер і залежить від конкретних умов. Тобто, система «бікарбонат-мінерал-дихання-фотосинтез» приводиться в дію сонячною енергією [5], яка впливає на всю систему через термодинамічний показник — температуру повітря і ґрунту. Цей вплив можна розглядати через два основних механізми: біологічну активність та процеси випаровування.

Підвищення температури посилює біологічну активність ґрунту, включаючи активізацію дихання коренів та діяльність мікроорганізмів. Це веде до збільшення концентрації вуглекислого газу в ґрунтовому розчині та більш інтенсивного розчинення карбонатів [16]. Цей процес відповідає правилу Вант-Гоффа, згідно з яким швидкість реакції збільшується в 2-4 рази з підвищенням температури на кожні 10° С. Однак правило Вант-Гоффа справедливе лише в певному діапазоні температур, комфортних для рослин (від +10 до +35° С). Якщо температура підвищується до +40,0–60,0/65,0° С на поверхні, це значно погіршує умови існування для більшості рослин. У таких умовах спостерігаються негативні ефекти: денатурація білків, пригнічення фотосинтезу, посилення випаровування. Зростання рослин зупиняється, а за тривалого впливу таких температур настає їх загибель. Отже, правило Вант-Гоффа діє лише в межах діапазону сприятливих для рослин температур, і воно «не працює» за екстремальних температур (+60,0–65,0°С).

Підвищення температури також сприяє посиленню випаровування вологи із ґрунту та інтенсивності евапотранспірації, що призводить до перенасичення розчинів карбонатами та їх осадження. Однак, екстремальні умови посухи, посилені високими температурами, на думку Prasad (2008) за посиланням Sánchez-Bermúdez та ін. [17] призводять до значного пригнічення інтенсивності кореневого дихання, а також зменшення надходження асимільованого вуглецю до кореневої системи. Зокрема, під час теплового стресу рослини відкривають продиhi для зниження температури листя шляхом транспірації. Однак, Reynolds-Henne (2010) за посиланням [17] вважає, що коли тепловий стрес поєднується з посухою, продиhi залишаються закритими, що унеможливорює регуляцію температури листя та призводить до її підвищення. Таким чином, вплив температури на процеси евапотранспірації та подальшого осадження карбонатів необхідно аналізувати з урахуванням рівня зволоженості ґрунту.

Мета статті — виявити вплив динаміки температури та вологості ґрунту на сезонну міграцію карбонатів кальцію і пов'язані з нею зміни морфологічних індикаторів темно-сірих опідзолених ґрунтів на плакорі та схилах різної експозиції.

2. Об'єкти і методи досліджень

2.1. Об'єкти

Дослідження проведено у Харківській області, на території, що належить до зони Лісостепу, поблизу села Коротич, на чотирьох формах мезорельєфу, які формовані річковою та балковою системами: на схилах південно-східної та північно-західної експозицій однієї балки, у її днищі та на рівнинній ділянці. Додаткову інформацію про об'єкт дослідження можна отримати з попередньої публікації [18]. Обрані схили класифікували за такими морфологічними характеристиками [19]: крутістю, довжиною та формою.

Схил північно-західної експозиції, за крутістю $2,5\text{--}2,0^\circ$ належить до категорії пологих схилів, прямої форми, середньої довжини. Ґрунт — темно-сірий опідзолений підвищено зволожений важкосуглинковий на лесі (детальний опис профілю представлено у [18]). На схилі зафіксовано горбкуватий нанорельєф, утворений діяльністю землерийних тварин (Рис. 1). Невеликі підвищення діаметром 10–50 см і висотою 20–30 см є переважно мурашниками, утвореними в результаті активної діяльності мурах, а також можуть бути зумовлені ґрунтовими викидами польових мишей (*Microtus* spp.) і, рідше, сліпаків (*Spalax* spp.). Діяльність мешканців ґрунтового середовища — едафобіонтів сприяє формуванню нанорельєфу та додатковому перемішуванню ґрунту. Не всі викиди ґрунту, створені тваринами, закріплюються рослинністю: частина з них розмивається опадами, поступово вирівнюючись. У міжгорбкових пониженнях утворюються мікропротоки, які перерозподіляють поверхневий стік у напрямку балки. Тривалість снігового покриву на схилі Пн-Зх експозиції (покриття 50–100 %) у період 2023–2024 рр. — 55 діб.



Рис. 1. Схил Пн-Зх експозиції, елементи нанорельєфу (фото О. Троценко від 16.03.2025)

Схил південно-східної експозиції має опуклу форму, крутість — $5,0\text{--}4,0^\circ$, середньої довжини. Ґрунт — темно-сірий опідзолений сильноксероморфний (сильнозмитий) важкосуглинковий на лесі. Межа його розповсюдження проходить між нижньою частиною схилу та початком балки, де за напрямком на схід закінчується крутим спуском за 12 м до її днища. Тривалість снігового покриву на схилі Пд-Сх експозиції (покриття 50–100 %) у період 2023–2024 рр. — 48 діб.

Рівнинна ділянка (плакорна експозиція) є відносно рівною горизонтальною частиною земної поверхні, з майже відсутнім ухилом ($\alpha = 1-0^\circ$). Ґрунт — темно-сірий опідзолений важкосуглинковий на лесі. Тривалість утримання снігового покриву на плакорній експозиції (покриття 50–100 %) у період 2023–2024 рр. — 50 діб.

Рельєф відіграє певну роль у вологозабезпеченості схилів, впливаючи також і на формування ґрунтового профілю. Його характеристики — крутість, експозиція та наявність системи плоских знижень — папілярів стоку (ПС) — визначають інтенсивність втрати чи накопичення вологи. Глибина і характер ПС зумовлюють посушливість (ксероморфізм) ґрунтів, яка є їхньою природною, стійкою рисою з моменту утворення [15]. Внаслідок цього ґрунти на схилах мають різні потужність профілю й рівень зволоження, що варіюються залежно від особливостей рельєфу та орієнтації схилів. Відповідно до класифікації [20], ґрунт нижньої частини схилу Пн-Зх експозиції є підвищено зволеним, завдяки додатковому надходженню води з поверхневим стоком, а ґрунт опуклої частини схилу Пд-Сх експозиції, який характеризується погіршеними умовами вологозабезпечення є сильнопосушливим (сильноксероморфним).

Дно балки характеризується плоскою поверхнею, що приймає поверхневий стік під час сніготанення та інтенсивних дощів. Балка виконує функцію дренажу та орографічного перерозподілу тепла й вологи схилової території. Ґрунт — лучний опідзолений намитий важкосуглинковий на делювії. Протягом всього періоду досліджень, у ґрунті на дні балки не було виявлено карбонатних проявів, тому цю форму рельєфу та відповідний ґрунт з аналізу виключено.

На всіх ділянках переважають злаково-різнотравні асоціації (проективне покриття 75–85 %) з домінуванням костриці лучної (*Festuca pratensis*), тонконіга вузьколистого (*Poa angustifolia*), полинці (*Artemisia austriaca*), стоколосу безостого (*Bromus inermis*), шавлії лучної (*Salvia pratensis*) та конюшини лучної (*Trifolium pratense*). Коренева система рослин проникає на глибину 0,8–1,2 м, формуючи біогенні міграційні канали.

Територія досліджень, відповідно до ґрунтово-екологічного районування [20], належить до Підзони зволоженої Лісостепу (ПЛС-5), з гідротермічним коефіцієнтом (ГТКV-IX) у межах 1,00–1,20. У гідротермічному аспекті у періоді травень–липень спостерігаються умови підвищеного зволоження (ГТКV-VII — 1,10–1,20), тоді як у серпні–вересні — характерна недостатня зволоженість (ГТКVIII-IX — 0,81–0,90). За осінньо-зимовий період (листопад–березень) сума опадів у межах ПЛС-5 становить 160–180 мм [20].

Загальним для темно-сірого опідзоленого ґрунту досліджуваних територій є недостатність атмосферного зволоження і мала потужність снігового покриву. Високі температури ґрунту в літній період, при недостатньому зволоженні, призводять до його висушення [21]. Основне промочування ґрунту відбувається в осінньо-зимовий період і охоплює весь профіль, в окремі роки — глибше, тоді як у літній період зволоження розповсюджується у межах 0–40/50 см. Ґрунти тривалий час перебувають у стані позитивних температур (вище 0°). Період з температурами вище за 0°C значно перевищує період з температурою нижче 0°C . Карбонати у ґрунтових профілях мають педогенне походження; досліджувані ґрунти сформовані на лесових відкладах, за участю кореневої системи рослинності (деревної і трав'яної), на що вказує різке зниження вмісту гумусу з глибиною (з 50 см) [18].

2.2. Методи досліджень

Ґрунтові розрізи на майданчиках дослідження було закладено 24 квітня 2023 р. з прив'язкою до географічних координат за допомогою супутникового геопозиціонування (GPS, датум WGS84). Профілі ґрунтів було діагностовано, а морфологічні та генетичні особливості описано в польових умовах відповідно до ДСТУ 7535:2014¹. Опис будови профілю проводили з урахуванням традиційно застосовуваних морфологічних характеристик ґрунту [22]. Для відбирання проб ґрунту застосовували методичні вказівки відповідно до ДСТУ 4287:2004². Проби ґрунту для визначення вмісту польової вологи згідно з ДСТУ ISO 11465:2001³ були відібрані в 2023 р.: 22.06, 04.08 і 18.11; та у 2024 р.: 14.03, 14.04, 03.07, 22.07, 04.10 і 17.11.

Одночасно з відбиранням проб ґрунту на визначення вмісту польової вологи проводили діагностування характеру скипання карбонатів кальцію від 10 % HCl, користуючись методом, описаним в Інструкції ФАО [19, с. 40]. Характер скипання ідентифікували критеріями, наданими в таблиці 1.

Таблиця 1

Метод польового визначення вмісту карбонатів у ґрунті за дією 10 % HCl (за [19, с. 40])

Характеристика ґрунту		Вміст карбонатів, %	Ознаки реакції ґрунту на 10 % HCl*
Карбонати відсутні	N	0	Відсутність видимого або чутного скипання
Слабокарбонатний	SL	0-2	Чутне скипання але не видиме
Середньокарбонатний	MO	2-10	Видиме скипання
Сильнокарбонатний	ST	10-25	Сильне видиме скипання. Бульбашки утворюють слабку піну
Дуже сильнокарбонатний	EX	> 25	Бурна реакція. Миттєво утворюється густа піна

*Примітка — опис ознак наближено до оригіналу [19]

Проби ґрунту для визначення рН водного згідно з ДСТУ 8346:2015⁴ були відібрані 24.04.2023 та 14.04.2024 рр. Проби ґрунту для визначення вмісту обмінних катіонів Ca, Mg, Na, K, згідно з ДСТУ 7861:2015⁵, були відібрані 24.04.2023 р.

Вимірювання температури ґрунту на різних глибинах і на поверхні проводили цілодобово протягом усього періоду досліджень за допомогою термосенсорів, розміщених на плакорі, у нижній частині схилу Пн-Зх експозиції та на опуклій частині схилу Пд-Сх експозиції. Кожен сенсор оснащений 12 цифровими датчиками температури DS18B20 (з точністю вимірювання $\pm 0,5^\circ\text{C}$ у діапазоні від -55 до $+125^\circ\text{C}$), розташованими вертикально на інструменті через кожні 10 см (глибини вимірювань від 10 до 120 см), а також одним датчиком температури DS18B20 на гнучкому дроті для вимірювання температури на поверхні ґрунту (0 см). Вимірювання здійснювали з інтервалом 30 хвилин

¹ ДСТУ 7535:2014. Якість ґрунту. Морфолого-генетичний профіль. Правила та порядок описування. [Чинний від 01.04.2015]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2015.

² ДСТУ 4287:2004. Якість ґрунту. Відбирання проб : [Чинний від 2004-30-04] Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 5 с.

³ ДСТУ ISO 11465:2001. Якість ґрунту. Визначення сухої речовини та вологості за масою. Гравіметричний метод: [Чинний від 2001-28-12] Київ: Держспоживстандарт України, 2002. 7 с.

⁴ ДСТУ 8346:2015⁴ Якість ґрунту. Методи визначення питомої електропровідності, рН і щільного залишку водної витяжки : [Чинний від 2015-21-08] Київ : ДП «УкрНДНЦ» України, 2017. 7 с.

⁵ ДСТУ 7861:2015⁵ Якість ґрунту. Визначення обмінних кальцію, магнію, натрію і калію в ґрунті за Шолленбергером в модифікації ННЦ ІГА імені О. Н. Соколовського : Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 21 с.

упродовж доби, що детально описано в попередній публікації [21]. Вимірювання температури повітря здійснювали цифровими датчиками температури DS18B20, розміщеними в психрометричній будці на висоті 200 см над поверхнею ґрунту.

Вимірювання кількості атмосферних опадів проводили протягом усього періоду досліджень за допомогою опадоміра (циліндричне відро з прийомною площею 200 см² та мірний стакан на 100 поділок). Кількість опадів у міліметрах визначали за шкалою стакана з урахуванням поправки ($\pm 0,2$ мм). Спостереження за сніговим покривом проводили щоденно за наявності снігу. Ступінь покриття оцінювали з фіксованої точки огляду за 10-бальною шкалою, характер залягання — візуально за стандартною класифікацією. Висоту снігу вимірювали з точністю до 1 см, визначаючи середнє значення по трьох рейках, відповідно до Настанови гідрометеорологічним станціям і постам [24].

3. Результати досліджень

3.1. Ґрунт на схилі північно-західної експозиції

Глибини скипання карбонатів від дії 10 % HCl наведено у таблиці 2. Під час закладення ґрунтового розрізу (24.04.2023) карбонати, у будь-якій формі, не було виявлено у шарі 0–120 см. Упродовж 2023 р. у ґрунті фіксували скипання карбонатів від дії 10 % HCl і за характером реакції (див. табл. 1), виявили середню карбонатність ґрунту — МО [19].

Таблиця 2

Сезонна динаміка глибини скипання карбонатів у ґрунті на схилі північно-західної експозиції (досліджуваний шар 0-120 см)

2023 рік					2024 рік				
24.04.	22.06.	04.08.	18.11.	14.03.	14.04.	03.07.	22.07.	04.10.	17.11.
<i>Верхня межа скипання, см</i>									
N	85 (MO)	20 і 80 (MO)	100 (MO)	117 (SL)	N	N	N	N	N

Примітка: N — Видимі і чутні ознаки скипання відсутні

Середній вміст води у профілі (Рис. 2) та середні температури у ґрунті в шарі 10–120 см (Табл. 3) протягом періоду спостережень 2023 р. були оптимальними для взаємодії біологічних (евапотранспірація), фізичних (міграція розчинів) та хімічних (розчинення й осадження солей) процесів. Високі температури поверхні ґрунту (32,0–35,0° С) створювали сприятливі умови для інтенсивного випаровування води. Однак промочування ґрунту (Табл. 4) через періодичні атмосферні опади (367 мм випало в період з 24.04 до 18.11.2023), дозволило рослинам активно евапотранспірувати, що призвело до коливання міграційної лінії карбонатів у ґрунтовому профілі і скипання (4.08.2023) на двох рівнях — 20 см (верхній горизонт, де переважали процеси випаровування та евапотранспірації) та 80 см (вертикальне переміщення розчинів); і на 100 см (18.11.2023) — глибинний горизонт, куди відбулося вертикальне переміщення розчинів. Таким чином, поєднання високих температур і достатнього зволоження забезпечило активну участь рослин у перерозподілі води та розчинених карбонатів, що призвело до певних змін у їх міграції.

Відсутність карбонатної лінії у досліджуваному профілі у період із квітня до листопада 2024 р. (Табл. 2) корелює з високими температурами поверхні ґрунту (Рис. 3) та дефіцитом води (Рис. 2, Табл. 4). Ці умови призводять до пригнічення кореневого дихання [17] і, як наслідок, зниження продукування CO₂ рослинами, необхідного для утворення вугільної кислоти (H₂CO₃) та розчинення карбонату кальцію, що припиняє його міграцію.

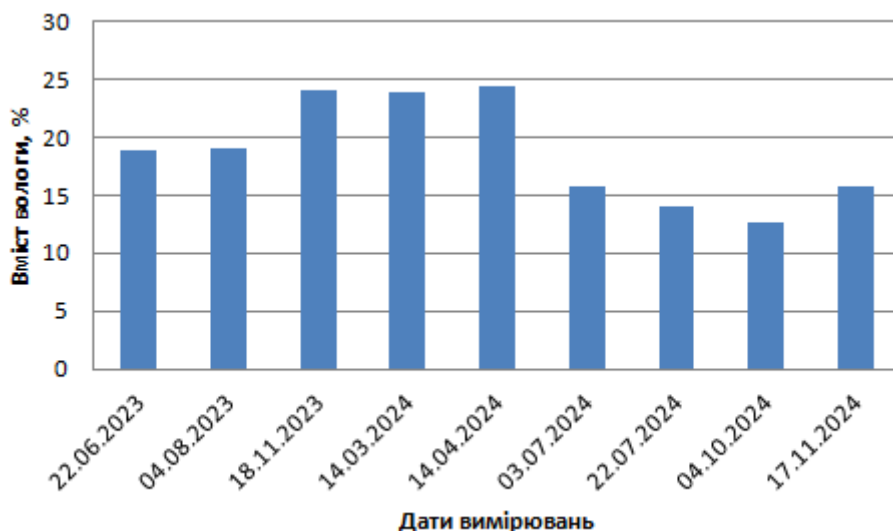


Рис. 2. Динаміка вмісту польової вологи у ґрунті на схилі північно-західної експозиції (середнє значення у шарі 0–120 см)

Таблиця 3

Температура у профілі і на поверхні ґрунту на схилі північно-західної експозиції

Глибина, см	Температура, °C					
	Середня	Max	Min	Середня	Max	Min
	22.06.2023–04.08.2023			05.08.2023–18.11.2023		
0	24,7	32,6	17,4	16,4	35,2	4,4
10-120	18,1	28,7	14,9	15,5	26,4	3,5

14 березня 2024 р. осадження CaCO_3 було зафіксовано вже на глибині 117 см (див. табл. 2), що зумовлено інфільтрацією опадів (220 мм) холодного періоду (Табл. 4), яка сприяла ще більшому вимиванню карбонатів. Порівняно з рівнем, зафіксованим 18 листопада 2023 р., глибина карбонатної межі знизилася на 17 см. Діагностика скипання на цей момент відповідала слабокарбонатному типу (0–2 %), за якого реакція на HCl була чутною, але візуально не проявлялася (SL).

Таблиця 4

Кількість опадів у досліджуваний період

Період	Сума опадів, мм
24.04.2023-18.11.2023	367
19.11.2023-14.03.2024	220
15.03.2024-17.11.2024	148

У період від 14 квітня до 17 листопада 2024 р. лінію карбонатів не виявлено (не скипали) у досліджуваному шарі (0–120 см).

Високі температури ґрунту протягом доби – зокрема, дані за 17.07.2024 р. (Рис. 3), свідчать про 6–10 годин із температурами 40–60°С на поверхні ґрунту. І це, у поєднанні з мінімальною кількістю опадів (див. табл. 4), призвело до висихання ґрунту (Рис. 2) на глибину кореневмісного шару.

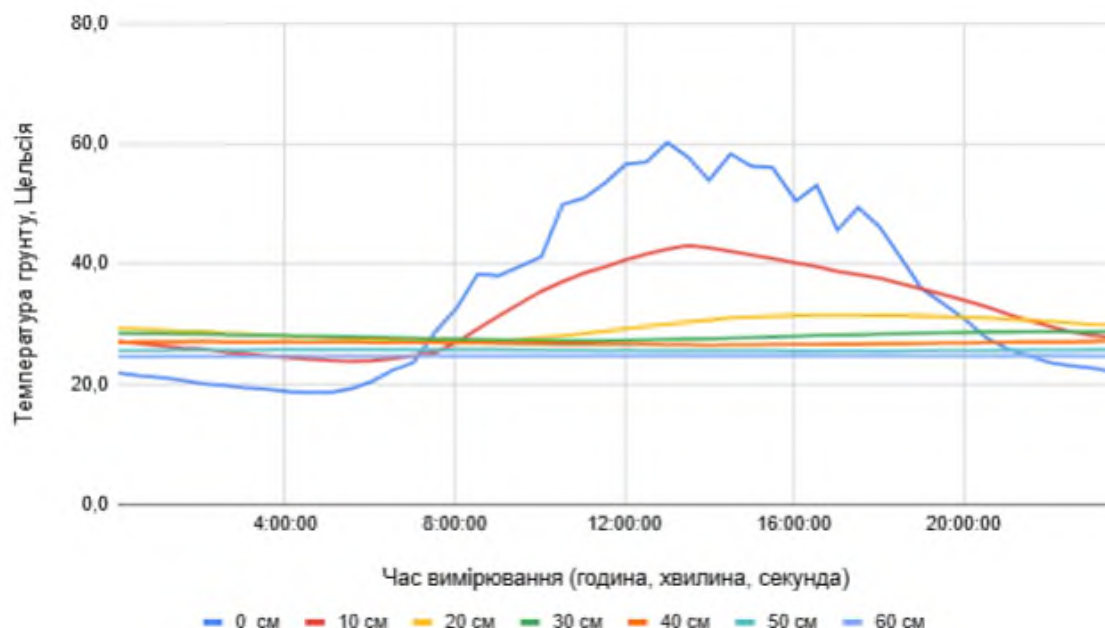


Рис. 3. Фрагмент запису значень температури ґрунту на схилі північно-західної експозиції 17.07.2024

Дефіцит вологи спричиняє низку фізіологічних змін у рослин, що знижує активність кореневої системи. За даними Prasad (2008) та Reynolds-Henne (2010), наведеними у роботі Sánchez-Bermúdez та ін. [17], це, зокрема, призводить до пригнічення кореневого дихання, зменшення надходження асимілятів до коренів (тобто зниження кількості органічних речовин — продуктів фотосинтезу, що транспортуються з листків до кореневої системи), а також до порушення температурної регуляції рослини внаслідок закриття продихів під час водного стресу (дефіциту вологи). Одним із наслідків цього процесу є зниження евапотранспірації. У результаті, у ґрунтовому профілі (у шарі 0–120 см) не спостерігали скипання карбонатів кальцію, що свідчить про припинення їх міграції в умовах високої температури та нестачі вологи, яка є необхідною для їх розчинення і переміщення у ґрунті. Таким чином, температурний і водний режими визначають інтенсивність міграції карбонатів і формування відповідних морфологічних ознак у ґрунтовому профілі.

Рівень рН змінюється залежно від глибини і періоду спостережень (Рис. 4). У квітні 2023 р. рН коливався від 6,8 до 7,2, що вказує на нейтральні та слаболужні умови. До квітня 2024 р. рН стабілізувався на рівні 7,2 майже у всіх горизонтах, що відповідає нейтральному середовищу. Нейтральний рівень рН сприяє утриманню кальцію та магнію у ґрунтовому комплексі, оскільки в таких умовах розчинність карбонатів (CaCO_3) знижується, що обмежує їх міграцію та сприяє осадженню, особливо за умов висихання ґрунту [8].

Слід зазначити, що нейтральна реакція ґрунтового середовища, особливо горизонту НЕ, є своєрідним наслідком кліматичних змін. За результатами великомасштабних обстежень 1957–1961 рр.⁶, реакція ґрунтового середовища верхнього горизонту темно-сірих опідзолених ґрунтів у межах території досліджень була, переважно, слабокислою або близькою до нейтральної (рНводн в межах 5,8–6,5).

⁶ Архівні матеріали великомасштабних обстежень ґрунтового покриття 1957–1961 рр. Фонд ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського» (Харків, Україна).

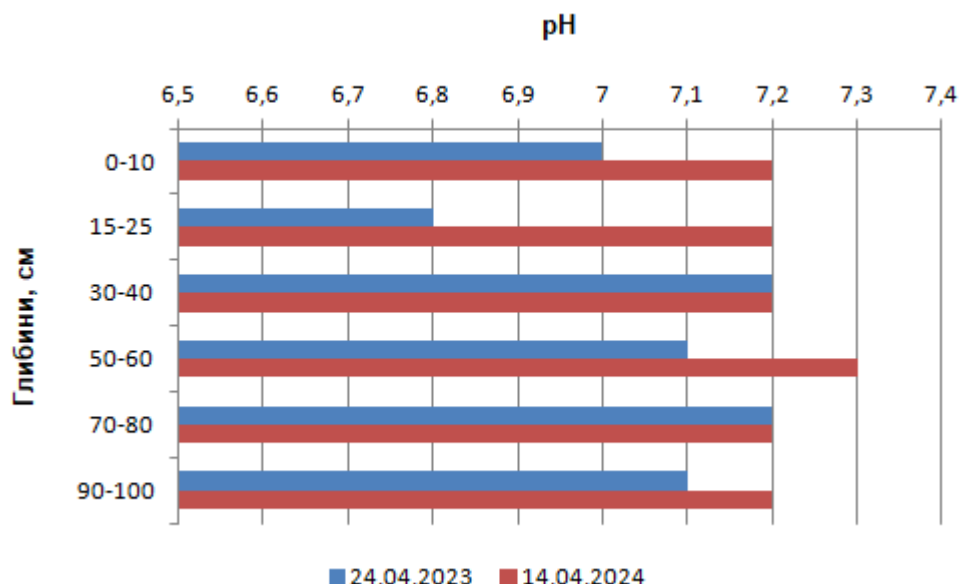


Рис. 4. Рівень рНводн у профілі ґрунту на схилі північно-західної експозиції

Основними обмінними катіонами в досліджуваному ґрунті є Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} та K^{+} і їхня концентрація змінюється залежно від глибини (Табл. 5).

Таблиця 5

Розподіл обмінних катіонів у профілі ґрунту на схилі Пн-Зх експозиції (24.04.2023)

Шар ґрунту, см	Вміст обмінних катіонів, ммоль/100 г				
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ
0-10	18,1	3,6	0,2	0,5	22,4
15-25	18,5	3,6	0,1	0,3	22,5
30-40	18,5	3,2	0,1	0,3	22,1
50-60	18,2	2,7	0,1	0,1	21,1
70-80	19,1	2,5	0,2	0,4	22,2
90-100	19,4	2,4	0,1	0,3	22,2

Кальцій (Ca^{2+}) є домінуючим катіоном у ґрунтовому профілі, його вміст залишається стабільно високим у межах досліджуваного профілю. Магній (Mg^{2+}) демонструє тенденцію до зниження концентрації з глибиною, особливо в шарі 70–100 см, що може бути пов'язано з його слабшим вимиванням у нижні шари порівняно з Ca^{2+} . Натрій (Na^{+}) та калій (K^{+}) містяться у значно нижчих концентраціях, ніж Ca^{2+} та Mg^{2+} . При цьому концентрація K^{+} дещо вища у верхньому шарі (0–10 см), що може бути пов'язано з біологічною активністю, зокрема процесами розкладання органічних решток.

Ґрунт на північно-західному схилі характеризується гідротермічним режимом, який зумовлений меншою інсоляцією та більшою вологістю. Це сприяє більш стабільному розподілу карбонатів у ґрунтовому профілі. Наявність карбонатів у ґрунтовому розчині залежить від сезонних коливань вологості. У періоди помірного зволоження скипання спостерігається на рівні розміщення основної маси коренів рослин, тоді як у періоди промочування всього профілю ґрунту відбувається вимивання розчинів за межі досліджуваної частини профілю.

Загальний висновок про ґрунт на схилі північно-західної експозиції (її нижньої частини) є таким: 1. Нестабільність глибини лінії скипання карбонатів та відсутність її рано навесні свідчить про переважання низхідних рухів води у холодний період. 2. Підлучення ґрунтових розчинів до нейтральних значень у теплий період зумовлюється посиленням евапотранспіраційних витрат води, особливо в умовах кліматичних змін.

3.2. Ґрунт на схилі південно-східної експозиції

На всіх етапах дослідження ґрунт на схилі південно-східної експозиції (опукла частина) демонстрував скипання з поверхні при різних рівнях вмісту польової вологи (Рис. 5) у всі сезони. Спостерігали бурну реакцію від 10 % HCl та миттєве утворення товстої пінистої плівки, що свідчить про дуже високий вміст карбонатів.



Рис. 5. Динаміка вмісту вологи у ґрунті на схилі Пд-Сх експозиції (середнє значення у шарі 0–120 см)

Особливу увагу було приділено зимовому періоду, коли температура ґрунту та повітря була нижче 0° С, рисунок 6 (а, б).



а) 05.02.25



б) 17.02.2025

Погодні умови:

Температура повітря -1,2° С. Температура ґрунту: на поверхні (0 см) -1,1° С; на глибинах 5 см — +0,6° С, 10 см — +1,2° С.

Висота снігового покриву — 2 см.

Температура повітря -5,5° С. Температура ґрунту: на поверхні (0 см) -1,2° С; на глибинах 5 см — -1,3° С, 10 см — -0,9° С.

Висота снігового покриву — 5 см.

Рис. 6. Бурхливе скипання карбонатів у пробі з поверхні ґрунту (фото О. Троценко)

Всесезонна присутність карбонатів у поверхневому шарі ґрунту, включаючи періоди з температурами нижче 0°С (що зафіксовано на фото, рис. 6), коли біологічна активність і низхідна міграція розчинів мінімальні, узгоджується з моделлю "реєвапотранспірація" [14], яка пояснює акумуляцію карбонатів у верхніх горизонтах переважно завдяки висхідним потокам ґрунтового розчину під дією евапотранспірації, що є домінуючим процесом на схилах південної експозиції, які отримують додаткову інсоляцію, в умовах дефіциту вологи.

Ґрунт є короткопрофільним, сформованим на лесових відкладах [18], з наявністю карбонатів у вигляді прожилок та псевдоміцелію, останній є міграційною формою. Материнська порода (Рк 35–70 см) — палевий важкосуглинковий карбонатний лес (карбонати у вигляді прожилок і псевдоміцелію). Враховуючи ці спостереження, було закладено лінію трансект для більш детального вивчення розподілу карбонатів по профілю; лінія трансект схематично зображена на рисунку 7.



Позначення: ГП — ґрунтовий профіль; h — глибина залегання карбонатних конкрецій; 1.1...2.6 — точки відбирання проб.

Рис. 7. Схематичне зображення лінії трансект на схилах Пн-Зх та Пд-Сх експозицій

Згідно з даними додаткового обстеження (відбирання проб методом буріння), проведеного 03.07.2024, констатовано, що карбонати розподілені нерівномірно. На схилі Пд-Сх експозиції у точках ГП2, 2.1, 2.2, 2.4 та 2.5 скипання від 10 % НСІ фіксували з поверхні, тоді як у точці 2.3 реакція починалася лише з глибини 40 см, а у точці 2.6 карбонати взагалі не виявлено.

Під час польових досліджень було зафіксовано наявність поодиноких карбонатних конкрецій на глибинах 23–25, 60, 80 і 90 см. Як правило, їх вважають реліковими, успадкованими від материнської породи. На нашу думку, сформовану на підставі досліджень в інших локаціях, це пов'язано з літогранулометричною неоднорідністю лесової товщі. Неоднорідність може бути пояснена порівняно неглибоким підстиланням третинними пісками, що властиве відрогам (відгалуженням) Середньоруської височини, до яких належить і місце досліджень. У результаті на місці підстилання може, періодично, формуватися прошарок «капілярно-підвішеної вологи» з утворенням карбонатних конкрецій як наслідку тимчасового гідроморфізму. За відсутності пісків може бути підстилання глинами, тобто наявність водонепроникного шару, на якому можливе утворення верховодки. Це також зумовлює формування карбонатних конкрецій. В окремих випадках можливе формування конкрецій над похованими ґрунтами. У будь-якому разі наявність таких карбонатних артефактів може бути індикатором тимчасового гідроморфізму як у минулому, так і в рецентних умовах ґрунтоутворення.

Карбонатні конкреції морфологічно є різними, як це видно на рисунку 8. Новоутворення у ґрунті на Пд-Сх схилі за розмірами від 5–7 до 10–11 мм, округлої форми, білого або жовто-білого кольору. Спільні риси – твердість та щільність — розкришити можливо лише за допомогою додаткових інструментів; скипають від 10 % НСІ.



Рис. 8. Карбонатні конкреції у ґрунті на схилі Пд-Сх експозиції (фото О. Троценко)

Результати вимірювання рН (Табл. 6) свідчать про слаболужні та лужні умови, характерні для карбонатних ґрунтів. У квітні 2023 р. рН у верхніх горизонтах становив 7,6–8,1 із зростанням з глибиною. У квітні 2024 р. відмічено підвищення рН у всьому профілі до 8,0–8,6, тобто посилення лужності. Це може бути пов'язано з інтенсивним випаровуванням, що разом із сезонним висушуванням ґрунту, та підвищенням рН сприяє осадженню CaCO_3 [8].

Таблиця 6

Рівень $\text{pH}_{\text{водн.}}$ та вміст одновалентних обмінних катіонів у ґрунті на схилі Пд-Сх експозиції

Шар ґрунту, см	рН водний		Вміст обмінних катіонів, ммоль/100 г	
			Na^+	K^+
	Дата відбирання проб			
	24.04.2023	14.04.2024	24.04.2023	
0-10	7,6	8,0	0,1	0,3
15-25	7,8	8,3	0,2	0,4
30-40	7,9	8,3	0,2	0,4
50-60	8,1	8,4	0,2	0,4
70-80	-	8,6	-	-
90-100	-	8,6	-	-

Концентрація Na^+ є низькою (0,1–0,2 ммоль/100 г). Вміст K^+ становив 0,3–0,4 ммоль/100 г (Табл. 6).

Лужні умови (рН 7,6–8,6) сприяють осадженню карбонатів (CaCO_3) і зменшують присутність кальцію та магнію у ґрунтовому розчині. Підвищення рН із глибиною (до 8,6 на глибині 70–100 см) вказує на можливе накопичення карбонатів у цій частині профілю.

Ґрунт на південно-східному схилі відрізняється більш помітними гідротермічними контрастами через інтенсивну інсоляцію та випаровування, порівняно з Пн-Зх схилом. Це призводить до швидкого висихання верхніх горизонтів. Таким чином, розподіл карбонатів у ґрунтовому профілі залежить від поєднання низки факторів, таких як мікрокліматичні умови (температура, випаровування), геоморфологія схилу (експозиція, опуклість) та властивості материнської породи (лесові відклади). Нерівномірний розподіл карбонатів свідчить про певну роль вертикальної міграції розчинів та впливу рослинного покриву на процеси утворення карбонатів.

Загальний висновок про ґрунт на схилі південно-східної експозиції (її опуклої частини) такий: 1) Ґрунт короткопрофільний, сформований на лесових відкладах. Морфологічні ознаки вказують на наявність карбонатів у вигляді прожилок і псевдоміцелію, що свідчить про присутність як стійких, так і міграційних форм карбонатних утворень. 2) Упродовж усього періоду досліджень, незалежно від сезонних і погодних умов, спостерігалось бурне скипання карбонатів з поверхні, що свідчить про ксероморфність ґрунту та можливий вплив ерозійних процесів, характерних для опуклих елементів рельєфу. 3) Дані, отримані за закладеною лінією трансект, засвідчують просторову мінливість глибини початку (верхньої межі) скипання карбонатів, тобто про неоднорідність їх залягання по схилу.

3.3. Ґрунт на рівнинній території

Ґрунт плакорної експозиції відповідає класичному уявленню про темно-сірі ґрунти опідзоленого ряду [25–27], за винятком більш лужної реакції ґрунтового розчину порівняно з даними минулого сторіччя. Морфологічний аналіз ґрунтового профілю показав наявність карбонатів у міграційній формі (псевдоміцелій) на глибині 50–70 см (Ihp/к) та у вигляді прожилок у материнській породі на глибині 70–95 см (P(i)к) [18]. Карбонатних конкрецій у профілі зафіксовано не було, проте не виключена їх наявність у підґрунті.

Вміст карбонатів у ґрунті оцінюється як середній (2–10 %), що характеризується помірним скипанням (МО) упродовж всього періоду спостережень (Рис. 9).

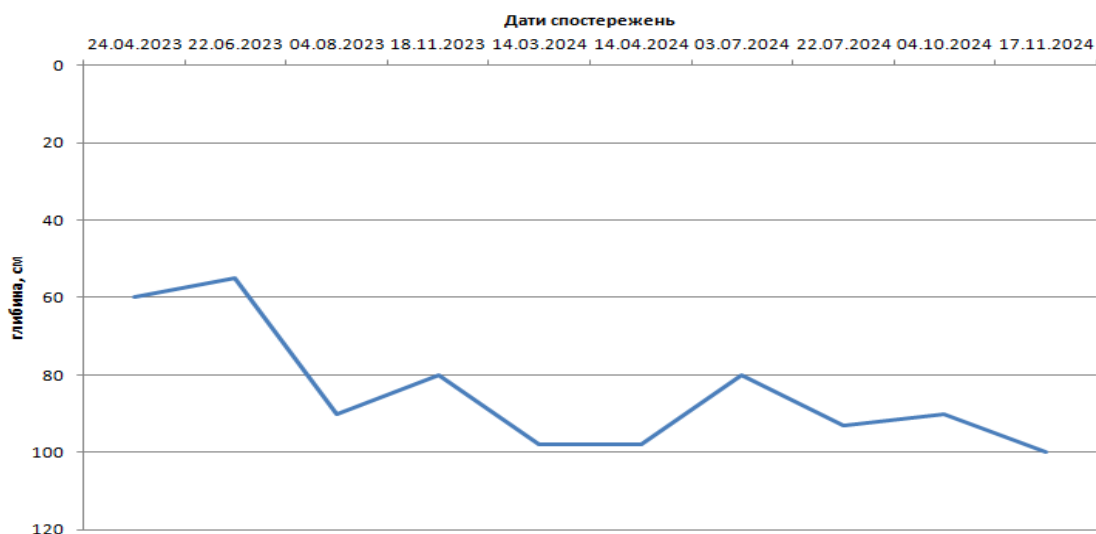


Рис. 9. Сезонна міграція карбонату кальцію по профілю ґрунту на рівнинній території

Сезонна динаміка розподілу карбонатів по профілю зумовлена змінами вологості та температури ґрунту. Вимивання CaCO_3 за межі морфологічних горизонтів вниз по профілю, зафіксоване 14.03.2024, пояснюється глибоким промочуванням ґрунту в осінньо-зимовий період (Рис. 10). Підйом «лінії скипання» до 80 см (03.07.2024) пов'язаний з весняним періодом, коли достатня вологість та комфортні температурні умови (на поверхні — $20,8^\circ\text{C}$, на глибині 5–80 см — $16,8^\circ\text{C}$) сприяли активній вегетації рослин та, як наслідок, вертикальній міграції карбонатів. Такі умови є оптимальними для розвитку кореневої системи та активності ґрунтової біоти [5, 16], що збільшує парціальний

тиск CO_2 у ґрунті, сприяє розчиненню карбонатів та їх вертикальній міграції з висхідними або низхідними потоками води.

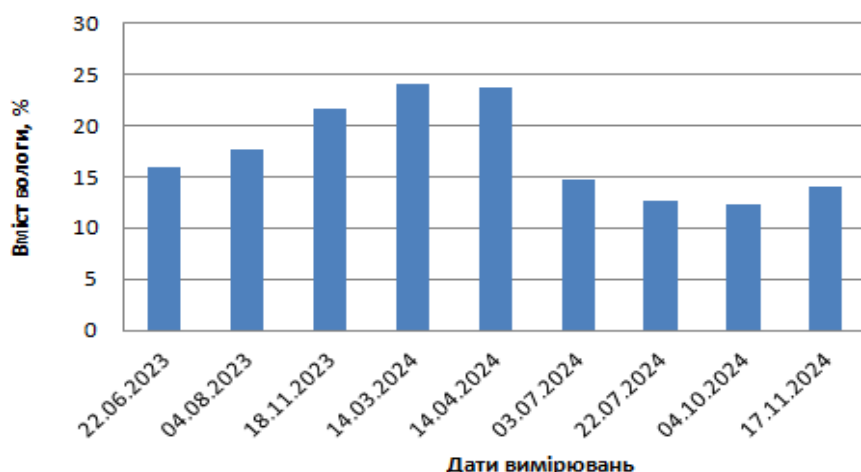


Рис. 10. Вміст польової води (%) у ґрунті на рівнинній території (середнє значення у шарі 0–120 см)

Верхня межа скипання на глибинах 93 (22.07.2024), 90 (04.10.2024) і 100 см (17.11.2024) (див. рис. 8) зумовлена наявністю карбонатних прожилок у материнській породі.

Рівень рН ґрунту на плакорній ділянці варіював в межах 6,8–8,0, що свідчить про нейтральні та слаболужні умови (Рис.11).

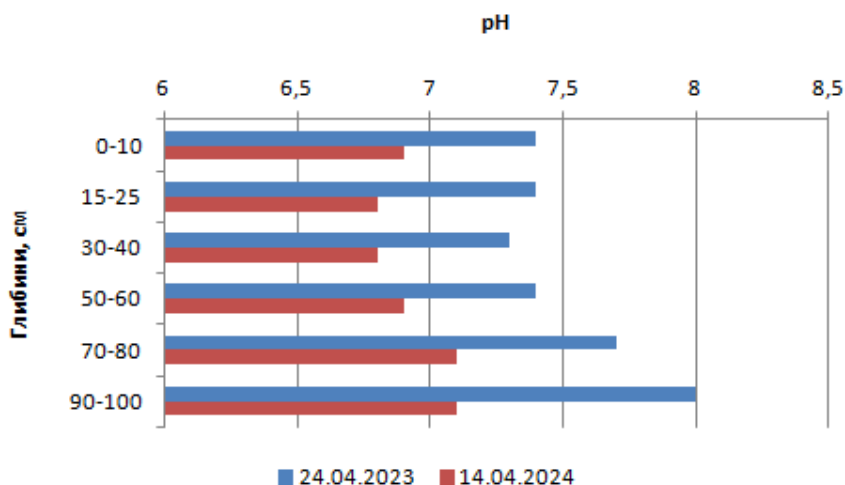


Рис. 11. Рівень рНводн. у ґрунті на рівнинній території

У квітні 2023 р. рН у верхніх горизонтах був стабільним (7,3–7,4) зі зростанням до 7,7–8,0 на глибині 70–100 см, що пов'язано з наявністю карбонатів у вигляді псевдоміцелію та прожилок. У квітні 2024 р. спостерігали зниження рН до 6,8–7,1 на більшості глибин, що свідчить про зменшення лужності ґрунтового розчину, через інтенсивне вимивання карбонатів у попередній період. Проте значення рН перевищують властиві верхнім горизонтам темно-сірих опідзолених ґрунтів, зафіксовані у минулому сторіччі. Як було відзначено для ґрунтів схилу північно-західної експозиції, це зумовлено кліматичними змінами зі збільшенням евапотранспіраційних витрат води.

Таким чином, динаміка розподілу карбонатів у профілі ґрунту на плакорній ділянці визначається комплексом факторів: сезонними змінами вологості, температурним режимом, вегетацією рослин та морфологічними особливостями ґрунту. Нейтральні та слаболужні умови сприяють утриманню карбонатів у

ґрунтовому комплексі, але їх міграція залежить від гідротермічних умов та біологічної активності.

Обмінний комплекс ґрунту представлений катіонами Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} та K^{+} (Табл. 7), концентрація яких змінюється залежно від глибини. Кальцій (Ca^{2+}) є основним катіоном у ґрунтовому обмінному комплексі з найвищим умістом на глибині 30–40 см, що пов'язано з підйомом карбонатів через транспірацію рослин (лінія скипання 55–60 см, квітень-липень 2023 р.). Концентрація магнію (Mg^{2+}) зменшується з глибиною, зокрема на рівнях 50–60 см. Концентрація натрію (Na^{+}) є низькою, з найбільшим умістом у шарі 30–40 см. Калій (K^{+}) рівномірно розподілений по профілю ґрунту.

Таблиця 7

Розподіл обмінних катіонів у профілі ґрунту на рівнинній території (24.04.2023)

Шар ґрунту, см	Вміст обмінних катіонів, ммоль/100 г				
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Сума
0-10	17,2	3,6	0,1	0,4	21,3
15-25	16,7	3,1	0,1	0,4	20,3
30-40	18,6	2,9	0,4	0,4	22,3
50-60	17,7	2,3	0,1	0,4	20,5
70-80	-	-	0,1	0,4	-
90-100	-	-	0,2	0,4	-

Ґрунт рівнинної території демонструє проміжні гідротермічні умови між Пн-Зх та Пд-Сх схилами. Тут спостерігається чіткий вплив сезонних змін вологості: в осінньо-зимовий період глибоке промочування сприяє вимиванню карбонатів у нижні горизонти, тоді як у весняний період достатня вологість та комфортні температури (16,8–20,8° С) активізують міграцію карбонатів у верхні шари. Нейтральний та слаболужний рН (6,8–8,0) сприяє утриманню карбонатів у ґрунті, але їх розподіл у профілі залежить від інтенсивності вимивання та випаровування.

Загальні висновки щодо ґрунту рівнинної території: 1. Морфолого-генетична будова профілю відповідає класичним уявленням, за винятком міграції лінії скипання у річному і сезонному циклах. 2. Підвищена лужність верхнього горизонту є наслідком кліматичних змін зі збільшенням інтенсивності міграційно-пульсаційного режиму карбонатів кальцію. 3. Міграційна зона знаходиться у середній та нижній частинах профілю, в межах 55–100 см, міграція залежить від рівня зволоженості ґрунту та транспірації. 4. Карбонатні новоутворення не виявлено.

Результати дослідження демонструють, що вплив термічного режиму на міграцію карбонатів кальцію (глибина карбонатної лінії, наявність конкрецій) є опосередкованим. Температура регулює інтенсивність евапотранспірації, що визначає напрямок руху (висхідний або низхідний) та концентрацію ґрунтових розчинів [14]. Також, температура зумовлює біологічну активність рослин, функціонування яких впливає на надходження CO_2 і, отже, на розчинення карбонатів. Таким чином, припинення розчинення карбонатів в умовах теплового та водного стресу є фактором, який зупиняє їх міграцію у профілі.

4. Висновки за результатами досліджень

Встановлено, що рельєф впливає на гідротермічний режим ґрунтів і визначає розподіл та міграцію карбонатів, що, своєю чергою, визначає специфіку морфологічної будови ґрунтового профілю. Коливання верхньої межі закипання карбонатів підтверджує динамічність процесів переміщення розчинів у ґрунті.

Сезонні зміни гідротермічного режиму у профілі ґрунту на північно-західному схилі впливають на міграцію карбонатів. Уповільнене танення снігу, затримка талих вод та обмежена інсоляція сприяють тривалому зволоженню ґрунту нижньої частини схилу, що впливає на його морфологічну будову. У холодний період спостерігається низхідний рух вологи, що спричинює вимивання карбонатів у глибші горизонти, тоді як у теплий період їх осадження зумовлюється високими температурами та активною евапотранспірацією. Нейтральні та слаболужні (рН 6,8–7,2) умови ґрунтового розчину сприяють утриманню кальцію та магнію в обмінному комплексі та забезпечують хімічну стабільність ґрунтового середовища.

Ґрунт південно-східного схилу (опукла частина) є короткопрофільним, сформованим на лесових відкладах, з високим вмістом карбонатів у вигляді прожилок і псевдоміцелію. Впродовж усіх сезонів спостерігалось бурне скипання карбонатів з поверхні, що свідчить про ксероморфність ґрунту та можливий вплив ерозійних процесів. Просторова мінливість глибини скипання карбонатів, виявлена за лінією трансект, свідчить про неоднорідність їхнього залягання по схилу. Слаболужні та лужні умови (рН 7,6–8,6) сприяють осадженню карбонатів і зниженню розчинності кальцію.

Ґрунт на рівнинній території відповідає класичним характеристикам темно-сірих опідзолених ґрунтів, за винятком підвищеної лужності верхніх горизонтів порівняно з даними минулого століття. Карбонати мігрують у межах 55–100 см залежно від сезонного зволоження та транспірації рослин, що підтверджено динамікою лінії скипання. Нейтрально-слаболужна (рН 6,8–8,0) реакція ґрунтового розчину сприяє утриманню карбонатів. Підвищена лужність верхнього горизонту може бути наслідком змін клімату.

Здобуті результати щодо впливу гідротермічного режиму дозволяють визначити особливості використання лінії скипання карбонатів як діагностичного критерію й удосконалити номенклатуру та класифікацію темно-сірих опідзолених ґрунтів на рівні виду. Динамічність лінії скипання за сезонами року та вірогідність її відсутності в окремі роки є додатковими аргументами на користь недоцільності окремого виділення так званих «реградованих» ґрунтів. Підвищення лужності цих ґрунтів, в аспекті змін клімату, є приводом для наукового переосмислення підходів щодо необхідності їх хімічної меліорації.

Внесок авторів: В. Б. Соловей — ідея, цілі та завдання дослідження, інтерпретація зданих даних, консультації з методологічних питань, критичний аналіз тексту, внесення правок; О. О. Троценко — розробка методичних підходів, проведення польових робіт, збирання, аналіз та інтерпретація даних, підготовка рукопису. Автори ознайомлені з опублікованою версією рукопису і згодні з нею.

Список використаних джерел

1. Khalidy R., Arnaud E., Santos R., M. Natural and human-induced factors on the accumulation and migration of pedogenic carbonate in soil: A Review. *Land*. 2022. 11(9). 1448. <https://doi.org/10.3390/land11091448>
2. Monger H. C., Krammer R. A., Khresat S., Cole D. R., Wang X., Wang J. Sequestration of inorganic carbon in soil and groundwater. *Geology*. 2015. 43(5). P. 375–378. <https://doi.org/10.1130/G36449.1>
3. Leogrande R., Vitti C., Castellini M., Mastrangelo M., Pedrero F., Vivaldi G. A., Stellacci A. M. Comparison of Two Methods for Total Inorganic Carbon Estimation in Three Soil Types in Mediterranean Area. *Land*. 2021. 10(4). 409. <https://doi.org/10.3390/land10040409>
4. Sanderman J. Can management induced changes in the carbonate system drive soil carbon sequestration? A review with particular focus on Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2012. Vol. 155. P. 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.04.015>
5. Monger H. C. Soils as generators and sinks of inorganic carbon in geologic time. In *Soil Carbon*; A. E. Hartemink, K. McSweeney (Eds.). Springer: Cham, Switzerland, 2014; P. 27–36.
6. Dietrich F., Diaz N., Deschamps P., Ngatcha B., N., Sebag D., & Verrecchia E. P. Origin of calcium in pedogenic carbonate nodules from silicate watersheds in the Far North Region of Cameroon: Respective contribution of in situ weathering source and dust input. *Chemical Geology*. 2017. 460(5). P. 54–69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.04.015>
7. Dang C., Kong F., Li Y., Jiang Z., Xi M. Soil inorganic carbon dynamic change mediated by anthropogenic activities: An integrated study using meta-analysis and random forest model. *Science of The Total Environment*. 2022. 835. 155463. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155463>

8. Emmerich W. E. Carbon dioxide fluxes in a semiarid environment with high carbonate soils. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2003. 116(1-2). P. 91-102. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00231-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00231-9)
9. Batool M., Cihacek L. J., Alghamdi R. S. Soil inorganic carbon formation and the sequestration of secondary carbonates in global carbon pools: A Review. *Soil Syst.* 2024. 8(1). 15. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010015>
10. Wang Y., Li Y., Ye X., Chu Y., Wang X. Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: From forest to desert. *Science of The Total Environment*. 2010. 408(8). P. 1925-1931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.01.015>
11. Amit R., Simhai O., Ayalon A., Enzel Y., Matmon, A., Crouvi, O., ...McDonald, E. Transition from arid to hyper-arid environment in the southern Levant deserts as recorded by early Pleistocene cummulic Aridisols. *Quaternary Science Reviews*. 2011. 30(3-4). P. 312-323. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.11.007>
12. Kim J. H., Jobbágy E. G., Richter D. D., Trumbore S. E., Jackson R. B. Agricultural acceleration of soil carbonate weathering. *Global Change Biology*. 2020. 26(10). 5988-6002. <https://doi.org/10.1111/gcb.15207>
13. Monger, H. C. Pedogenic Carbonates: Links between biotic and abiotic CaCO₃. In Proceedings of the 17th WCSS, Bangkok, Thailand, 14–21 August 2002. Symposium 20, paper 897.
14. Li Y., Zhang W., Aydin A., Deng X. Formation of calcareous nodules in loess–paleosol sequences: Reviews of existing models with a proposed new “per evapotranspiration model”. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. 154. P. 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2017.12.002>
15. Полупан М. І., Балюк С. А., Соловей В. Б., Величко В. А., Волков П. О. Природний механізм захисту схилових ґрунтів від водної ерозії. / За ред. М. І. Полупана. Київ: Фенікс, 2011. 144 с. <https://doi.org/10.31073/978-000-000-0>
16. Naorem A., Jayaraman S., Dalal R. C., Patra A., Rao C., & Lal R. Soil Inorganic Carbon as a Potential Sink in Carbon Storage in Dryland Soils—A Review. *Agriculture*. 2022. 2(8). 1256. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081256>
17. Sánchez-Bermúdez M., del Pozo J. C., Pernas M. Effects of Combined Abiotic Stresses Related to Climate Change on Root Growth in Crops. *Front. Plant Sci.* 2022. Vol. 13. 918537. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.918537>
18. Соловей В. Б., Троценко О. О. Порівняльна морфолого-генетична характеристика опідзолених ґрунтів плакорного і схилових місцеположень. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ “ІГА ім. О. Н. Соколовського”. Харків: 2024. Вип. 97. С. 4–17. <https://doi.org/10.31073/acss97-01>
19. *Guidelines for soil description*. Fourth edition, corrected and supplemented. (2012). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome Retrieved from <https://www.fao.org/4/a0541e/a0541e.pdf>
20. Полупан М. І., Соловей В. Б., Величко В. А. Класифікація ґрунтів України / за ред. М. І. Полупана. Київ: Аграрна наука, 2005. 300 с. <https://doi.org/10.31073/966-540-013-4>
21. Соловей В. Б., Троценко О. О. (2024). Термічні режими опідзолених ґрунтів схилових та рівнинних місцеположень. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. Серія: Агрономія і біологія. 56(2). С. 57-66. <https://doi.org/10.32782/agrobio.2024.2.8>
22. Гринь Г. С. Полевая диагностика почв : учебное пособие. Под общей редакцией профессора А. М. Гринченко. ХСХИ. Харьков, 1974. 224 с.
23. Соловей В. Б., Троценко О. О. Різноглибинне дослідження температурного режиму ґрунтів цифровими датчиками. *Таврійський науковий вісник. Серія : Сільськогосподарські науки*. 2023. № 131. С. 211–219. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.131.27>
24. *Настанова гідрометеорологічним станціям і постам : Метеорологічні спостереження на станціях* (Випуск 3. Частина 1). Державна гідрометеорологічна служба. Київ, 2011. 280 с. URL: <http://www.cgo-sreznnevskiy.kyiv.ua/images/PraciSpivrobitnikiv/mastanovy-3.pdf>
25. Бреус Н. М. Черноземы Лесостепной зоны умеренно континентальной восточноевропейской фации. *Черноземы СССР (Украина)*. М.: Колос, 1981. С. 38–79.
26. Медведев В. В. *Структура почвы (методы, генезис, классификация, эволюция, география, мониторинг, охрана)*. Харьков, 2008. 406 с.
27. Почвы Украины и повышение их плодородия : Экология, режимы и процессы, классификация и генетико-производственные аспекты / под ред. Н. И. Полупана. Киев: Урожай, 1988. Т. 1. 296 с.

UDC 631.436.5.6:631.423.2(477.54)

The influence of the hydrothermal regime on the migration of calcium carbonates in dark gray podzolized soils on slopes with different exposures in Kharkiv region

V. B. Solovei, O. O. Trotsenko ✉

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

✉ trea140981@gmail.com

Received 02.04.2025; Revised 14.06.2025; Accepted 17.06.2025; Available online 01.07.2025

Abstract

The paper presents the results of a study on the hydrothermal regime of dark gray podzolized soils (Luvic Greyzem Phaeozem (Loamic)) on slopes with different exposures and the seasonal dynamics of calcium carbonate migration within their profiles. The research was conducted in the Kharkiv region of Ukraine at four closely located sites: on slopes with northwestern and southeastern exposures, as well as on a flat area and at the bottom of a gully. It was established that the seasonal depth of carbonate occurrence, as an important morphological characteristic of the soil, largely depends on the dynamics of temperature and moisture content in the soil profile, which are determined by slope exposure. Soil moisture content was measured using the thermostat-weight method, with samples taken from the 0–120 cm layer at 10 cm intervals. Soil temperature was recorded continuously at 30-minute intervals throughout the study period using thermosensors equipped with DS18B20 digital sensors, installed at 10 cm intervals (down to 120 cm); one sensor placed on the soil surface (0 cm). Precipitation amounts were recorded using a rain gauge. Snow cover depth and coverage extent were documented daily when snow was present. Special attention was paid to the role of seasonal changes in soil moisture in the processes of carbonate migration and sedimentation. The mechanisms of vertical differentiation of inorganic carbon in the soil profile in the form of carbonates are described. The study analyzes migration models and their dependence on climatic, hydrological, and biological factors. It was found that on the northwestern slope, where the soil remains in a state of elevated moisture for a prolonged period, downward vertical migration of dissolved carbonates predominates. On the southeastern slope, under conditions of

high insolation and intense evaporation, carbonates accumulate in the upper horizons. On the flat area, intermediate hydrothermal soil characteristics (relative to the slopes) were observed — seasonal fluctuations in temperature and moisture result in bidirectional carbonate migration: leaching into lower horizons in autumn and winter, and upward movement in spring. The study also considers the potential indicative role of carbonate concretions in the soil profile — as evidence of migration–accumulation processes, the direction and intensity of carbonate migration, and changes in hydrothermal conditions during soil formation. It is noted that concretions may be of relict origin from the parent material or the result of pedogenic processes. The observations demonstrate that topography, hydrothermal conditions, and biological activity are key factors determining the distribution and dynamics of carbonates in the profiles of the studied dark gray podzolized soils.

Keywords: calcium carbonates; migration; slopes; exposure; hydrothermal regime; dark gray podzolized soils.

Citing: Solovei, V. B., & Trotsenko, O. O. (2025). The influence of the hydrothermal regime on the migration of calcium carbonates in dark gray podzolized soils on slopes with different exposures in Kharkiv region. *AgroChemistry and Soil Science*, 98, 36–54. doi:10.31073/acss98-03 [in Ukrainian].

References

1. Khalidy, R., Amaud, E., & Santos, R., M. (2022). Natural and Human-Induced Factors on the Accumulation and Migration of Pedogenic Carbonate in Soil: A Review. *Land*, 11 (9), 1448. <https://doi.org/10.3390/land11091448>
2. Monger, H. C., Kraimer, R. A., Khresat, S., Cole, D. R., Wang, X., & Wang, J. (2015). Sequestration of inorganic carbon in soil and groundwater. *Geology*, 43(5), P. 375-378. <https://doi.org/10.1130/G36449.1>
3. Leogrande, R., Vitti, C., Castellini, M., Mastrangelo, M., Pedrero, F., Vivaldi, G. A., & Stellacci, A. M. (2021). Comparison of Two Methods for Total Inorganic Carbon Estimation in Three Soil Types in Mediterranean Area. *Land*, 10 (4), 409. <https://doi.org/10.3390/land10040409>
4. Sanderman, J. (2012). Can management induced changes in the carbonate system drive soil carbon sequestration? A review with particular focus on Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 155, 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.04.015>
5. Monger, H. C. (2014). Soils as generators and sinks of inorganic carbon in geologic time. In A. E. Hartemink, K. McSweeney (Eds.), *Soil Carbon* (pp. 27-36). Springer: Cham, Switzerland.
6. Dietrich, F., Diaz, N., Deschamps, P., Ngatcha, B., N., Sebag, D., & Verrecchia, E. P. (2017). Origin of calcium in pedogenic carbonate nodules from silicate watersheds in the Far North Region of Cameroon: Respective contribution of in situ weathering source and dust input. *Chemical Geology*, 460(5), 54-69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.04.015>
7. Dang, C., Kong, F., Li, Y., Jiang, Z., & Xi, M. (2022). Soil inorganic carbon dynamic change mediated by anthropogenic activities: An integrated study using meta-analysis and random forest model. *Science of The Total Environment*, 835, 155463. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155463>
8. Emmerich, W. E. (2003). Carbon dioxide fluxes in a semiarid environment with high carbonate soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 116(1-2), 91-102. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00231-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00231-9)
9. Batool, M., Cihacek, L. J., & Alghamdi, R. S. (2024). Soil inorganic carbon formation and the sequestration of secondary carbonates in global carbon pools: A Review. *Soil Sys*, 8(1), 15. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010015>
10. Wang, Y., Li, Y., Ye, X., Chu, Y., & Wang, X. (2010). Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: From forest to desert. *Science of The Total Environment*, 408(8), 1925-1931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.01.015>
11. Amit, R., Simhai, O., Ayalon, A., Enzel, Y., Matmon, A., Crouvi, O., ... McDonald, E. (2011). Transition from arid to hyper-arid environment in the southern Levant deserts as recorded by early Pleistocene cummulic Aridisols. *Quaternary Science Reviews*, 30(3-4), 312-323. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.11.007>
12. Kim, J. H., Jobbágy, E. G., Richter, D. D., Trumbore, S. E., & Jackson, R. B. (2020). Agricultural acceleration of soil carbonate weathering. *Global Change Biology*, 26(10), 5988-6002. <https://doi.org/10.1111/gcb.15207>
13. Monger, H. C. (2002). Pedogenic Carbonates: Links between biotic and abiotic CaCO₃. *Proceedings of the 17th WCSS*, Bangkok, Thailand, 14–21 August 2002. Symposium 20, paper 897.
14. Li, Y., Zhang, W., Aydin, A., & Deng, X. (2018). Formation of calcareous nodules in loess–paleosol sequences: Reviews of existing models with a proposed new “per evapotranspiration model”. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154, 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.12.002>
15. Polupan, M. I., Baliuk, S. A., Solovei, V. B., Velychko, V. A., & Volkov, P. O. (2011). Natural mechanism of protection of slope soils from water erosion. M. I. Polupan (Ed.). Kyiv: Fenix. <https://doi.org/10.31073/978-000-000-0> [In Ukrainian]
16. Naorem, A., Jayaraman, S., Dalal, R. C., Patra, A., Rao, C., & Lal, R. (2022). Soil Inorganic Carbon as a Potential Sink in Carbon Storage in Dryland Soils – A Review. *Agriculture*, 2(8), 1256. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081256>
17. Sánchez-Bermúdez, M., del Pozo, J. C., & Pernas, M. (2022). Effects of Combined Abiotic Stresses Related to Climate Change on Root Growth in Crops. *Front. Plant Sci.*, 13, 918537. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.918537>
18. Solovei, V. B., & Trotsenko, O. O. (2024). Comparative morphological-genetic characteristics of podzolized soils on plateau and slope locations. *AgroChemistry and Soil Science*, 97, 4-17. <https://doi.org/10.31073/acss97-01> [In Ukrainian]
19. *Guidelines for soil description*. Fourth edition, corrected and supplemented. (2012). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome Retrieved from <https://www.fao.org/4/a0541e/a0541e.pdf>
20. Polupan, M. I., Solovei, V. B., & Velychko, V. A. (2005). *Classification of Soils of Ukraine*. Ed. M. I. Polupan. Kyiv: Ahrama Nauka. <https://doi.org/10.31073/966-540-013-4> [In Ukrainian].
21. Solovei, V. B., & Trotsenko, E. A. (2024). Thermal regimes of podzolic soils on sloping and plain locations. *Bulletin of Sumy National Agrarian University*. The series: Agronomy and Biology, 56(2), 57-66. <https://doi.org/10.32782/agrobio.2024.2.8> [In Ukrainian]
22. Grin, G. S. (1974). Field diagnostics of soils: a tutorial. (General editorship of prof. A. M. Grinchenko). Kharkiv. [In Russian]
23. Solovei, V. B., & Trotsenko, E. A. (2023). Multilevel investigation of soil temperature regime using digital sensor. *Taurida Scientific Herald. Series: Agricultural Sciences*, 131, 211–219. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.131.27> [In Ukrainian].
24. State Hydrometeorological Service. (2011). *Guidelines for Hydrometeorological Stations and Posts : Meteorological Observations at Stations* (Issue 3, Part 1). Kyiv. Retrieved from <http://www.cgo-sreznivskyi.kyiv.ua/images/PraciSpivrobitnikiv/mastanovy-3.pdf> [In Ukrainian].
25. Breus, N. M. (1981). Chernozems of the Forest-Steppe Zone of the Moderately Continental East European Facies, [38–79]. In *Chernozems of the USSR (Ukraine)*. Moscow: Kolos [In Russian].
26. Medvedev, V. V. (2008). *Soil structure (methods, genesis, classification, evolution, geography, monitoring, protection)*. Kharkiv [In Russian].
27. Polupan, N. I. (Ed.). (1988). *Soils of Ukraine and increasing their fertility : Ecology, regimes and processes, classification and genetic-production aspects* (Vol. 1.). Kyiv: Urozhay [In Russian].

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ IMPROVEMENT OF RESEARCH METHODS

УДК 631.435

Важливість вибору індексу рефракції у визначенні гранулометричного складу ґрунту методом лазерної дифракції

М. О. Солоха^a, Н. В. Винокурова^b ✉

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

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 21.01.2025 Отримано після доопрацювання 05.06.2025 Затверджено до видання 17.06.2025 Доступно онлайн 07.07.2025	У статті висвітлено результати досліджень з удосконалення деяких аспектів процедури визначення гранулометричного складу ґрунту методом лазерної дифракції проб з використанням лазерного аналізатора часточок Mastersizer 3000E фірми Malvern Instruments з рідинним модулем диспергування Hydro EV. Удосконалено спосіб підготовки проби ґрунту до аналізування, розроблено порядок налаштування оптичного параметру – індексу рефракції, виконано порівняння здобутих даних з результатами аналізу за стандартизованим методом (ДСТУ 4730:2007) та статистичний аналіз порівнюваних даних. Одним із завдань авторів було показати, що метод лазерної дифракції є не менш чутливим до просторових (горизонтального і вертикального напрямів) змін гранулометричного складу ґрунту ніж сито-піпет метод Н. А. Качинського (ДСТУ 4730:2007). Дослідження проведено на пробах ґрунтів Лісостепової зони України та чорнозему типового Степової північної недостатньо зволоженої підзони, що відбиралися упродовж 2021–2023 рр. За результатами дослідження спосіб підготовки проб ґрунту до вимірювання на лазерному аналізаторі часточок було модернізовано — з однорідної пасти, після видалення карбонатів, відбирають підпроби для подальшої дезагрегації шляхом кип'ятіння у розчині гідроксиду натрію. Розроблено спосіб визначення індексу рефракції для певного ґрунту шляхом порівняння даних, здобутих методом лазерної дифракції за різних параметрів індексу рефракції, з даними стандартизованого методу. Критерієм оптимальності є найменша сума різниць по всіх фракціях. Для ґрунтів Лісостепу індекс рефракції є не однаковим: 1,39 для чорнозему типового та чорнозему опідзоленого Лісостепової помірно зволоженої підзони та 1,40 для чорнозему опідзоленого, темно-сірого опідзоленого, сірого лісового та ясно-сірого лісового інших підзон Лісостепу. Аналіз по фракціях проб ґрунтів, яким притаманний однаковий індекс рефракції показав, що не кожна фракція має лінійний зв'язок, тобто не для кожної фракції можливо побудувати надійну регресійну модель у вигляді рівняння, що пов'язує вміст кожної з фракцій, виділених за методом лазерної дифракції з вмістом кожної з фракцій за методом ДСТУ 4730:2007. Тим не менш, для більшості фракцій маємо припустиму якість регресійних моделей. Отже, метод лазерної дифракції можливо застосовувати як альтернативний для визначення гранулометричного складу ґрунту.
Ключові слова: гранулометричний склад; ґрунт; лазерна дифракція; седиментація; підготовка проб; розмір часточок.	

✉ mega_nadi1980@ukr.net

ORCID: ^a 0000-0002-1860-0819; ^b 0000-0003-3876-480X

Форма цитування: Солоха М. О., Винокурова Н. В. Важливість вибору індексу рефракції у визначенні гранулометричного складу ґрунту методом лазерної дифракції. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків, 2025. Вип. 98. С. 55–68. doi: 10.31073/acss98-04

1. Вступ

Визначення гранулометричного складу ґрунту є важливою складовою у дослідженнях щодо його генезису, родючості та деградованості, зокрема мілітарної. Розмір гранулометричних фракцій та їх частка впливають на водно-повітряний режим, гумусоаккумулятивну та буферну здатність ґрунту, стійкість до дефляції та ерозії.

На сьогодні великі площі земель України зазнали і зазнають мілітарного впливу, як безпосередньо від вибухів снарядів та авіабомб, будівництва фортифікаційних споруд, пожеж, розливу паливно-мастильних матеріалів,

затоплення через руйнації дамб, тощо, так і опосередковано — у вигляді кислотних дощів та осідання забруднювальних речовин з повітря у складі пилу. Тому для ефективного моніторингу великої площі земель постає потреба у застосуванні швидкісних та продуктивних методів аналізування проб ґрунту за показниками його якості. Одним із таких методів, що швидко розповсюджується у світі, є метод лазерної дифракції для визначення ґранулометричного складу ґрунту, тобто визначення розміру елементарних мінеральних часточок ґрунту за допомогою лазерного аналізатора. Він дозволяє вимірювати розмір у досить широкому діапазоні, наприклад, від 0,01 мкм до 3500 мкм (залежно від конструкції приладу), зменшити час аналізування (разом з підготовкою проб) до 2–3 діб зі зменшенням об'єму застосовуваних реагентів порівняно зі стандартизованим седиментаційним піпетковим методом за ДСТУ 4730:2007¹.

На використання ж стандартизованих седиментаційних піпеткових методів (за ДСТУ 4730:2007 або ДСТУ ISO 11277:2005²) впливають деякі, присутні в них, недоліки, які стають на заваді швидкого та дешевого аналізування ґранулометричного складу ґрунту за масових обстежень. Ці методи потребують температурної стабільності під час аналізування (упродовж 1–2 днів), є енерговитратними (потребують витрат енергії для випарювання вологи з чашок, використання сушильної шафи (не менше 30 годин), ваг, приладів підтримки температурної стабільності тощо). З огляду на це, метод лазерної дифракції є досить перспективним, адже потребує меншої кількості операцій під час вимірювання і дозволяє одночасно встановлювати межі фракцій для різних класифікацій. До того ж метод лазерної дифракції запропоновано як альтернативний метод визначення текстури ґрунту у додатку до пропозиції Директиви Європейського Парламенту та Ради про моніторинг ґрунтів та стійкість (Закон про моніторинг ґрунтів)³. Запровадження методу лазерної дифракції в Україні надасть змогу використовувати міжнародну методологію з урахуванням певних особливостей визначення ґранулометричного складу ґрунту (традиційні розміри фракцій), котрі використовувалися в Україні впродовж багатьох років.

На ринку аналітичної техніки представлено лазерно-дифракційні аналізатори частинок (лазерні дифрактометри) різних моделей, різних фірм, що конструктивно відрізняються один від одного: діапазоном вимірювання, модулем диспергування та оптичним блоком (довжиною хвилі лазера, кількістю детекторів). Це впливає на результати вимірювань. У багатьох країнах світу проводяться дослідження з метою застосування цього методу до ґрунтових проб. Аналіз публікацій різних авторів (С. Polakowski [1], D. Igaz [2], С. S. Kasmerchaka [3], Р. Fisher [4], А. Makó [5], А. Bieganowski [6], Y. Yang [7], та інші) свідчить про різноманітність підходів до пробопідготовки та роботи на лазерному дифрактометрі.

На сьогодні єдиного способу визначення ґранулометричного складу методом лазерної дифракції у світі не існує. Тому метою статті є висвітлення застосовуваних авторами процедурних особливостей вимірювання ґранулометричного складу методом лазерної дифракції проб ґрунту за допомогою лазерного аналізатора частинок Mastersizer 3000E фірми Malvern Instruments з рідинним модулем диспергування Hydro EV. У статті представлено результати

¹ ДСТУ 4730:2007. Якість ґрунту. Визначення ґранулометричного складу методом піпетки в модифікації Н. А. Качинського. [Чинний від 2008–01–01]. К.: Держспоживстандарт України, 2008. 16 с.

² ДСТУ ISO 11277:2005 Якість ґрунту. Визначення ґранулометричного складу мінерального матеріалу ґрунту. Метод просіювання і седиментації (ISO 11277:1998, IDT). [Чинний від 2006–07–01]. К.: Держспоживстандарт України, 2006. 59 с.

³ Додаток до пропозиції Директиви Європейського Парламенту та Ради про моніторинг ґрунтів та стійкість (Закон про моніторинг ґрунтів) COM(2023) 416, Брюссель, 5.7.2023 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52023PC0416>

роботи з удосконалення способу підготовки проби ґрунту для аналізу на лазерному дифрактометрі, способу вибору оптичного параметру — індексу рефракції, а також результати порівняння здобутих даних з даними вимірювання гранулометричного складу за стандартизованим методом (ДСТУ 4730:2007) та їх статистичний аналіз.

2. Об'єкти (матеріали) і методи досліджень

2.1. Об'єкти дослідження

Об'єктами дослідження є ґрунти Лісостепової та північної частини Степової зон України: чорнозем типовий (Лісостепової помірно зволоженої підзони та Степової північної недостатньо зволоженої); чорнозем опідзолений, темно-сірий опідзолений, сірий лісовий та ясно-сірий лісовий ґрунти (Лісостепових підзон — зволоженої, підвищено зволоженої, добре і достатньо зволоженої та сильно зволоженої).

Проби ґрунту відбирали у 2021-2023 рр. рандомно згідно з ДСТУ 4287:2004⁴ та ДСТУ ISO 10381-2:2004⁵ і таким чином було створено колекцію ґрунтових проб. Проби з верхнього шару ґрунту потрібні для оцінки впливу антропогенних та природних чинників, зокрема ерозії, на гранулометричний склад. Враховували, що на одному полі за відбирання проб у різних шарах верхнього генетичного горизонту, наприклад, 0–10 см і 0–25 см, залежно від рельєфу місцевості, може бути різний гранулометричний склад, що свідчатиме про деградаційні (ерозійні) процеси. Також відбирали проби ґрунту з різних глибин у профілі, адже з глибиною гранулометричний склад також може змінюватися. У виборі локацій відбирання проб спиралися на необхідність вирішення одного із першорядних завдань авторів — показати, що метод лазерної дифракції є не менш чутливим до просторових (горизонтального і вертикального напрямку) змін гранулометричного складу ґрунту ніж сито-піпет метод Н. А. Качинського (ДСТУ 4730:2007).

2.2. Методи дослідження

Попереднє оброблення проб ґрунту виконували з урахуванням ДСТУ ISO 11464:2007⁶, а саме — проби було висушено до повітряно-сухого стану, просіяно крізь сито з діаметром отворів 1 мм, перемішано та взято вторинний середній зразок методом квартування.

У всіх пробах ґрунту визначення гранулометричного складу було виконано двома методами — (1) стандартизованим сито-піпет методом в модифікації Н. А. Качинського за ДСТУ 4730:2007 і (2) методом лазерної дифракції.

Визначення методом лазерної дифракції виконували на лазерно-дифракційному аналізаторі розміру частинок Mastersizer 3000E фірми Malvern Instruments з рідинним модулем диспергування Hydro EV. Аналізатор складається з оптичного блоку, вимірювальної кювети, комп'ютеру з програмним забезпеченням Mastersizer та рідинного модулю диспергування (гідроблок). Оптичний блок має джерело світла, з довжиною хвиль 632,8 нм, та 86 детекторів, що дозволяє вимірювати частинки у діапазоні розмірів 0,1–1000 мкм.

⁴ ДСТУ 4287:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб. [Чинний від 2005–07–01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 10 с.

⁵ ДСТУ ISO 10381-2:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб. Частина 2. Настанови з методів відбирання проб (ISO 10381-2:2002, IDT). [Чинний від 2006–04–01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2007. 12 с.

⁶ ДСТУ ISO 11464:2007 Якість ґрунту. Попереднє оброблення зразків для фізико-хімічного аналізу (ISO 11464:2006, IDT). [Чинний від 2009–10–01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2012. 12 с.

В обох методах для видалення карбонатів застосовували розчин соляної кислоти (HCl) з молярною концентрацією $0,2 \text{ моль/дм}^3$ для карбонатних та $0,05 \text{ моль/дм}^3$ для некарбонатних ґрунтів, для дезагрегації — розчин гідроксиду натрію (NaOH) з молярною концентрацією 1 моль/дм^3 . Таким чином підготовку проб до аналізування двома методами проведено із застосуванням однакових реагентів і ґрунтові агрегати однаково дезагреговані до рівня елементарних часточок — це дозволяє порівнювати результати, оскільки за порівняння ефективності методів розміри елементарних часточок мають бути однаковими.

Однак, у ході роботи виявилось, що не можливо використовувати спосіб підготовки зразка до вимірювання на лазерному аналізаторі часточок такий самий, як і за ДСТУ 4730:2007. Цей стандартний спосіб підготовки зразка не дозволяє провести коректне вимірювання на лазерному аналізаторі, оскільки за великої наважки (10–30 г), великий об'єм суспензії (близько 250 см^3) після перенесення до гідроблоку створює занадто слабку прозорість. Якщо ж взяти лише частину суспензії, вона не буде репрезентативною, тому що внаслідок швидкого осідання великих часточок вони не потраплять до вимірювальної кювети, що спотворить результати вимірювань.

Враховуючи ці обмеження, було удосконалено спосіб підготовки проби до вимірювання на лазерному дифрактометрі. А саме: після висушування, розтирання, просіювання, видалення карбонатів та промивання від іонів хлору пробу переміщували до фарфорової чашки, видаляли зайву вологу (при цьому ґрунтова проба переходить з текучого стану у пластичний) і перемішували. З отриманої ґрунтової пасти брали частину проби (підпробу), достатньої маси, наприклад, до 0,5 г для чорноземних ґрунтів, поміщали її у конічну колбу місткістю 100 см^3 з дистильованою водою об'ємом $50\text{--}80 \text{ см}^3$ та додавали $0,5 \text{ см}^3$ розчину гідроксиду натрію (NaOH) з концентрацією 1 моль/дм^3 , витримували протягом двох годин, періодично струшуючи вручну, та кип'ятили суспензію протягом 1 год. Після охолодження суспензію переносили до гідроблоку і проводили вимірювання гранулометричного складу на лазерному аналізаторі часточок за алгоритмом, зі встановленими оптимальними параметрами налаштувань: диспергатор — дистильована вода з коефіцієнтом рефракції 1,33; швидкість мішалки — 2250 об/хв; час вимірювання фону та зразка 15 с; кількість вимірювань — 6; математична модель розрахунку — теорія Мі з коефіцієнтом рефракції — 1,39 та 1,40.

Коефіцієнт (індекс) рефракції (заломлення) — це показник, що визначає, наскільки викривляється або заломлюється шлях світла при вході в матеріал [8].

Статистичну обробку даних проводили за допомогою програмного забезпечення Excel та Statistica v.10, застосовуючи такі показники: коефіцієнт кореляції r_{xy} ; фактичне значення t-критерію Стюдента $t_{\text{факт.}}$; коефіцієнт детермінації R^2 ; регресійні рівняння. Коефіцієнтом кореляції визначали наявність зв'язку між значеннями вмісту кожної фракції, визначеними двома методами; фактичним значенням t-критерію — істотність коефіцієнта кореляції, тобто наявність або відсутність лінійного зв'язку [9–11]. Коефіцієнт детермінації свідчить про якість побудованої регресійної моделі. Чим ближче коефіцієнт детермінації до 1,0, тим ліпше регресійна модель відображає залежність даних.

3. Результати

3.1. Вибір параметру індексу рефракції

У визначенні гранулометричного складу методом лазерної дифракції ми ставили за мету отримати дані розподілу часточок по фракціях максимально наближені до стандартизованого методу. Виходячи з цього, обираючи індекс

рефракції для ґрунтових зразків за вимірювання методом лазерної дифракції, спиралися на дані вмісту фракцій, визначені за ДСТУ 4730:2007 та використовували їх як опорні (контрольні) значення (хоча вони і не є абсолютно точними, адже багато операцій в методиці виконання породжують похибку у вимірюваннях).

Згідно з ISO 13320:2020⁷ «підтвердження використаних оптичних властивостей можна знайти шляхом порівняння обчисленої концентрації з даними розподілу розмірів із справжньою концентрацією. Велике відхилення вказує на те, що або оптична модель, або застосований показник заломлення є неправильними. Крім того, можна використовувати інші методи (наприклад, мікроскопію або седиментацію), щоб перевірити наявність значної частки дрібних частинок».

Тому для встановлення (вибору) оптимального значення індексу рефракції було проаналізовано зразки ґрунтів за різних індексів рефракції. В таблиці 1 представлено результати аналізування зразків чорнозему типового Лісостепової зони.

Таблиця 1

Результати визначення оптимального параметру індексу рефракції для чорнозему типового за сумою різниць між вмістом гранулометричних фракцій за двома методами

Метод	Індекс рефракції	Вміст гранулометричних фракцій, %, за їх розмірів, мм						Сума різниць, %
		1-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001	
ДСТУ	–	0,31	5,59	30,35	10,94	14,64	38,18	–
ЛД	1,33	0	1,00	6,54	6,97	74,02	11,48	–
Різниця	–	0,31	4,59	23,81	3,97	59,38	26,70	118,75
ЛД	1,35	0,3	2,81	8,58	4,51	48,99	34,82	–
Різниця	–	0,01	2,78	21,77	6,43	34,35	3,36	68,69
ЛД	1,37	1,09	6,24	19,05	4,95	29,24	39,43	–
Різниця	–	0,78	0,65	11,30	5,99	14,60	1,25	34,57
ЛД	1,38	1,60	7,90	24,45	6,29	23,03	36,72	–
Різниця	–	1,29	2,31	5,90	4,65	8,39	1,46	23,99
ЛД	1,39	1,8	9,18	29,52	7,93	19,17	32,40	–
Різниця	–	1,49	3,59	0,83	3,01	4,53	5,78	19,22
ЛД	1,40	1,90	10,22	33,40	9,38	16,18	28,93	–
Різниця	–	1,59	4,63	3,05	1,56	1,54	9,25	21,62
ЛД	1,41	2,08	10,93	35,98	10,50	14,01	26,49	–
Різниця	–	1,77	5,34	5,63	0,44	0,63	11,69	25,49
ЛД	1,43	2,27	11,43	38,82	11,94	11,70	23,84	–
Різниця	–	1,96	5,84	8,47	1,00	2,94	14,34	34,55
ЛД	1,45	2,00	11,91	40,85	12,96	11,25	21,03	–
Різниця	–	1,69	6,32	10,50	2,02	3,39	17,15	41,07
ЛД	1,47	2,46	12,29	42,21	13,62	11,57	17,84	–
Різниця	–	2,15	6,70	11,86	2,68	3,07	20,34	46,80
ЛД	1,50	2,18	12,82	44,31	14,46	12,77	13,46	–
Різниця	–	1,87	7,23	13,96	3,52	1,87	24,72	53,17
ЛД	1,54	2,04	13,24	46,23	15,22	14,50	8,77	–
Різниця	–	1,73	7,65	15,88	4,28	0,14	29,41	59,09

Примітка: Методи: ДСТУ – стандартизований метод Качинського; ЛД – метод лазерної дифракції

Оптимальний індекс рефракції для ґрунту визначали за найменшою сумою різниць між двома методами по всіх шести фракціях. Суму різниць для кожного зі зразків визначали за формулою:

⁷ ISO 13320:2020 Particle size analysis. Laser diffraction methods. [2020-01-06]. Geneva, Switzerland : International Organization for Standardization. 2020. 66 p

$$C = \sum_{i=n} |A_i - B_i|$$

де С — сума різниць по фракціях між методами;

A_i — значення i -тої фракції, визначене за методом лазерної дифракції;

B_i — значення i -тої фракції, визначене за ДСТУ 4730:2007.

З таблиці 1 бачимо що найменшою є сумарна різниця 19,22 % за індексу рефракції 1,39. Так само, за найменшим значенням сумарної різниці між методами, було обрано оптимальні параметри індексу рефракції для кожного з досліджуваних зразків.

3.2. Порівняння результатів аналізування за двома методами

Оскільки індекс рефракції для різних ґрунтів був не однаковим, то порівняння даних по фракціях було виконано залежно від типу ґрунту та ґрунтово-екологічної зони (підзони) в якій відбиралась ґрунтова проба. Тобто всю колекцію проб ґрунтів було поділено на групи.

До першої дослідної групи включено 143 проби чорнозему типового з Лісостепової помірно зволоженої підзони та Степової північної недостатньо зволоженої; № проб: 29–42, 117, 118, 123–128, 131, 132, 170–187, 196, 220–223, 373, 375–378, 400–403, 409, 337–446, 461, 467–474, 526–586, 629–631, 634, 635. Ці проби проаналізували при індексі рефракції 1,39. Для прикладу надано на рисунку 2 фрагмент порівняння даних двох методів по 3-х фракціях.

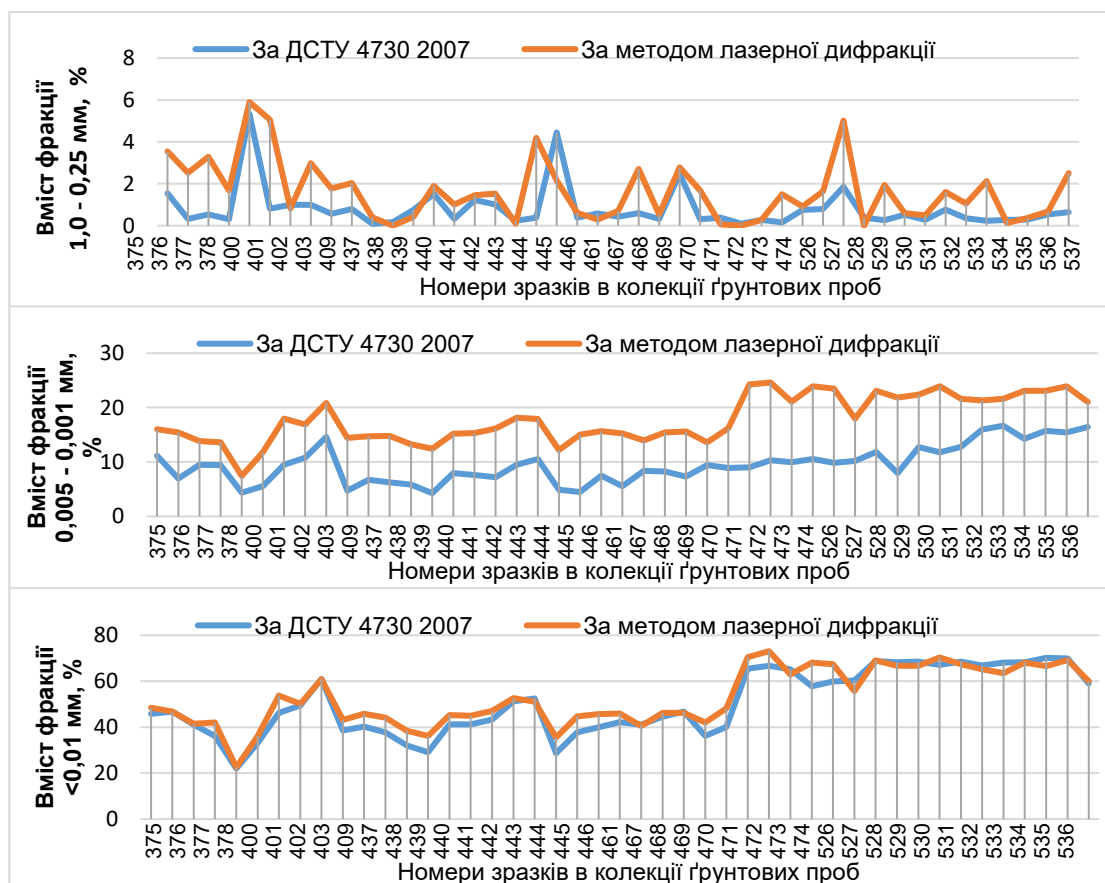


Рис. 2. Вміст 3-х гранулометричних фракцій за аналізування двома методами чорнозему типового (проби з Лісостепової помірно зволоженої підзони та Степової північної недостатньо зволоженої)

Аналізуючи рисунок 2 бачимо, що графіки по фракціях для обох методів мають подібні піки зростання та пониження, крім фракції крупний та середній пісок (1,0–0,25 мм), де вони для багатьох зразків не співпадають, це пов'язано, на думку авторів, з невеликим вмістом даної фракції (до 6 %) та неоднорідністю ґрунтової проби. Оскільки декілька часточок можуть призвести до розбіжностей, адже в методі лазерної дифракції для дезагрегації та вимірювання використовується підпроба для чорноземних ґрунтів масою до 0,5 г.

Дані по фракціях не тотожні, а мають різницю (між методами) від 0,02 до 16,59 % залежно від фракції. У 79 % проб невелику різницю (до 2 %) має фракція крупного і середнього піску, у 58 % проб фракції дрібного піску (0,25–0,05 мм) різниця не перевищує 5 %, у 80 % зразків фракції середнього пилу (0,01–0,005 мм) та у 67 % фракції фізичної глини (<0,01 мм) вона не перевищує 5 %. Але для фракції дрібний пил (0,005–0,001 мм) чорнозему типового характерним є велика різниця — у 82 % проб вона перевищує 5 %, тобто є суттєвою. В інших фракціях лише в 50 % проб різниця менше 5 %. Тому, для чорнозему типового був визначений коефіцієнт кореляції та його істотність. Для 143 зразків табличне значення t-критерію дорівнює 1,98 [11], що менше ніж розрахункове $t_{\text{факт.}}$, а отже коефіцієнт кореляції є істотним і для всіх фракцій можемо побудувати регресійне рівняння (Табл. 2).

Таблиця 2

Статистичні показники порівняння результатів аналізування проб чорнозему типового за двома методами

Гранулометрична фракція: розмір (мм), назва		Статистичний показник			
		Коефіцієнт кореляції r_{xy}	t-критерій Стюдента $t_{\text{факт}}$	Коефіцієнт детермінації R^2	Регресійне рівняння
1–0,25	пісок крупний і середній	0,92	27,17	0,84	$y = 1,18x - 0,94$
0,25–0,05	пісок дрібний	0,79	15,05	0,62	$y = 1,05x - 4,17$
0,05–0,01	пил крупний	0,84	18,55	0,71	$y = 1,24x - 2,81$
0,01–0,005	пил середній	0,71	12,04	0,51	$y = 1,96x - 4,06$
0,005–0,001	пил дрібний	0,62	9,43	0,39	$y = 0,66x - 1,38$
<0,001	мул	0,86	20,42	0,75	$y = 1,16x + 0,39$
<0,01	фізична глина	0,91	26,73	0,84	$y = 1,08x - 4,84$

Примітка: x – вміст фракції за методом лазерної дифракції; y – вміст фракції за ДСТУ

Коефіцієнт детермінації для всіх фракцій становив від 0,39 до 0,84, тобто не всі регресійні рівняння є якісними. Незадовільними можливо вважати регресійні рівняння для фракцій дрібного пилу, адже лише у 39 % проб (у разі перерахунку) дані фракції дрібний пил, визначені за методом лазерної дифракції, будуть співпадати з даними, визначеними за ДСТУ 4730 2007. Для інших фракцій цей показник вище 50 %. Тобто у більш ніж 50 % за відомого вмісту фракції за методом лазерної дифракції за рівнянням вміст фракції дорівнюватиме тим самим даним, що і за ДСТУ 4730:2007.

До другої дослідної групи включено 31 пробу чорнозему опідзоленого Лісостепової помірно зволоженої підзони; №№ проб: 158–169, 188–191, 410–421, 447, 515, 517. Ці проби також проаналізовано при індексі рефракції 1,39. На рисунку 3 графічно відображено фрагмент даних вмісту 3-х фракцій, визначених за ДСТУ 4730 2007 та методом лазерної дифракції.

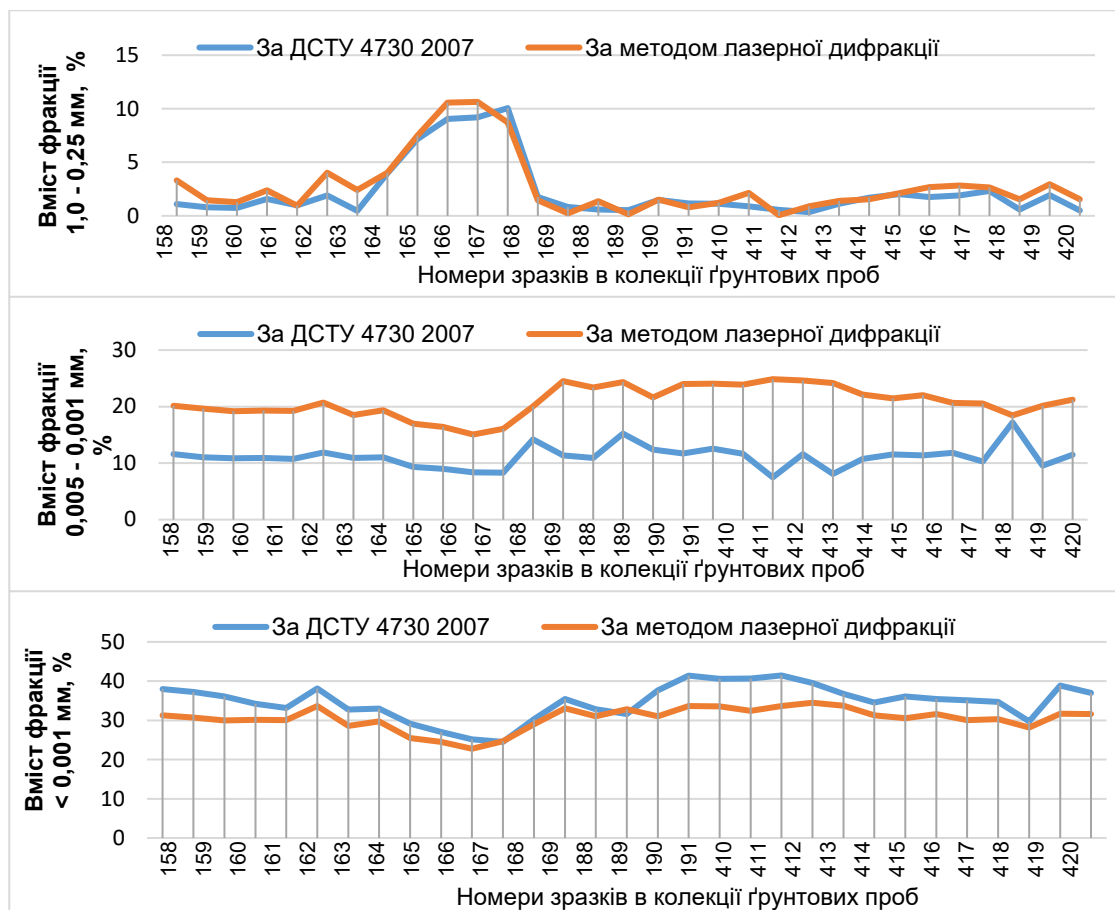


Рис. 3. Вміст 3-х гранулометричних фракцій за аналізування двома методами чорнозему опідзоленого (проби з Лісостепової помірно зволоженої підзони)

Аналізуючи рисунок 3 бачимо, що різниця між даними, отриманими за двома методами залежить від фракції і коливається у межах від 0 до 17,38 %.

Найменшу різницю констатовано для фракції 1–0,25 мм — у 94 % проб вона менше 2 %. Для інших фракцій, крім фракції дрібного пилу (0,005–0,001 мм), у більшості зразків різниця між методами не перевищує 5 %: для дрібного піску (0,25–0,05 мм) це у 91 % зразків, для крупного пилу (0,05–0,01 мм) — у 61 % зразків, для середнього пилу (0,01–0,005 мм) — у 84 % зразків, для мулу (<0,001 мм) – у 58 % зразків, для фізичної глини (< 0,01 мм) — у 90 % зразків. Отже для чорнозему опідзоленого Лісостепової помірно зволоженої підзони, як і для чорнозему типового різниця між методами щодо вмісту фракції дрібного пилу (0,005–0,001 мм) є суттєвою (більше 5 %) у 97 % проб.

Порівнявши дані за двома методами для чорнозему опідзоленого маємо значення коефіцієнту кореляції від 0,19 (слабка кореляція) до 0,96 (висока). Наявність лінійного зв'язку перевіряємо за t-критерієм. Для 31 проби табличне значення t-критерію дорівнює 2,04 [11], що менше ніж розрахункове $t_{\text{факт.}}$ (Табл. 3) для більшості фракцій, крім фракції дрібного пилу. Тобто для фракції дрібний пил лінійного зв'язку не існує, тому визначення лінійної регресійної моделі не має сенсу. Але вміст даної фракції можливо вирахувати шляхом віднімання від 100 % вміст всіх інших фракцій, де є регресійні моделі. У таблиці 3 наведено регресійні рівняння та коефіцієнти детермінації.

Таблиця 3

Статистичні показники для порівняння результатів аналізування за двома методами проб чорнозему опідзоленого з Лісостепової помірно зволоженої підзони

Гранулометрична фракція: розмір (мм), назва		Статистичний показник			Регресійне рівняння
		Коефіцієнт кореляції r_{xy}	t-критерій Стюдента $t_{\text{факт}}$	Коефіцієнт детермінації R^2	
1-0,25	пісок крупний і середній	0,95	17,27	0,91	$y = 0,93x - 0,32$
0,25-0,05	пісок дрібний	0,93	13,27	0,86	$y = 1,37x - 5,51$
0,05-0,01	пил крупний	0,69	5,14	0,48	$y = 1,51x - 10,14$
0,01-0,005	пил середній	0,72	5,67	0,52	$y = 2,25x - 6,62$
0,005-0,001	пил дрібний	0,20	1,09	0,04	–
<0,001	мул	0,88	9,90	0,77	$y = 1,35x - 6,48$
<0,01	фізична глина	0,96	18,45	0,92	$y = 1,15x - 11,44$

Примітка: x – вміст фракції за методом лазерної дифракції; y – вміст фракції за ДСТУ

Коефіцієнт детермінації для фракцій крупного і середнього піску, дрібного піску, мулу та «фізичної глини» є досить високим (не менше 0,77), що говорить про хорошу якість моделі. В той же час фракції крупного та середнього пилу мають, відповідно, коефіцієнт детермінації 0,48 та 0,52, тобто лише 48 % та 52 % зразків значень фракції за методом лазерної дифракції за використання цієї моделі будуть відповідати даним вмісту фракції, що дорівнюватиме тим самим даним що і за ДСТУ 4730:2007. Тобто ця модель регресії не є достатньо достовірною.

До третьої дослідної групи включено 96 проб чорнозему опідзоленого із Лісостепової зволоженої, Лісостепової підвищено зволоженої, Лісостепової добре і достатньо зволоженої, Лісостепової сильно зволоженої підзон (№ проб: 10–28, 195, 217, 224, 348–360, 374, 379–381, 390–395, 432, 475–511, 518–522, 596–601, 636, 640, 647, 648, 651). Ці проби проаналізовано при індексі рефракції 1,40. На рисунку 4 графічно відображено фрагмент даних вмісту 3-х фракцій, визначених за ДСТУ 4730 2007 та методом лазерної дифракції.

Аналізуючи графіки порівняння бачимо, що якщо збільшується (зменшується) вміст фракції за ДСТУ 4730 2007, то спостерігається і збільшення (зменшення) фракції за методом лазерної дифракції. Але відсоток збільшення (зменшення) різний, тобто різниця між значеннями методів не є постійною величиною і за результатами статистичного аналізу змінюється від 0,0 до 17,52 %. Невелику різницю мають фракція крупного і середнього піску (1–0,25 мм) — у 78 % проб вона не перевищує 3 %, а у 15 % — становить від 4 до 5 %. Для фракції середнього пилу — у 68 % проб різниця не перевищує 2,5 % та у 23 % знаходиться в межах 2,5–5 %, для фракції фізичної глини — у 49 % проб різниця не перевищує 2,5 % та у 34 % знаходиться в межах 2,5–5 %. Для фракцій дрібного пилу та мулу у переважної кількості зразків (76 та 67 % відповідно) різниця знаходиться в діапазоні 2,5–7,5 %. Отже, для проб чорнозему опідзоленого третьої групи за порівняння даних двох методів характерним є більший вміст фракції дрібного пилу та менший вміст фракції мулу в методі лазерної дифракції порівняно з даними за ДСТУ 4730:2007. Тому дані потребують перерахунку.

Статистичний аналіз показав, що між фракціями існує кореляційний зв'язок і коефіцієнт кореляції змінюється від 0,77 до 0,98, тобто маємо досить високу кореляцію по всіх фракціях. Враховуючи наявність лінійного зв'язку по всіх фракціях ($t_{\text{табл.}} = 1,98$ менше $t_{\text{факт.}}$) [11] побудовано регресійні рівняння. Коефіцієнт детермінації майже для всіх фракцій є досить високим (від 0,7), що говорить про хорошу якість моделі, лише для фракції середній пил якість моделі є задовільною. (Табл. 4).

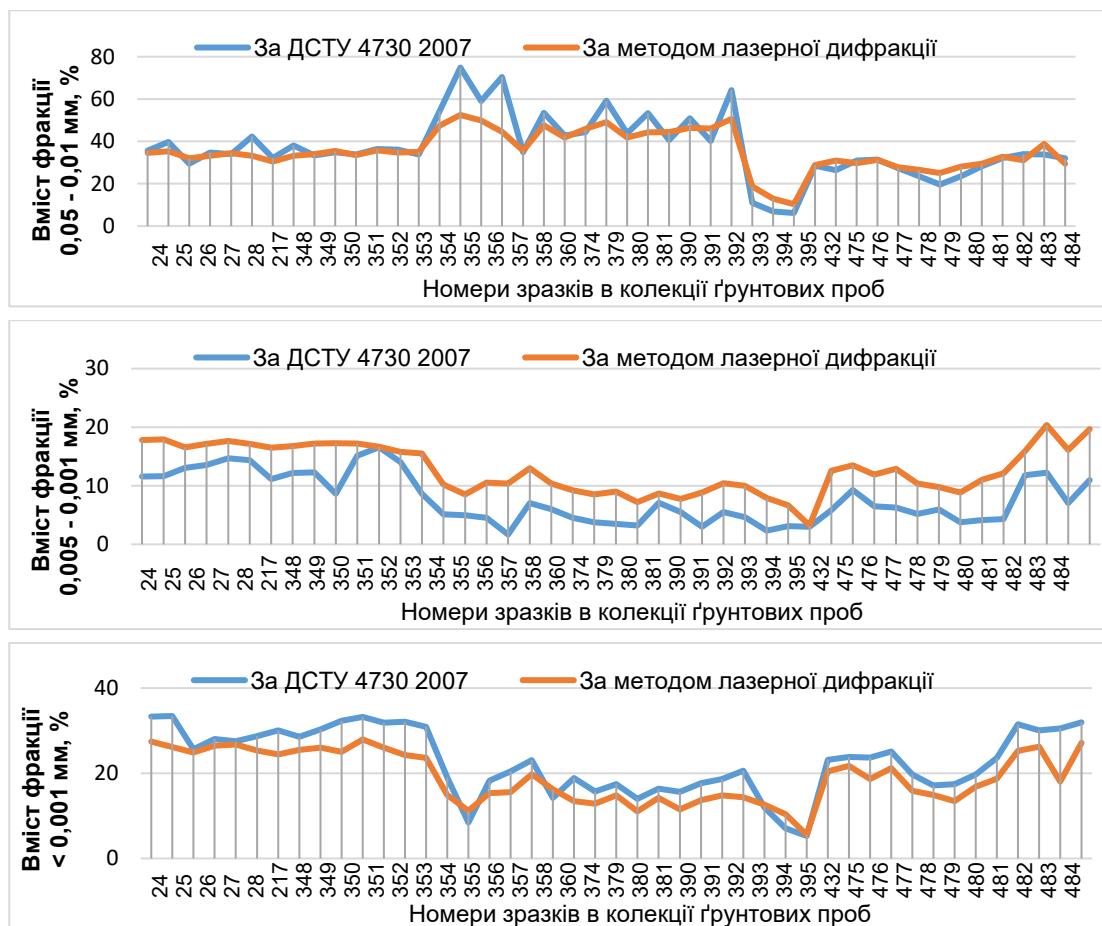


Рис. 4. Вміст 3-х гранулометричних фракцій за аналізування двома методами чорнозему опідзоленого (проби зі зволжених підзон Лісостепу)

Таблиця 4

Статистичні показники для порівняння результатів аналізування за двома методами проб чорнозему опідзоленого зі зволжених підзон Лісостепу

Гранулометрична фракція: розмір (мм), назва	Статистичний показник			
	Коефіцієнт кореляції r_{xy}	t-критерій Стюдента $t_{\text{факт}}$	Коефіцієнт детермінації R^2	Регресійне рівняння
1-0,25 пісок крупний і середній	0,94	26,82	0,88	$y = 1,01x - 1,65$
0,25-0,05 пісок дрібний	0,9	20,34	0,81	$y = 1,35x - 7,77$
0,05-0,01 пил крупний	0,91	20,72	0,82	$y = 1,41x - 11,13$
0,01-0,005 пил середній	0,76	11,50	0,58	$y = 1,43x - 1,29$
0,005-0,001 пил дрібний	0,84	14,84	0,70	$y = 0,89x - 3,63$
<0,001 мул	0,89	19,05	0,89	$y = 1,07x + 2,74$
<0,01 фізична глина	0,97	42,52	0,95	$y = 1,12x - 4,77$

Примітка: x – вміст фракції за методом лазерної дифракції; y – вміст фракції за ДСТУ

Отже, для чорнозему опідзоленого Лісостепової зволоженої, Лісостепової підвищено зволоженої, Лісостепової добре і достатньо зволоженої, Лісостепової сильно зволоженої підзон за відомого значення фракції за методом лазерної дифракції за рівнянням можливо визначити вміст фракції, що дорівнюватиме тим самим даним, що і за ДСТУ 4730:2007 з вірогідністю 58 % для фракції середній пил, та для інших — від 70 %, а для фракція «фізичної глини» — 95 %, що особливо важливо для діагностування ґрунтів, наприклад, за коефіцієнтом профільного накопичення гумусу (КПНГ) та коефіцієнтом відносної акумуляції гумусу (КВАГ).

До четвертої дослідної групи включено 35 проб темно-сірого опідзоленого, сірого лісового та ясно-сірого лісового ґрунтів Лісостепової зволоженої, Лісостепової підвищено зволоженої та Лісостепової добре і достатньо зволоженої

підзон, які аналізували при індексі рефракції 1,40 (№ проб: № 218, 219, 224, 225, 359, 389, 427–429, 433, 448–451, 456, 457, 463, 608–610, 617–619, 623–625, 637–639, 641–644, 652). На рисунку 5 надано фрагмент даних вмісту часточок по фракціях за обома методами.

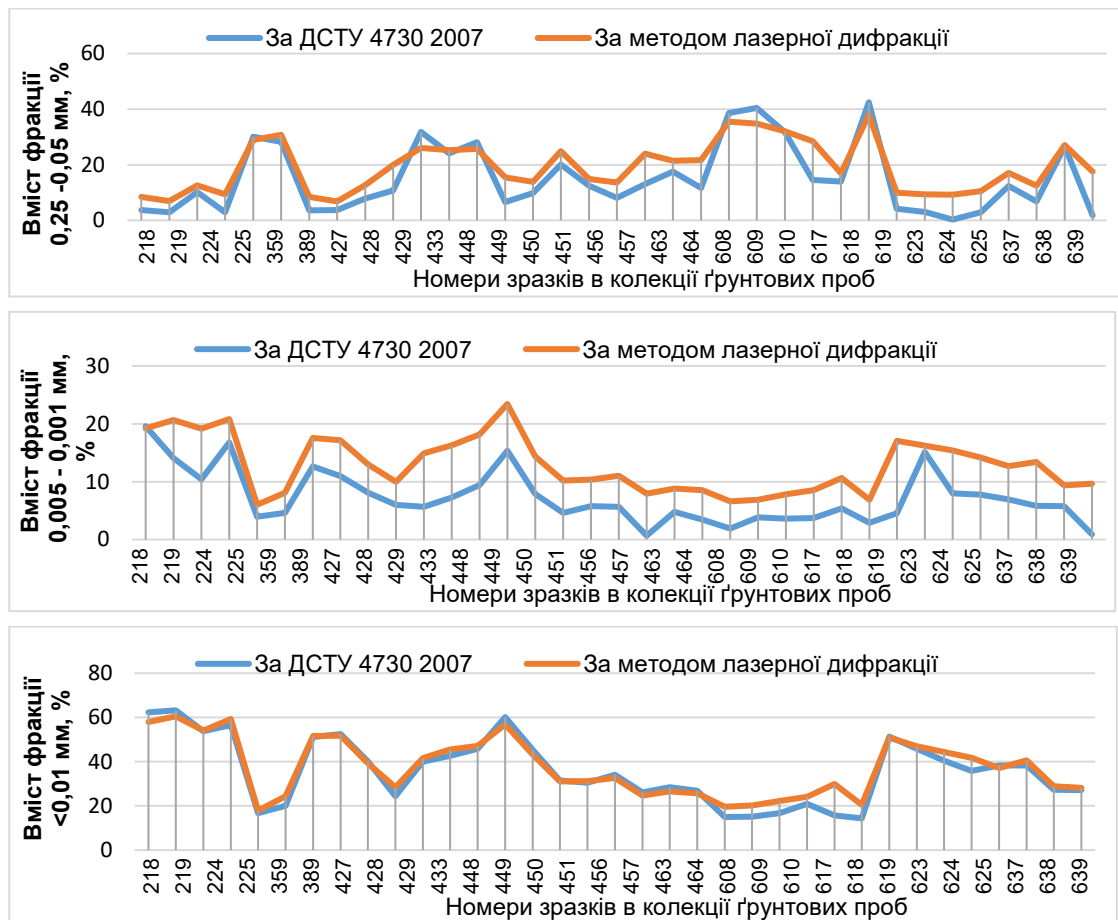


Рис. 5. Вміст 3-х гранулометричних фракцій за аналізування двома методами темно-сірого опідзоленого, сірого лісового та ясно-сірого лісового ґрунтів (проби зі зволоженої, підвищено зволоженої та добре і достатньо зволоженої підзон Лісостепу)

Аналіз графіків (Рис. 5) показує, що дані мають подібні піки зростання та пониження для обох методів, але процентний вміст фракцій різний. Фракція крупного і середнього піску має у 68 % зразків різницю до 3 %, при цьому у всіх пробах різниця менше 5 %. Також маленьку різницю має фракція середнього пилу, де у 78 % проб різниця менше 2 % і у 36 % — від 2 до 5 %. Для фракції дрібного пилу різниця переважно становить від 2,5 до 7,5 %. Отже для темно-сірого опідзоленого, сірого лісового та ясно-сірого лісового ґрунтів Лісостепової зволоженої, Лісостепової підвищено зволоженої та Лісостепової добре і достатньо зволоженої підзон характерним є близькість значень вмісту крупного і середнього піску та середнього пилу і як для чорноземних ґрунтів велика розбіжність між даними у фракції дрібного пилу. За вмістом фізичної глини у 86 % зразків різниця не перевищує 5 %, тобто може знаходитись на рівні аналітичної похибки методів.

Провівши статистичний аналіз важливо відзначити, що коефіцієнт кореляції для всіх фракцій більше 0,74, тобто для більшості фракцій за шкалою Шедока маємо тісний зв'язок, а для фракції середнього пилу — середній [12]. Коефіцієнти кореляції є суттєві ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}} = 2,04$) [11], тому для всіх фракцій побудовано регресійні рівняння. Коефіцієнт детермінації майже для всіх фракцій є досить

високим (від 0,73), що говорить про хорошу якість моделі, лише для фракції середній пил якість моделі є задовільною (Табл. 5).

Таблиця 5

Статистичні показники для порівняння результатів аналізування за двома методами проб темно-сірого опідзоленого, сірого лісового та ясно-сірого лісового ґрунтів зі зволоженої, підвищено зволоженої та добре і достатньо зволоженої підзон Лісостепу

Гранулометрична фракція: розмір (мм), назва		Статистичний показник			
		Коефіцієнт кореляції r_{xy}	t-критерій Ст'юдента $t_{\text{факт}}$	Коефіцієнт детермінації R^2	Регресійне рівняння
1-0,25	пісок крупний і середній	0,93	15,0	0,87	$y = 0,95x - 1,66$
0,25-0,05	пісок дрібний	0,93	14,95	0,87	$y = 1,26x - 9,12$
0,05-0,01	пил крупний	0,94	15,26	0,88	$y = 1,40x - 8,04$
0,01-0,005	пил середній	0,74	6,25	0,54	$y = 1,40x - 1,89$
0,005-0,001	пил дрібний	0,85	9,39	0,73	$y = 0,82x - 3,29$
<0,001	мул	0,89	10,92	0,79	$y = 1,13x + 1,23$
<0,01	фізична глина	0,98	25,85	0,95	$y = 1,11x - 5,68$

Примітка: x – вміст фракції за методом лазерної дифракції; y – вміст фракції за ДСТУ

Отже, вміст фракцій, визначених за ДСТУ 4730:2007 та методом лазерної дифракції темно-сірого опідзоленого, сірого лісового та ясно-сірого лісового ґрунтів зволоженої, підвищено зволоженої та добре й достатньо зволоженої підзон Лісостепу має високу збіжність при застосуванні регресійних рівнянь.

4. Висновки

1. Проведене дослідження показує що для вимірювання гранулометричного складу ґрунту на лазерному аналізаторі часточок підготовка проб перед аналізуванням може бути з застосуванням тих самих реагентів що і за ДСТУ 4730:2007, але дещо удосконалена, що полягає у створенні однорідної пасти після видалення карбонатів та взяття підпроби для подальшої дезагрегації шляхом кип'ятіння у розчині з гідроксидом натрію. Це дозволяє порівнювати результати вимірювань, адже теоретично розміри часточок повинні дезагрегуватися однаково.

2. Важливо підібрати оптимальні налаштування приладу для ґрунтових проб, особливо індекс рефракції. Дослідження показало, що індекс рефракції для певного ґрунту, для вимірювання на лазерному аналізаторі часточок, визначають шляхом порівняння даних, отриманих методом лазерної дифракції при різних індексах рефракції та даних стандартизованого методу за найменшою сумарною різницею. Для ґрунтів Лісостепової зони він є не однаковим: 1,39 для чорнозему типового та чорнозему опідзоленого Лісостепової помірно зволоженої підзони та Степової північної недостатньо зволоженої; 1,40 — для чорнозему опідзоленого, темно-сірого опідзоленого, сірого та ясно-сірого лісових ґрунтів Лісостепової зволоженої, підвищено зволоженої, добре і достатньо зволоженої та сильно зволоженої підзон. Отже для ґрунтів Лісостепової зони що межують зі Степовою зоною індекс рефракції 1,39 (ґрунти Лісостепової помірно зволоженої підзони), це пов'язано, на наш погляд, з більшим впливом степових ґрунтоутворювальних факторів, ніж в інших підзонах Лісостепової зони, для яких застосовують індекс рефракції 1,40.

3. Аналіз по фракціях проб ґрунтів, яким притаманний однаковий індекс рефракції показав, що не кожна фракція має лінійний зв'язок, тобто не для кожної фракції можливо побудувати надійну регресійну модель у вигляді рівняння, що пов'язує вміст кожної з фракцій, визначений за методом лазерної дифракції, з

умістом за методом ДСТУ 4730:2007, але для більшості фракцій маємо хорошу та високу якість регресійних моделей. Для фракції фізичної глини коефіцієнт детермінації є більшим за 0,84 і це важливо для діагностування ґрунтів, наприклад, за коефіцієнтом профільного накопичення гумусу (КПНГ) та коефіцієнтом відносної акумуляції гумусу (КВАГ).

Отже метод лазерної дифракції можливо застосовувати як альтернативний метод визначення гранулометричного складу ґрунту.

Підтвердження. Публікація містить результати досліджень, проведених у рамках ПНД НААН 1 «Рациональне використання і стале управління ґрунтовими ресурсами, збереження родючості та здоров'я ґрунтів, захист їх від деградації («ґрунтові ресурси України: інформаційне забезпечення, рациональне використання, менеджмент, технології») на 2021-2023 роки за завданням 01.01.01.06.П. «Використання методу лазерної дифракції для визначення гранулометричного складу ґрунтів різних типів ґрунтоутворення» (№ 0121U108736).

Список використаних джерел

1. Particle Size Distribution of Various Soil Materials Measured by Laser Diffraction – The Problem of Reproducibility / Polakowski C. et al. *Minerals*. 2021. V.11(5), P. 465. URL: <https://doi.org/10.3390/min11050465>
2. Laser diffraction as an innovative alternative to standard pipette method for determination of soil texture classes in central Europe / Igaz D. et al. *Water*. 2020. V. 12, 1232; <https://doi.org/10.3390/w12051232>
3. Kasmerchaka C. S., Masonb J. A., Liangb M. Laser diffraction analysis of aggregate stability and disintegration in forest and grassland soils of northern Minnesota, USA. *Geoderma*, 2019. V. 338. P. 430–444. <http://dx.doi.org/10.3390/app11104427>
4. Adequacy of laser diffraction for soil particle size analysis. Fisher P., Aumann, C., Chia, K., [et al.]. *PLoS ONE*. May 4 2017. 12(5): e0176510. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176510>
5. Evaluation of soil texture determination using soil fraction data resulting from laser diffraction method. / Mako A. Szabó, B., Rajkai, K. [et al.]. *International Agrophysics*. 2019. V.33(4). P. 445–454 URL : <https://doi.org/10.31545/intagr/113347>
6. Laser Diffractometry in the Measurements of Soil and Sediment Particle Size Distribution / Bieganski A. et al. *Advances in Agronomy*. 2018. V. 151 ISSN 0065-2113. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.04.003>
7. Is the laser diffraction method reliable for soil particle size distribution analysis? / Yang Y., Wang, L., Wendroth, O. [et al.]. *Soil Science Society of America Journal*. March 2019. 83(2). P. 276–287. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2018.07.0252>
8. Refractive index. *Britannica*. URL: <https://www.britannica.com/science/optics>
9. Чепур С. С. Біометрія : метод. посіб. Ужгород: Видавництво УжНУ «Говерла», 2015. 40 с. <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/3184>
10. Гороховський Є. Ю. Біометрія : метод. вказівки до лабораторних занять для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра напряму підготовки «Біологія». Запоріжжя : ЗНУ, 2018. 67 с.
11. Таблиці функцій та критичних точок розподілів. Розділи: Теорія ймовірностей. Математична статистика. Математичні моделі в психології. / укладач М. М Горнескуль. Харків: УЦЗУ, 2009. 90 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/1530>
12. Горват А. А., Молнар О. О., Мінкович В. В. Методи обробки експериментальних даних з використанням MSExcel: Навчальний посібник. Ужгород: Вид-во УжНУ "Говерла", 2019. 182 с.

UDC 631.435

Importance of choosing the refractive index for determining soil granulometric composition by laser diffraction

M. O. Solokha^a, N. V. Vynokurova^b ✉

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

✉ mega_nadi1980@ukr.net

Received 21.01.2025; Revised 05.06.2025; Accepted 17.06.2025; Available online 27.12.2025

Abstract

The laser diffraction method is becoming increasingly widespread in the world due to its speed of execution, versatility and reproducibility of results. That is, it is a modern alternative to the classical sedimentation method, but less expensive and more accurate, which makes it very relevant in determining the nature of land damage as a result of military operations. But it requires verification by comparison with standard methods used in Ukraine. The article highlights the results of improving some aspects of the procedure for determining the granulometric composition of soil by the method of laser diffraction of samples using the Mastersizer 3000E laser particle analyzer from Malvern Instruments with a Hydro EV liquid dispersion module. The method of preparing a soil sample for analysis has been improved, the procedure for setting the optical parameter - the refractive index - has been developed, the obtained data have been compared with the results of analysis using the standardized method (DSTU 4730:2007) and statistical analysis of the compared data has been performed. The study was conducted on soil samples of the Forest-Steppe zone of Ukraine and chernozem of the typical Steppe northern under-moistened subzone, which were collected during 2021–2023. Based on the results of the study, an improved method of preparing soil samples for measurement on a laser particle analyzer was proposed, which

consists in creating a homogeneous paste after removing carbonates and taking a subsample for further disaggregation by boiling in a sodium hydroxide solution. A method was developed to determine the refractive index for a specific soil by comparing data obtained by the laser diffraction method for different refractive index parameters with data from a standardized method. The optimality criterion is the smallest sum of differences across all fractions. For soils of the Forest-Steppe zone, the refractive index is not the same: 1.39 for typical chernozem and podzolized chernozem of the Forest-Steppe moderately humid subzone and 1.40 for podzolized, dark-gray podzolized, gray forest and light-gray forest chernozem of other subzones of the Forest-Steppe. Analysis of soil sample fractions with the same refractive index showed that not every fraction has a linear relationship, that is, it is not possible to build a reliable regression model in the form of an equation for each fraction, which connects the content of each fraction isolated by the laser diffraction method with the content of each fraction by the DSTU 4730:2007 method. Nevertheless, for most fractions we have good and high quality regression models. Therefore, the laser diffraction method can be used as an alternative method for determining the grain size distribution of the soil.

Keywords: soil; particle size distribution; laser diffraction; sedimentation; sample preparation.

Citing: Solokha M. O., & Vynokurova N. V. (2025). Importance of choosing the refractive index for determining soil granulometric composition by laser diffraction. *AgroChemistry and Soil Science*, 98, 55-68. doi: 10.31073/acss98-04 [in Ukrainian].

References

1. Polakowski, C., Ryżak, M., Sochan, A., Beczek, M., Mazur, R., & Bieganski, A. (2021). Particle Size Distribution of Various Soil Materials Measured by Laser Diffraction—The Problem of Reproducibility. *Minerals*, 11(5), 465. <https://doi.org/10.3390/min11050465>
2. Igaz D., Aydin E., Šinkovičová M., Šimanský V., Tall A., & Horák J. (2020). Laser diffraction as an innovative alternative to standard pipette method for determination of soil texture classes in central Europe. *Water*, 12(5), 1232. <https://doi.org/10.3390/w12051232>
3. Kasmerchak, C. S., Masonb, J. A., & Liangb, M. (2019). Laser diffraction analysis of aggregate stability and disintegration in forest and grassland soils of northern Minnesota, USA. *Geoderma*, 338, 430–444. <http://dx.doi.org/10.3390/app11104427>
4. Fisher, P., Aumann, C., Chia, K., O'Halloran, N., & Chandra, S. (2017). Adequacy of laser diffraction for soil particle size analysis. *PLoS ONE*, 12(5), e0176510. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176510>
5. Makó, A., Szabó, B., Rajkai, K., Szabó, J., Bakacsi, Z., Labancz, ... Barna, G. (2019). Evaluation of soil texture determination using soil fraction data resulting from laser diffraction method. *Int. Agrophys*, 33(4), 445–454. <https://doi.org/10.31545/intagr/113347>
6. Bieganski, A., Ryżak, M., Sochan, A., Barna, G., Hernádi, H., Beczek, M., ... Makó, A. (2018). Laser diffractometry in the measurements of soil and sediment particle size distribution. *Adv. Agron*, 151, 215–279. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.04.003>
7. Yang, Y., Wang, L., Wendroth, O., Liu, B., Cheng, C., Huang, T., & Shi, Y. (2019). Is the laser diffraction method reliable for soil particle size distribution analysis? *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 83(2), 276–287. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.07.0252>
8. Refractive index. Britannica. URL: <https://www.britannica.com/science/optics>
9. Chepur, S. S. (2015). Biometrics: Methodological manual. Uzhgorod: Publishing house of UzhNU "Goverla". <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/3184> [In Ukrainian].
10. Horokhovskiy, E. Yu. (2018). Biometrics. Zaporizhzhia: ZNU [In Ukrainian.]
11. Gorneskul M. M. (Compil.) (2009). Tables of functions and critical points of distributions. Sections: Probability theory. Mathematical statistics. *Mathematical models in psychology*. Kharkiv. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/1530> [In Ukrainian.]
12. Horvat, A. A., Molnar, O. O., & Minkovych, V. V. (2019). Methods of processing experimental data using MSExcel: Textbook. Uzhhorod: Publishing House of UzhNU "Goverla" [In Ukrainian.]

УДК 631.416.1:631.416.2:631.416.4

Рівень трофності орних ґрунтів України та перспективні напрями оптимізації живлення сільськогосподарських культур у сучасних умовах (експертний аналіз)

А. О. Христенко^a ✉, М. В. Лісовий^b, О. П. Волощенко^c,

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

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 06.05.2025 Отримано після доопрацювання 15.06.2025 Затверджено до видання 17.06.2025 Доступно онлайн 07.07.2025	Узагальнено результати експертного оцінювання забезпеченості основних орних ґрунтів України азотом, фосфором і калієм і перспективних шляхів оптимізації живлення сільськогосподарських культур. До аналізування залучено вибірки з бази даних агрохімічних властивостей ґрунтів України, створеної на основі фондових матеріалів відділу агрохімії ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського» та опубліковані дані результатів обстеження ДУ «Інститут охорони ґрунтів України». На основі виявлених закономірностей стану та динаміки фосфатних і калійних систем ґрунтів, шляхом статистично-математичного аналізування наборів даних теоретично обґрунтовано можливість математичної формалізації оцінки трофічного стану орних ґрунтів в умовах їх екстенсивного, інтенсивного та пост інтенсивного використання. Розроблено математичні моделі для екстраполяції та інтерполяції даних про вміст рухомих сполук азоту, фосфору і калію в орних ґрунтах залежно від природних або антропогенних чинників. Доведено, що традиційні уявлення щодо родючості орних ґрунтів на лесових породах, особливо чорноземів, внаслідок низки об'єктивних та суб'єктивних факторів, загалом, є штучно завищеними. Названо основні причини цього феномену. Згідно з розробленим прогнозом у 2025 році середньозважений вміст сполук фосфору (P_2O_5) в орних ґрунтах України становитиме 65–70, а калію (K_2O) – 70–72 мг/кг ґрунту. Тобто, рівень трофності орних ґрунтів буде залишатися на межі низьких і середніх значень забезпеченості цими елементами потреб рослин. Доведено, що фосфатна та калійна системи ґрунтів, як термодинамічні системи, характеризуються високою стабільністю значень. Здійснити реальне підвищення рівня трофності орних ґрунтів можна тільки за рахунок систематичного додаткового внесення ззовні сполук, що містять фосфор і калій, причому в досить активній формі. Самочинне підвищення або, навпаки, зниження природного фосфатного, або калійного рівнів орних ґрунтів неможливо; терміни «рухомий» стосовно фосфору або калію є абстрактними, зумовленими аналітичними лабораторними методами, а не потребами рослин. Обґрунтовано доцільність спрямування зусиль на розробку нових та удосконалення наявних агротехнічних і біотехнологічних підходів до підвищення біодоступності поживних речовин як із ґрунтового резерву, так і з добрив.

✉ khristenko53@gmail.com

ORCID: ^a20000-0003-4389-9274, ^b0000-0002-9394-2974, ^c30000-0001-9521-4607

Форма цитування: Христенко А. О., Лісовий М. В., Волощенко О. П. Рівень трофності орних ґрунтів України та перспективні напрями оптимізації живлення сільськогосподарських культур у сучасних умовах (експертний аналіз). *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ «ІГА ім. О. Н. Соколовського». Харків, 2025. Вип. 98. С. 69–83.
doi: 10.31073/acss98-05

1. Вступ

Одними з найнегативніших наслідків війни в Україні, які впливають на землеробство, є істотне скорочення виробництва власних добрив (внаслідок руйнування підприємств та припинення, або скорочення постачання імпортової сировини), а також порушення логістики постачання імпортованих добрив, що, безсумнівно, веде до їх дефіциту та суттєвого подорожчання. Вплив цього чинника на зниження продуктивності ґрунтів та сільського господарства країни загалом сильно недооцінений, що є наслідком низки причин. Перш ніж перейти до суті проблеми слід зазначити, що цю тему автори вважають актуальною, складною і багатогранною, а тому, щоб вкластися в необхідний формат, основні позиції викладено в тезовій формі. Детальний опис і обґрунтування найважливіших концептуальних положень представлено у низці попередніх публікацій авторів, посилання на які буде дано в тексті статті, зокрема у двох

монографія^{1,2}.

У попередніх роботах авторів було здійснено аналітичний огляд сучасних теоретичних підходів до процедури оцінювання забезпеченості ґрунтів макроелементами живлення рослин. У результаті з'ясовано, що сучасні уявлення про родючість ґрунтів базуються на двох концептуально суперечливих підходах до розуміння сутності накопичення і трансформації в них поживних речовин.

Один із підходів розглядає ґрунт як відкриту термодинамічну систему, здатну до саморегуляції та самоорганізації, зі стабільними, у певних межах, параметрами [1, 2]. Інший — трактує ґрунт як своєрідну ємність із розчином, концентрація якого може швидко та істотно змінюватися під впливом практично будь-якого фактора: діяльності рослин і мікроорганізмів, погодних умов, способів обробітку ґрунту, коливань рН ґрунтового розчину, меліораційних заходів, внесення поверхнево-активних речовин, гербіцидів тощо. Ця концепція передбачає вірогідність значної сезонної або багаторічної динаміки вмісту рухомих форм поживних елементів у ґрунтах, що використовуються в екстенсивному землеробстві [3].

Домінуюча концепція постійного «виснаження» і «незворотної деградації» екстенсивно використовуваних ґрунтів мирно співіснує з уявленнями про можливість мимовільного підвищення вмісту елементів живлення рослин у ґрунтах навіть в умовах від'ємного балансу поживних речовин. Тобто досі не лише недостатньо чітко визначено закономірності змін родючості/трофності ґрунтів, але предметом дискусії є навіть спрямованість цих змін¹. На уявленні про існування природної (генетичної) просторової неоднорідності орних ґрунтів щодо вмісту елементів живлення рослин побудовано концепцію «точного землеробства» (*precise agriculture*), проблеми ефективності якого також показано³.

Метою статті є висвітлення експертної оцінки азотного, фосфатного та калійного станів основних орних ґрунтів України з урахуванням ефективності застосовуваних на практиці аналітичних лабораторних методів визначення насиченості ґрунтів і забезпеченості сільськогосподарських культур поживними речовинами.

За статистично обробленими результатами власних досліджень і фондових матеріалів відділу агрохімії ННЦ ІГА (за останні 50 років), накопичених у базі даних агрохімічних властивостей ґрунтів та деяких опублікованих матеріалів великомасштабного агрохімічного обстеження ДУ «Інститут охорони ґрунтів України» узагальнено принципи застосування стандартизованих лабораторних методів для експертного оцінювання сучасного рівня трофності ґрунтів і перспектив удобрення/живлення сільськогосподарських культур в Україні.

2. Використані матеріали та методи

Для реалізації поставленої мети використано такі матеріали: вибірки з бази даних агрохімічних властивостей ґрунтів України яка включає: дані з фондових матеріалів відділу агрохімії ННЦ "ІГА імені О. Н. Соколовського" за останні 50 років (зокрема результати аналізування близько 2000 зразків різних ґрунтів) і літературні дані, що характеризують агрохімічні елементи родючості основних типів ґрунтів України.

¹ Христенко А. А. Теоретические и практические аспекты оценки состояния и динамики азотных, фосфатных и калийных систем: ФЛП Бровин А.В., 2019. 180 с.

² Христенко А. А. Калийное состояние почв и эффективность удобрений. Харьков: ФЛП Бровин А. В., 2017. 120 с.

³ Христенко А. О. Проблеми ефективності точного землеробства. *Вісник аграрної науки*. 2009. № 6. С.18-21.

Використано також опубліковані дані ДУ «Інститут охорони ґрунтів України» і матеріали польового багаторічного стаціонарного дослідження, закладеного у 1969–1970 рр. на чорноземі типовому важкосуглинковому, після розорювання 40-річного перелугу (ДП «ДГ «Граківське» ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського», Харківський район Харківської області).

Масив даних для статистичної обробки (регресійний чи кореляційний аналізи) в окремих випадках становив 200–450 записів, але, як правило, вибірка не перевищувала 50–150 записів.

3. Результати аналізу та їх обговорення

3.1. Причини недооцінювання важливості удобрення

Однією з основних причин недооцінювання значущості фактору удобрення є традиційні штучно гіперболізовані уявлення про високу родючість ґрунтів України. Загальноприйняте твердження, що «українські чорноземи — найродючіші ґрунти світу» спростовано і названо міфом багатьма сучасними вченими вже у минулому столітті. Чорноземи — родючі ґрунти, це так. Але, по-перше, саме явище утворення чорнозему, як природно-історичного тіла, багато в чому зумовлене специфічними кліматичними факторами (певним, а часом і дуже істотним, дефіцитом вологи). По суті, практично вся зона Степу України, починаючи з чорноземів звичайних ($ГТК_{V-IX}$ 0,7–0,8), є зоною ризикованого землеробства, де вирощування високих і стабільних урожаїв можливе лише за зрошення (винятком є озимі культури) [4]. По-друге, за природним вмістом доступних рослинам поживних речовин чорноземи характеризуються низькими значеннями та нічим не відрізняються від решти ґрунтів. Про це свідчать дані, здобуті з використанням міжнародних або національних стандартних методів визначення вмісту поживних речовин в орному шарі ґрунтів України (Табл. 1).

Таблиця 1

Природний вміст доступних рослинам сполук поживних речовин в орному шарі основних ґрунтів України (фрагмент вибірки з бази даних відділу агрохімії ННЦ ІГА)

Ґрунт	Вміст сполук поживних речовин, мг/кг, за методами				
	ДСТУ 4729	ГОСТ 26204 (Чирикова)		ДСТУ ISO 11263 (Olsen)	ДСТУ 7603 (Дашевського)
	N_{NO_3}	P_2O_5	K_2O	P_2O_5	K_2O
Дерново-підзолистий	8,5	18	18	20	6,2
Сірий лісовий	4,8	35	47	18	4,9
Чорнозем опідзолений	12,0	45	60	19	5,9
Лучно-чорноземний	-	320	69	22	6,2
Чорнозем типовий легкосуглинковий	15,6	96	94	16	9,2
Чорнозем типовий важкосуглинковий	4,5	260	80	18	6,2
Чорнозем звичайний	18,2	132	135	14	8,2
Чорнозем південний	6,4	98	190	15	5,6
Темно-каштановий	8,2	85	175	12	6,8

Використання міждержавного стандарту (ГОСТ 26204 — метод Чирикова) створює ілюзію коливання природного вмісту сполук фосфору та калію в орних ґрунтах України від дуже низьких до дуже високих значень.

Помилкові уявлення про високу забезпеченість чорноземів поживними речовинами зумовлені тривалим використанням в Україні застарілих стандартів СРСР, а саме так званих, «жорстких» кислотних методів. ГОСТ 26204 був чинним нормативним документом аж до 2002 р., а ГОСТ 26205 — метод Кірсанова — до 2005 р. Проблема в тому, що чорноземні ґрунти на лесових породах містять високу кількість термодинамічно стійких сполук фосфору або калію (у вигляді апатитів, шпатів польових і т. ін.). Фосфор або калій, що містять ці мінерали, рослинам безпосередньо не доступні, але можуть частково екстрагуватися розчинами сильних кислот у процесі хімічного аналізу ґрунтів.

Давно відомо, що існує пряма залежність між економічною окупністю зрошення ґрунтів зони Степу та кількістю застосовуваних добрив: хоч би як не удосконалювалася агротехніка на поливних землях, без добрив високі врожаї не досягаються, більше того — спостерігається їх поступове падіння [5].

Іншою причиною недооцінювання ролі удобрення — це недосконалість теоретичних та методичних аспектів ґрунтової діагностики живлення рослин, що веде до спотворення (частіше — до завищення) оцінки рівня родючості/трофності ґрунтів не тільки на окремих полях, але, нерідко, і типів ґрунтів загалом.

Проблема полягає у тому, що у разі застосування «жорстких» методів (кислотних, а іноді й лужних) похибка результатів аналізу вмісту поживних речовин у ґрунті може досягати 100–300 % і більше. Один із авторів цієї роботи понад 45 років працює над вирішенням проблеми вдосконалення ґрунтової діагностики і є науковим керівником 13 затверджених державних стандартів (ДСТУ) на методи визначення вмісту азоту, фосфору та калію у відкритому ґрунті. Тому обрання правильного аналітичного методу вважаємо принципово важливим аспектом визначення рівня трофності ґрунту.

Власне кажучи, підвищення точності діагностики трофності ґрунтів є загальносвітовою проблемою. Так, наприклад, порівняння між собою найбільш поширених у різних країнах методів (Mehlich-1, Mehlich-3, Bray, Olsen, Kelowna, Kurtz, Colwell, іонообмінні смоли та ін.), показує, що отримані різними методами значення забезпеченості ґрунтів елементами живлення часто не збігаються [6–9].

Використання нормативних документів України (ДСТУ), які встановлюють методи визначання рухомих сполук фосфору і калію в ґрунтах, дозволило дещо підвищити точність діагностики. Проте, на жаль, проблему не можна вважати вирішеною. Більшість нормативних документів розроблено 20–25 років тому і багато в чому вони вже застаріли. Аналіз практичного використання чинних нормативних документів показав, що навіть і наявності у ДСТУ поправкових коефіцієнтів (для урахування впливу складу і властивостей ґрунтів на результати аналізу), зовсім недостатньо. Цими поправками фахівці деяких лабораторій просто не користуються. І відбувається це або через відсутність потрібних даних для розрахунків, наприклад, про вміст фізичної глини в конкретному ґрунті чи значення рН ґрунтового розчину, або внаслідок трудомісткості та нерозуміння необхідності корегування результатів лабораторного аналізу ґрунту.

Помилкова думка про високу забезпеченість ґрунтів України елементами живлення пов'язана зі ще одним фактором — згідно з сучасними даними ДУ «Інститут охорони ґрунтів України», насиченість ґрунтів фосфором і калієм досить висока. Середньозважені значення відповідають підвищеній забезпеченості ґрунтів фосфором і високій забезпеченості калієм (Табл. 2).

Разом з тим, згідно з даними ДУ «Інститут охорони ґрунтів України», баланс фосфору та калію упродовж останніх десятиліть був від'ємним, тобто, витрати поживних речовин не компенсувалися внесенням їх з добривами.

Таблиця 2

Середньозважений вміст фосфору і калію в ґрунтах України (розраховано за даними ДУ «Інститут охорони ґрунтів України» [10, 11])

Період	Площа обстеження, млн га	Внесено з мінеральними (м) і органічними (о) добривами, кг/га		Вміст, мг/кг ґрунту (у перерахунку на метод Чирикова)	
		P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O
1966–1970	30,9	24 (14м+10о)	36 (12м+24о)	71	98
1986–1990	29,4	63 (41м+22о)	94 (42м+52о)	106	113
2006–2010	24,8	11	10	100	112
2011–2015	19,05	12	11	110	120
2016–2020	8,58	20	17	117	122

Так, наприклад, у 2016–2020 рр. баланс становив -17 кг/га для фосфору і -38 кг/га для калію [11].

Але ж добре відомо, що за від'ємного балансу ґрунт виснажується, втрачає рухомі поживні речовини, що знижує його ефективну родючість і врожайність сільськогосподарських культур [12].

Причиною завищення уявлень про стан трофності ґрунтів у такому випадку є некоректне узагальнення даних у межах адміністративних територій без урахування зміни площі реально обстежених земель. Як видно з даних таблиці 2, якщо в 1966–1970 рр. площа обстеженої ріллі становила 30,9 млн га, то в 2011–2015 рр. — всього 19,05 млн га. З обігу та обстеження, в першу чергу, були виведені найменш родючі ґрунти, зокрема легкого гранулометричного складу. Ігнорування цього факту, в узагальненні одержаних даних, автоматично призводить до штучного завищення статистичних показників ⁴.

У цьому контексті висувати претензії до регіональних агрохімічних служб було б некоректно, оскільки їхня діяльність базується на чинних нормативних актах, а також забезпечує регулярне надходження цінної інформації про стан і динаміку родючості ґрунтів. Наявність зазначених проблем підкреслює потребу в більш тісній співпраці ДУ «Інститут охорони ґрунтів України» з іншими науковими установами, передусім із ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського».

Щоб переконатися у неможливості самочинного зростання рівня трофності орних ґрунтів ми спробували провести елементарний економічний розрахунок.

В основу розрахунку покладено матеріали агрохімічної служби країни за результатами І-V турів обстеження (1966–1990 рр.) [10], оскільки це був найбільш тривалий період постійного зростання норм внесення добрив. Розрахунки показали, що відповідно до опублікованих даних для підвищення вмісту фосфору (P₂O₅) від природного рівня (наприклад, 50 мг/кг ґрунту за Чириковим) до оптимального — 150 мг/кг ґрунту всього лише на 100 га необхідно витратити 105 000 \$ США (Табл. 3). І це без витрат на доставку, розвантаження, зберігання, навантаження та внесення добрив. З калієм ситуація ще гірша. Розрахунки проводили виходячи із вартості 1 т фізичної маси нітроамофоски виробництва Суміхімпром — 25 700 грн (літо 2024 р.).

Зрозуміло, що на практиці, за використання нітроамофоски витрати на 100 га обмежаться сумою 370 000 \$ США, оскільки витрати на підвищення вмісту фосфору увійдуть у цю суму.

⁴ Христенко А. О. Експертна оцінка забезпеченості орних земель України макроелементами живлення рослин. *Вісник аграрної науки*. 2016. №. 1. С. 18-22. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201601-03>

Проте отримані цифри змушують замислитись і зробити такі висновки. Перший: якщо б існував природний фактор, здатний підвищувати рівень трофності ґрунтів хоча б у половину ефективності фосфорних або калійних добрив, то світ не витрачав би сотні мільярдів доларів на виробництво та застосування мінеральних добрив.

Таблиця 3

Витрати добрив і коштів для досягнення оптимального рівня забезпеченості рослин фосфором і калієм на одному гектарі (розрахунок авторів за даними [10])

Добрива	Сумарна норма внесених добрив, кг/га (фізична маса)	Підвищення вмісту P_2O_5 або K_2O по Україні в цілому, мг/кг ґрунту	Витрати для підвищення вмісту на 100 мг/кг на 1-му га	
			добрив, кг (фізична маса)	коштів, \$ США
Фосфорні (P_2O_5)	1 125	35	3 210	1 050
Калійні (K_2O)	1 759	15	11 730	3 700

Другий висновок: в існуючих соціально-економічних умовах всі зусилля слід спрямовувати не на підвищення вмісту у ґрунтах P_2O_5 та K_2O , а на отримання максимальної економічної віддачі від застосування добрив.

3.2. Сучасний рівень трофності орних ґрунтів України

Яким же є реальний сучасний стан орних ґрунтів України стосовно вмісту потрібних рослинам поживних речовин? Перш, ніж відповідати на це питання необхідно відзначити що, відповідно до принципів хімічної термодинаміки (другий закон), фосфатна та калійна системи ґрунтів, як відкриті термодинамічні системи, повинні прийти до, так званого, рівня динамічної рівноваги, тобто, такого рівня, який є найбільш імовірним в умовах поверхні Землі. Величина цього рівня зумовлена фізичними і хімічними умовами, характерними для поверхні планети. Природний вміст рухомих сполук як фосфору, так і калію в орних ґрунтах, знаходиться на межі низьких та середніх значень стосовно потреб сільськогосподарських рослин, і є, по суті, константою. Вперше ця гіпотеза щодо фосфору була висловлена одним із авторів статті ще в 1993 році⁵.

Так, наприклад, в умовах стаціонарного польового досліді відділу агрохімії ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського» на чорноземі типовому важкосуглинковому вміст рухомих сполук фосфору та калію (за методом Чирикова) у ґрунті на контрольних (неудобрюваних) варіантах з 1968 р. до теперішнього часу не змінився (P_2O_5 – 45, K_2O – 60 мг/кг) і утримується на межі низької та середньої забезпеченості рослин цими елементами живлення. При цьому сезонна та річна динаміка вмісту фосфору та калію в ґрунті завжди знаходилася в межах похибки визначення.

Без додаткового надходження в геоекосистему енергії, що міститься у добривах, величина природного фосфатного/калійного рівня орних ґрунтів змінитися не може, оскільки фосфатна та калійна системи ґрунтів вже перебувають у найбільш імовірному стані динамічної рівноваги: десятки тонн фосфору і сотні тонн калію в кореневмісному шарі ґрунтів, завжди будуть підтримувати саме такий рівень.

⁵ Христенко А. А. Уровень равновесного состояния фосфатных систем почв Украины. *Агрохимия*. 1993. №3. С.18-24.

Встановлені закономірності пояснюють добре відомі емпіричні дані про високу ефективність макро добрив на неокультурених орних ґрунтах всіх типів, зокрема й на чорноземах (крім ґрунтів, що потребують меліорації)⁶.

Вивчення закономірностей стану та динаміки фосфатних і калійних систем ґрунтів, на підставі як матеріалів агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення, так і даних ряду польових дослідів, дозволило теоретично обґрунтувати можливість математичної формалізації оцінки рівня трофності орних ґрунтів в умовах їх екстенсивного, інтенсивного та постінтенсивного використання і розробити математичні моделі для екстраполяції та інтерполяції даних про вміст рухомих сполук азоту, фосфору і калію в орних ґрунтах залежно від природних або антропогенних чинників [13].

Так, наприклад, середньозважений вміст P_2O_5 в орних ґрунтах України у будь-який період характеризується рівнянням регресії:

$$P_ч = 6,61 + 0,0198H + 0,0173T - 0,0008H^2 + 0,0039HT - 0,0006T^2 \quad (1)$$

де $P_ч$ — середньозважений вміст P_2O_5 , мг/100 г (за Чириковим); H — норма внесення добрив (P_2O_5), кг/га; T — термін систематичного застосування фосфорних добрив (кількість років). З використанням рівняння регресії (1) розраховано нормативи можливого накопичення (вмісту) рухомого фосфору в ґрунтах України⁷ залежно від норми добрив і тривалості їх внесення (Табл. 4).

Таблиця 4

Нормативи (прогноз) накопичення рухомого фосфору в орному шарі ґрунтів України залежно від норм добрив і тривалості їх внесення⁷

Норма P_2O_5 , кг/га	Середньозважений вміст P_2O_5 , мг/кг за тривалості внесення, років			
	10	15	20	25
10	72	74	76	78
30	75	84	89	95
50	77	87	96	105

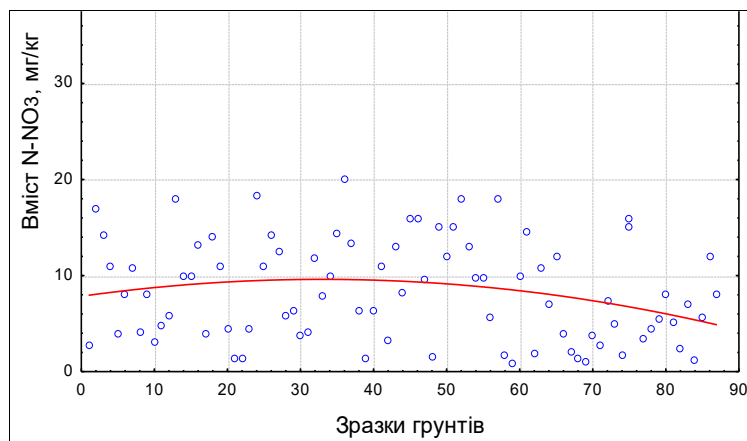
Згідно з розробленим прогнозом у 2025 р. середньозважений вміст фосфору (P_2O_5) в орних ґрунтах України становитиме 65–70, а середньозважений вміст калію (K_2O) – 70–72 мг/кг ґрунту, тобто, буде залишатися на межі низьких і середніх значень забезпеченості сільськогосподарських рослин цими елементами живлення. При цьому, середньозважений вміст залишкових сполук фосфорних і калійних добрив становить: P_2O_5 — не більше 15–20; K_2O — 10–12 мг/кг ґрунту. Для порівняння — оптимальна кількість залишкових сполук поживних речовин становить (залежно від культури) P_2O_5 — 80–120, K_2O — 60–100 мг/кг ґрунту.

Низький рівень трофності ґрунтів, навіть за використання сучасних техніки, сортів і агротехнологій, не гарантує стабільності високого врожаю культур, а тим більше його подальшого нарощування. Тому для одержання високих і стабільних урожаїв сільськогосподарських культур на всіх без винятку неокультурених орних ґрунтах України існує необхідність застосування органічних і мінеральних добрив.

Щодо азоту, встановлено, що реальний вміст в орних ґрунтах України, за непаровими попередниками, найбільш доступних рослинам сполук, а саме, мінерального азоту, зазвичай відповідає дуже низьким або низьким значенням забезпеченості азотом (Рис.).

⁶ Христенко А. О. Рухомість "рухомих" елементів живлення рослин у ґрунті. *Вісник аграрної науки*. 2009. № 8. С. 16-20.

⁷ Христенко А. О. Теоретичні проблеми методології балансової оцінки кругообігу макроелементів живлення в системі «добрива-ґрунт-рослина». *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків, 2020. Вип. 90. С. 47-56. <https://doi.org/10.31073/acss90-05>



Пояснення: 1-34 – ґрунти Полісся; 35-67 ґрунти Лісостепу; 68–87 ґрунти Степу

Рис. Вміст нітратного азоту в орному шарі екстенсивно використовуваних ґрунтів України (вибірка з бази даних відділу агрохімії ННЦ ІГА)

І це незважаючи на той факт, що загальний вміст гумусу, при цьому, коливається від 0,7 % у легких дерново-підзолистих ґрунтах Полісся, до 6,8 % у важких лучно-чорноземних ґрунтах Лісостепу.

Причиною низького вмісту азоту є відсутність у більшості орних ґрунтів достатньої кількості органічної речовини, що легко розкладається і мінералізується. Це пов'язано з низьким рівнем використання мінеральних та органічних добрив, неповним загортанням пожнивних решток, а також фактичною відсутністю посівів багаторічних бобових трав.

Вважають, що оптимізація гідротермічних умов, сприяє підвищенню мікробіологічної активності ґрунту, тим самим підвищенню насиченості азотом. Регресійний аналіз багаторічних даних тривалого (50 років) польового дослідження на чорноземі типовому важкосуглинковому [14] показав, що дійсно, існує певна залежність між запасами мінерального (нітратний + амонійний) азоту в ґрунті та кількістю опадів. Ця залежність описується рівнянням регресії:

$$N_{\text{мін.}} = -25,886 + 0,086O_{\text{п}} - 0,00006O_{\text{п}}^2 \quad r = 0,49 \quad (2)$$

де: $N_{\text{мін.}}$ — запас мінерального азоту ($N\text{-NO}_3 + N\text{-NH}_4$) в шарі ґрунту 0-60 см, кг/га; $O_{\text{п}}$ — сумарна річна кількість опадів, мм.

Мінеральний азот (принаймні його нітратна складова), на відміну від поняття «рухомий» фосфор (калій), є сполукою, реально присутньою у ґрунтового розчині. Саме це й зумовлює певну змінність рівня забезпеченості ґрунтів азотом під впливом різноманітних чинників, зокрема відмінностей у ґрунтово-кліматичних умовах. Водночас, за непарових попередників, у більшості випадків ця варіативність обмежується коливаннями в межах однієї-двох градацій — від дуже низького до низького і, подекуди, середнього рівня забезпеченості мінеральним азотом.

Тобто зростання кількості опадів позитивно впливає на азотний режим ґрунту, але цей вплив незначний і не може замінити такий фактор, як внесення азотних добрив. Тому на всіх орних ґрунтах Полісся й Лісостепу ефективність азотних добрив дуже висока, а у зоні Степу, через нестачу вологи, — дещо нижча. Так, наприклад, ефективність азотних добрив, внесених під посіви цукрових буряків, залежно від значень $ГТК_{\text{IV-IX}}$, характеризується рівнянням:

$$O_{\text{к}} = -33,68 + 92,75Г - 20,36Г^2 \quad r = 0,89 \quad (3)$$

де $O_{\text{к}}$ — окупність добрив, кг коренеплодів/кг N; $Г$ — гідротермічний коефіцієнт Селянинова ($ГТК$).

Згідно з одержаною математичною моделлю (3), якщо при значенні $ГТК_{V-IX}$ 1,6 (Тернопільська обл.) окупність 1 кг азоту добрив становить 62,6, то при значенні $ГТК_{V-IX}$ 0,8 (Запорізька обл.), знижується до 27,5 кг коренеплодів цукрових буряків. Істотне реальне підвищення вмісту мінерального азоту у ґрунті спостерігається, як правило, у трьох випадках: після чорного пару, після розорювання пласта багаторічних бобових трав, а також за внесення підвищених норм органічних та мінеральних азотних добрив. Причому, зазвичай, такий вміст азоту утримується впродовж не більше 6–9 місяців.

3.3. Способи підвищення насиченості орних ґрунтів поживними речовинами

Чи існують у нинішніх соціально-економічних умовах інші способи (крім внесення добрив) підвищення вмісту поживних речовин у ґрунті? Нашими дослідженнями не встановлено фактів прямого достовірного впливу (позитивного, або негативного) на рівень фосфатного, або калійного станів орних ґрунтів таких антропогенних чинників як різні способи обробітку ґрунту, меліоративні заходи (зрошення, вапнування, гіпсування) і заорювання культур що вирощуються (у тому числі сидератів).

Так, наприклад, застосування сидеральних культур, безумовно сприяє постійному відновлюванню вмісту ґрунтових органічних речовин, поліпшенню фізико-хімічних властивостей ґрунтів та підвищенню біологічної активності. Але значущість сидератів, як додаткового джерела фосфору і калію, сильно перебільшено. Застосування сидератів призводить лише до переведення фосфору та калію з однієї форми в іншу, а саме: абсолютно доступних мінеральних сполук ґрунту — у тимчасово недоступні органічні сполуки фітомаси рослин. Але це не змінює загальної кількості поживних речовин у ґрунті.

Це стосується і природних факторів, таких як ґрунтово-кліматичні умови, а також склад і властивості ґрунтів: між вмістом гумусу, гранулометричним складом, значеннями рН ґрунтового розчину з одного боку, та природним вмістом рухомих сполук фосфору і калію в орних ґрунтах — з іншого, зв'язок, практично, відсутній: коефіцієнт кореляції (r) завжди знаходився в межах 0,1–0,25 одиниць.

Разом з тим встановлено що існує найтісніший зв'язок між значеннями складу і властивостей орних ґрунтів (перш за все, вмісту апатитоподібних сполук і тонкодисперсних часток, а також рН ґрунтового розчину) та результатами проведення хімічного аналізу ґрунтів. Тобто, між хімічним екстрагентом та пробом ґрунту у процесі аналізування (у певних випадках) відбувається сильна взаємодія, що призводить до штучного завищення або заниження результатів аналізування.

Наприклад, обробка проб дуже кислих ґрунтів розчинами кислот (методи Чирикова і Кірсанова), посилює позитивний заряд колоїдних часточок оксидів заліза (Fe^{+++}) та алюмінію (Al^{+++}) ґрунту. Це призводить до посилення вторинного поглинання аніонів фосфорної кислоти ($H_2PO_4^-$) в момент проведення хімічного аналізу ґрунту, та створення ілюзії «зникнення» фосфору (Табл. 5).

Таблиця 5

Вплив кислотності сірого лісового ґрунту на результат визначення вмісту P_2O_5 різними методами

Варіант досліджу	рН _{ксл}	Вміст P_2O_5 , мг/кг ґрунту та забезпеченість фосфором	
		Метод Кірсанова (рН 1,0) (кислотний метод)	Метод Olsen (рН 8,5) (лужний метод)
Контроль (без вапнування)	3,8	0	19 (середня)
Вапно	4,9	51 (середня)	19 (середня)

Вапнування ґрунтів та усунення надлишкової кислотності впливає лише на результат проведення хімічного аналізу, але не на реальний вміст P_2O_5 у ґрунті, що підтверджують дані лужних методів: Olsen (див. табл. 5) та Мачигіна (ДСТУ 4114), а головне — наявність на сильно кислих ґрунтах достатньо продуктивних лісів та гірських лук (полонин).

Лужні екстрагенти у лужному ґрунтовому розчині втрачають здатність ефективно екстрагувати, що (знову ж таки) створює хибне уявлення про «зникнення» фосфору (Табл. 6). Гіпсування лужних ґрунтів, тобто заміна обмінного натрію кальцієм, та усунення лужності, впливає лише на результат проведення хімічного аналізу проб лужними методами, але не на реальний вміст P_2O_5 у ґрунті, що і підтверджують дані сольового методу (ДСТУ 4727), а також вся практика землеробства півдня України.

Тобто, основна причина появи поширених помилкових уявлень про високу динамічність і строкатість рівня трофічного стану ґрунтів під впливом природних або антропогенних факторів (крім застосування добрив) є саме недосконалість теоретичних та методичних аспектів ґрунтової діагностики.

Встановлені закономірності дозволяють пояснити причини наявного парадоксу: публікацій (монографії, статті, патенти), присвячених способам підвищення вмісту у ґрунті фосфору багато, а матеріалів про успішне практичне використання цих способів немає.

Таблиця 6

Вплив лужності темно-каштанового ґрунту на результат визначення вмісту P_2O_5 різними методами

Варіант	pH _{KCl}	Вміст P_2O_5 , мг/кг ґрунту та забезпеченість фосфором	
		за Мачигінім (pH 9,0) (лужний метод)	за Карпінським-Зам'ятіною (pH 5,8) (сольовий метод)
Контроль	8,2	0,0	0,25 (середня)
Гіпс	6,9	16,0 (середня)	0,25 (середня)

Аналітично визначені дані, які називають як «рухомий», «доступний» або «засвоюваний» фосфор і калій, мають радше умовний, абстрактний характер, на відміну від реальних сполук, дійсно присутніх у ґрунтовому розчині – таких як нітрати, нітрити, карбонати кальцію та інші водорозчинні солі. Абсолютні ж значення абстрактних показників, залежать винятково від методу визначення, або точки відліку (як, наприклад, температура тіла за шкалами Кельвіна, Цельсія або Фаренгейта).

Доброю новиною є те, що теза про незворотну деградацію та постійне виснаження екстенсивно використовуваних ґрунтів (зниження вмісту елементів живлення), є ще одним міфом, заснованим скоріше на вірі, ніж на фактах — відсутні будь-які докази наявності повністю виснажених ґрунтів.

3.4. Перспективні шляхи оптимізації умов живлення рослин

Зі встановлених теоретичних положень випливає важливий практичний висновок: не слід витрачати час та кошти на пошук способів підвищення вмісту у ґрунті рухомих сполук фосфору і калію, тобто того, чого немає. Всі зусилля слід спрямувати на пошук нових, або вдосконалення вже наявних прийомів та способів підвищення доступності рослинам поживних речовин ґрунту та добрив.

Одним з таких прийомів є створення оптимальних умов для зростання сільськогосподарських культур — добре розвинені рослини з потужною кореневою системою здатні краще засвоювати поживні речовини ґрунту та добрив. Оптимізація умов досягається шляхом підвищення культури землеробства, широкого використання прийомів та способів накопичення і збереження ґрунтової вологи, вирощування культур, пріоритетних для ґрунтових і кліматичних характеристик певної зони, застосування сидератів та меліоративних заходів.

Важливою задачею залишається підвищення точності ґрунтової діагностики. Відсутність об'єктивної інформації про стан та динаміку трофічного режиму ґрунтів призводить до вкрай неефективного використання коштовних добрив, ціна на які, до того ж, постійно зростає.

Норми внесення добрив необхідно коригувати залежно від насиченості ґрунтів поживними речовинами. Виняток становлять легкі піщані та супіщані ґрунти Полісся, а також аналогічні ґрунти річкових терас Лісостепу та Степу. Це пов'язано з тим, що, по-перше, ілюзія низького вмісту в цих ґрунтах фосфору і калію (наприклад, менше 40 мг/кг P_2O_5 і менше 60 мг/кг K_2O , за Кірсановим) пов'язана з недотриманням вимог ДСТУ 4405, що вже згадувалося вище.

А по-друге, фактором, що лімітує величину врожаю на цих ґрунтах, особливо у зонах Лісостепу та Степу, є гостра нестача вологи. Застосування високих доз добрив за таких умов є нераціональним і економічно необґрунтованим, оскільки не забезпечує відповідного агрономічного ефекту та призводить до неефективного використання ресурсів.

Найбільш технологічним, а отже, оптимальним способом підвищення точності вимірювань рівня трофності ґрунтів є групування ґрунтів України за насиченістю фосфором і калієм з урахуванням їх гранулометричного складу. У більшості випадків землевласники не мають інформації про вміст гранулометричної фракції $<0,01$ мм (фізичної глини) у ґрунті на конкретному полі, хоча мають досить чітке уявлення про відмінність гранулометричного складу ґрунтів полів (піщані, супіщані, легкосуглинкові тощо).

На жаль в Україні дотепер в основному використовуються давно застарілі шкали (деяким вже понад 100 років), до того ж, розроблені для умов іншої країни, на ґрунтах з іншими властивостями. Так, наприклад, метод Кірсанова (опираючись на таку шкалу) дозволяє об'єктивно оцінити насиченості ґрунтів калієм тільки при вмісті фізичної глини в межах 36–44 %. А середній вміст фізичної глини в орних ґрунтах Полісся, де цей метод в основному і використовується, становить всього 16–18 % (експертна оцінка). Внаслідок цього оцінка рівня трофності лісових ґрунтів Полісся виявляється сильно штучно заниженою.

Отже проблема у відсутності коректного групування ґрунтів за насиченістю елементами живлення, без чого неможливо об'єктивно оцінити реальний стан їхньої трофності. Саме наявність точної шкали є гарантією високої точності будь-яких вимірювань за умови коректного їх проведення і відсутності факторів, які негативно впливають на результат хімічного аналізування ґрунтів.

Відділом агрохімії ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського» розроблені і рекомендовані групування ґрунтів легкого гранулометричного складу за вмістом поживних речовин, визначеним за методом Кірсанова (Табл. 7).

Теоретично, перспективним підходом до підвищення ефективності фосфорного живлення рослин є використання препаратів на основі активних штамів фосформобілізуювальних мікроорганізмів. Однак наразі розраховувати на суттєвий ефект від їх застосування не доводиться.

Таблиця 7

Групування за насиченістю фосфором і калієм ґрунтів, які містять 10-20 % фізичної глини (метод Кірсанова)

Рівень насиченості ґрунту	Вміст, у ґрунті, мг/кг	
	P_2O_5	K_2O
Середній	30-80	40-90
Підвищений	81-130	91-140
Високий	131-180	141-190
Дуже високий	>180	>190

Основна обмежувальна причина аналогічна до ситуації з азотним живленням — недостатній вміст у більшості ґрунтів України легкорозкладної органічної речовини, яка є необхідним субстратом для мікробіологічної активності.

Ще одним перспективним напрямом є вдосконалення способів внесення добрив. Основна причина високої ефективності локального способу внесення добрив — це не стільки триваліше збереження елементів живлення в доступній для рослин формі (як це прийнято вважати), скільки підвищення, так званої, позиційної доступності поживних речовин добрив рослинам. Тому дослідження щодо вдосконалення локального способу внесення добрив слід вести саме в напрямі підвищення їх доступності рослинам, тобто підвищення ймовірності контакту добрива з кореневими системами рослин.

Основним напрямом підвищення доступності сільськогосподарським культурам азоту ґрунту є оптимізація гідротермічних умов і використання прийомів та способів внесення удобрювальних матеріалів, які підвищують вміст в орному шарі ґрунту новоутвореної органічної речовини.

4. Висновки

Ефективність системи удобрення безпосередньо залежить від адекватності методів визначення вмісту поживних речовин у ґрунтах. Недосконалі або неправильно підібрані аналітичні підходи призводять до спотвореної оцінки рівня трофності ґрунтів, що, своєю чергою, формує хибне уявлення громадськості про необхідність внесення добрив. Отже, для обґрунтованого прийняття агрохімічних рішень необхідна переоцінка методологічної бази ґрунтової діагностики з урахуванням специфіки ґрунтових типів та біологічних потреб культур.

Традиційні уявлення щодо родючості орних ґрунтів України на лесових породах, особливо чорноземів, внаслідок низки об'єктивних та суб'єктивних факторів, загалом, є штучно завищеними. Цей феномен ускладнює розробку раціональної стратегії та тактики діяльності з оптимізації живлення сільськогосподарських культур, причому, як на рівні конкретного господарства, так і держави в цілому.

Згідно з розробленим прогнозом у 2025 р. середньозважений вміст фосфору в орних ґрунтах України становитиме 65–70 мг P_2O_5 , а середньозважений вміст калію — 70–72 мг K_2O /кг ґрунту. Тобто, трофічний рівень орних ґрунтів буде залишатися на межі низьких і середніх значень забезпеченості цими елементами живлення.

Тому для вирощування високих і стабільних урожаїв сільськогосподарських культур, на всіх без винятку екстенсивно використовуваних орних ґрунтах України (а такими є переважна більшість), необхідно вносити органічні та мінеральні добрива.

Недоцільно спрямовувати зусилля та фінансові ресурси на спроби підвищити вміст у ґрунті форм поживних речовин, існування яких має умовний характер, слід розуміти, що терміни «рухомий фосфор» або «рухомий калій», є концептуальною абстракцією, а не об'єктивними фізико-хімічними одиницями. Здійснити реальне підвищення рівня трофності орного ґрунту можна тільки шляхом систематичного додаткового внесення ззовні сполук, що містять фосфор і калій, причому в досить активній формі.

Натомість доцільно зосередити науково-практичну увагу на розробці нових та удосконаленні наявних агротехнічних і біотехнологічних підходів, спрямованих на підвищення біодоступності поживних речовин як із ґрунтового резерву, так і з добрив. У цьому контексті окреслено перспективні напрями оптимізації мінерального живлення сільськогосподарських культур.

Список використаних джерел

1. Трофимов С. Я., Седов С. Н. Функционирование почв в биогеоценозах: подходы к описанию и анализу. *Почвоведение*. 1997. № 6. С. 770-778.
2. Kolomiiets S. S., Bilobrova A. S. Soil is a thermodynamic system and substantiation of its homeostasis concept. *SWorldJournal*. 2020. Is. 6(2). P. 122-132. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2020-06-02-036>
3. Христенко А. А. К вопросу о почве как "банке с питательным раствором". *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків: 2005. Вип. 66. С. 85-94.
4. Наукові основи охорони та раціонального використання зрошуваних земель України / за наук. ред. С. А. Балюка, М. І. Ромащенко, В. А. Сташука. Київ: Аграрна наука, 2009. 624 с.
5. *Агрохимическая характеристика почв СССР. Украинская ССР.* / ред. А. В. Соколов, Н. К. Крупский. Москва: Наука, 1973. 344 с.
6. Lins I. D. G., Cox, F. R. Effect of extractant and selected soil properties on predicting the optimum phosphorus fertilizer rate for growing soybeans under field conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 1989. Vol. 20(3-4). P. 319-333. <https://doi.org/10.1080/00103628909368085>
7. Steiner F., Lana M. C., Zoz T., Frandoloso J. F., Fey R. Extraction methods and availability of phosphorus for soybean in soils from Parana State, Brasil. *Semina: Agricultural Sciences*. 2012. Vol. 33(3). P. 1005-1014. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n3p1005>
8. Walton K., Allen D. Mehlich No. 3 soil test — the Western Australian experience. In 'SuperSoil 2004: 3rd Australian New Zealand Soils Conference', 5-9 December 2004, University of Sydney, Australia. (Ed B. Singh).
9. Schick J., Kratz S., Rückamp D., Shwiekh R., Haneklaus S., Schnug E. Comparison and inter-calibration of different soil P tests used in the Baltic Sea countries. Knowledge report. *Baltic Forum for Innovative Technologies for Sustainable Manure Management*, 2013. P. 1-47. URL: https://www.researchgate.net/publication/283076910_Comparison_and_Inter-Calibration_of_Different_Soil_P_Tests_Used_in_the_Baltic_Sea_Countries_Baltic_Manure_Knowledge_Report
10. Довідник з агрохімічного та агроекологічного стану ґрунтів України / за ред. Б. С. Носка, Б. С. Прістера, М. В. Лободи. Київ: Урожай, 1994. 333 с.
11. Наукові дослідження з моніторингу та обстеження сільськогосподарських угідь України за результатами XI туру (2016-2020 рр.). / ДУ «Інститут охорони ґрунтів України». Київ, 2023. 73 с. URL: <https://zemlerobstvo.com/wp-content/uploads/2025/01/naukovi-doslidzhennya-2023.pdf>
12. Заришняк А. С., Балюк С. А., Лісовий М. В., Комариста А. В. Баланс гумусу і поживних речовин у ґрунтах України. *Вісник аграрної науки*. 2012. №1. С. 28-32. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2012_1_5
13. Христенко А. О. Розрахунковий метод визначення рівня забезпеченості рослин макроелементами живлення. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків, 2023. Вип. 94. С. 15-21. <https://doi.org/10.31073/acss94-02>
14. Мірошниченко М. М., Христенко А. О., Гладких Є. Ю. Закономірності 50-річної динаміки рухомих сполук азоту, фосфору і калію у чорноземі типовому за даними стаціонарного польового дослідження. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 8. С. 5-14. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202108-01>

UDC 631.416.1:631.416.2:631.416.4

Trophic level of arable soils of Ukraine and promising directions for optimizing nutrition of agricultural crops in modern conditions (expert analysis)

A. O. Khristenko ✉, M. V. Lisovyi, O. P. Volosheniuk

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

✉ khristenko53@gmail.com

Received 06.05.2025; Revised 15.06.2025; Accepted 17.06.2025; Available online 07.07.2025

Abstract

The results of the expert assessment of the provision of the main arable soils of Ukraine on loess rocks with nitrogen, phosphorus and potassium and promising ways to optimize the nutrition of agricultural crops are summarized. The analysis uses samples from the database of agrochemical properties of soils of Ukraine, created on the basis of the stock materials of the department of agrochemistry of the NSC ISSAR and published data from the results of surveys conducted by the Institute of Soil Protection of Ukraine. Based on the identified patterns of the state and dynamics of phosphate and potassium systems of soils, statistical and mathematical analysis of data sets has theoretically substantiated the possibility of formalizing the assessment of the trophic state of arable soils under conditions of their extensive, intensive and post-intensive use. Mathematical models have been developed for extrapolation and interpolation of data on the content of mobile compounds in arable soils depending on natural or anthropogenic factors. It is suggested that traditional ideas about the fertility of arable soils on forest species, especially chernozems, are artificially inflated as a result of a number of objective and subjective factors. The main reasons for this phenomenon are named. According to the developed forecast, in 2025 the average weighted content of phosphorus compounds (P_2O_5) in arable soils of Ukraine will be 65-70, and potassium (K_2O) – 70-72 mg / kg of soil. That is, the trophic level of arable soils will remain on the verge of low and average values of the provision of these elements for plant needs. It has been proven that the phosphate and potassium systems of soils as thermodynamic systems are characterized by high stability of values. It is possible to achieve a real increase in the trophic level of arable soils only by systematically adding compounds containing phosphorus and potassium in an active form from outside. An involuntary increase or, conversely, a decrease in the natural content of phosphorus or potassium in arable soils is impossible. The term "mobile" in relation to phosphorus or potassium in the soil is abstract, conditioned by analytical laboratory methods, and not by the needs of plants. The expediency of directing efforts to the development of new and improvement of existing agrotechnical and biotechnological methods for increasing the bioavailability of nutrients from both the soil reserve and fertilizers is substantiated.

Keywords: soil fertility; expert analysis; trophicity; mobile compounds; fertilizers; forecast; soil diagnostics.

Citing: Khristenko, A. O., Lisovyi, M. V., & Volosheniuk, O. P. (2025). Trophic level of arable soils of Ukraine and promising directions for optimizing nutrition of agricultural crops in modern conditions (expert analysis). *AgroChemistry and Soil Science*, 98, 69-83. doi:10.31073/acss98-05 [in Ukrainian].

References

1. Trofimov, S., Sedov, S. (1997). Soil functioning in biogeocenoses: approaches to description and analysis. *Pochvovedeniye*, 6, 770-778 [in Russian].
2. Kolomiets, S. S., & Bilobrova, A. S. (2020). Soil is a thermodynamic system and substantiation of its homeostasis concept. *SWorldJournal*, 6(2), 122-132. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2020-06-02-036>
3. Khristenko, A. (2005). On the issue of soil as a "jar with a nutrient solution". *AgroChemistry and Soil Science*, 66, 85-94 [in Russian].
4. Balyuk, S., Romashchenko, M., & Stashuk, V. (Eds.). (2009). *Scientific foundations of protection and rational use of irrigated lands of Ukraine*. Kyiv: Agrarna nauka [In Ukrainian].
5. Sokolov, A. V. & Krupsky, N. K. (Eds.). (1973). *Agrochemical characteristics of soils of the USSR. Ukrainian SSR*. Moscow: Nauka [In Russian].
6. Lins, I. D. G., & Cox, F. R. (1989). Effect of extractant and selected soil properties on predicting the optimum phosphorus fertilizer rate for growing soybeans under field conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 20(3-4), 319-333. <https://doi.org/10.1080/00103628909368085>
7. Steiner, F., Lana, M. C., Zoz, T., Frandoloso, J. F., & Fey, R. (2012). Extraction methods and availability of phosphorus for soybean in soils from Parana State, Brasil. *Semina: Agricultural Sciences*, 33(3), 1005-1014. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n3p1005>
8. Walton, K., & Allen, D. (2004). Mehlich No. 3 soil test — the Western Australian experience. In 'SuperSoil 2004: 3rd Australian New Zealand Soils Conference', 5-9 December 2004, University of Sydney, Australia. (Ed B. Singh).
9. Schick, J., Kratz, S., Rückamp, D., Shwiekh, R., Haneklaus, S., & Schnug, E. (2013). *Comparison and inter-calibration of different soil P tests used in the Baltic Sea countries*. Knowledge report. In Baltic Forum for Innovative Technologies for Sustainable Manure Management, 1-47. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/283076910_Comparison_and_Inter-Calibration_of_Different_Soil_P_Tests_Used_in_the_Baltic_Sea_Countries_Baltic_Manure_Knowledge_Report
10. Nosko, B., Prister, B., & Loboda, M. (Eds.). (1994). *Handbook of agrochemical and agroecological conditions of soils in Ukraine*. Kyiv: Urozhay [In Ukrainian].

11. Institute of Soil Protection of Ukraine. (2023). *Scientific research on monitoring and surveying agricultural lands of Ukraine based on the results of the XI round (2016–2020)*. (S. Romanova, Compil.). Retrieved from <https://zemlerobstvo.com/wp-content/uploads/2025/01/naukovi-doslidzhennya-2023.pdf>
12. Zaryshnyak, A. S., Balyuk, S. A., Lisovyy, M. V., & Komarysta, A. V. (2012). The balance of humus and nutrients in the soils of Ukraine. *Visnyk ahraryoi nauky*, 1, 28-32. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2012_1_5 [In Ukrainian].
13. Khrystenko, A. O. (2023). Calculation method for determining the level of supply of plants with macronutrients. *AgroChemistry and Soil Science*, 94, 15-21. <https://doi.org/10.31073/acss94-02> [in Ukrainian].
14. Miroshnychenko, M., Khristenko, A., & Hladkikh, Ye. (2021). 50-year dynamics of the content of moving compounds of nitrogen, phosphorus and potassium in degraded chernozem according to the stationary field experiment. *Bulletin of Agricultural Science*, 99(8), 5-14 <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202108-01> [In Ukrainian].

УДК 633.282:620.952

Науково-методичні аспекти культивування енергетичних культур на мілітарно деградованому ґрунті в посушливих умовах

Ю. Л. Цапко^{1 a}✉, Я. М. Водяк^{1 b}, В. В. Зубковська^{1 c}, Н. Ю. Паламарь^{1 d},
О. О. Троценко^{1 e}, Т. В. Шевченко^{2 f}

¹ Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», Харків, Україна

² Національна академія аграрних наук України, Київ, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 02.04.2024 Отримано після доопрацювання 14.06.2025 Затверджено до видання 17.06.2025 Доступно онлайн 01.07.2025	В оглядовій статті представлено результати власних спостережень і висновки щодо науково-методичних аспектів висаджування та вирощування енергетичних культур на мілітарно деградованому ґрунті в умовах посухи і спеки через зміну клімату у лісостеповій частині Харківської області. Дрібноділянковий польовий дослід з вирощування енергетичних культур на мілітарно деградованому ґрунті закладено у 2023–2024 рр. на дослідному полі Інституту біля селища Новий Коротич, Харківського району, Харківської області. Ґрунт темно-сірий опідзолений (Luvic Greyzemic Phaeozem) важкосуглинковий на лесі. Місце для дослідів вибрано на ділянці поля, де у 2022 р. від вибуху ворожого снаряду утворилася глибока вирва і відбулося перемішування генетичних горизонтів ґрунту, внаслідок чого ґрунт визнано мілітарно деградованим. Вегетаційний період у 2024 р. відзначався мізерною кількістю опадів та аномальною спекою. У липні зафіксовано новий абсолютний максимум температури повітря +35,9° С, а за три місяці — липень, серпень та вересень, випало лише 17 мм опадів. Досліджували методичні аспекти культивування багаторічних енергетичних культур — посадки, догляду у перший період, агротехнічної підтримки здатності культур до приживання і виживання впродовж першого року у складних метеорологічних умовах. У закладеному дрібноділянковому польовому досліді серед вирощуваних енергетичних культур — Міскантусу гігантського, Сіди багаторічної та Сильфію пронизанолистого найгірша приживлюваність у перший рік зростання в умовах спеки і посухи на мілітарно деградованому ґрунті несподівано виявилася у Міскантусу гігантського. Детально описано результати дії зрошення на приживлюваність культур. Особливу увагу звернено на необхідність розширення польових досліджень способів підвищення ефективності вирощування енергетичних культур для відновлення й поліпшення стану, позитивної спрямованості ґрунтотворних процесів, виконання екологічних функцій та підвищення продуктивності мілітарно деградованого ґрунту в умовах посилення посушливості клімату в зоні Лісостепу.

Ключові слова:

енергетичні культури;
клімат;
мілітарна деградація ґрунту;
посушливі погодні умови

✉ Tsapkoul@i.ua

ORCID: ^a0000-0001-6111-0877; ^b0000-0001-9165-6272; ^c0000-0002-8124-8635; ^d0000-0002-3534-9478
^e0009-0007-0317-2907; ^f0000-0001-9488-0325

Форма цитування: Цапко Ю. Л., Водяк Я. М., Зубковська В. В., Паламарь Н. Ю., Троценко О. О., Шевченко Т. В. Науково-методичні аспекти культивування енергетичних культур на мілітарно деградованому ґрунті в посушливих умовах. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ «ІГА ім. О. Н. Соколовського». Харків, 2025. Вип. 98. С. 84–90. doi: 10.31073/acss98-06

1. Вступ

Минуло вже більше трьох років як на території України не припиняється війна, розв'язана російською федерацією, зумовлюючи утворення та збільшення площі мілітарно деградованих ґрунтів. За визначенням — мілітарно-деградованими ґрунтами та землями є деградовані ґрунти та землі які зазнали пошкоджень внаслідок воєнних дій, через руйнування ґрунтового покриву та забруднення земель.

Такої жахливої війни Європа не бачила з часів гітлерівської навали, вона згубно відображується на педосфері, біосфері, літосфері, гідросфері та атмосфері Землі, що наближує нашу унікальну Зелену Планету до кліматичного колапсу. Кожна мить війни з її масштабними пожежами та виділенням в атмосферу різноманітних газів, включаючи двоокис вуглецю, безумовно чинить

тиск на клімат, через виникнення парникового ефекту та кислотних опадів. Порушення перебігу сталих ґрунтоутворювальних процесів в умовах змін клімату тісно пов'язане з розвитком деградаційних процесів у навколишньому середовищі [1, 2]. Серед переліку дій людини, що сприяють деградації ґрунтів, способи обробітку ґрунту мають вагоме значення. Наприклад, щорічне розорювання зумовлює посилену взаємодію верхнього шару ґрунту з атмосферою, часто викликає вітрову та водну ерозію, сприяє зменшенню чисельності ґрунтових організмів. Сіножаті та збирання врожаю також чинять тиск на біоту ґрунту через вилучення біофільних елементів, та витрат вологи через випаровування. Тому-то на практиці й застосовують технології безвідвального та мінімального, або й нульового обробітку ґрунту, що дозволяє суттєво знижувати енерговитрати, заощаджувати енергоресурси та зберігати ресурси ґрунту і різноманіття його біоти.

Втім, майже тих самих результатів можна досягти шляхом вирощування енергетичних культур з низьковуглецевим слідом, які здатні зростати на одному місці протягом 22-30 років, наприклад таких як, Міскантус гігантський (*Miscanthus x giganteus*), Сіда багаторічна (*Sida napaea*) та Сильфій пронизанолистий (*Silphium perfoliatum* L.). Ці культури із багаторічних енергетичних культур на темно-сірих опідзолених ґрунтах є найпродуктивнішими [3].

Станом на тепер глибокі вирви від бомбардувань, артилерійських та мінометних обстрілів разом із побудовою фортифікаційних споруд (бліндажів, окопів, насипів та штучних підвищень), порушили цілісність ґрунтового покриву (подекуди майже суцільно) через що, зруйновано структуру природної будови материнських і навіть підстильних порід, шляхом вивернення ґрунту на поверхню та перемішуванням генетичних горизонтів. Внаслідок таких воєнних руйнувань ґрунтового покриву ґрунтогенез суттєво гальмується, а для відновлення родючості мілітарно пошкоджених ґрунтів необхідно застосовувати заходи з їх рекультивациі та ремедіації, тобто лікування ґрунтів, та загальні заходи з позитивним впливом на ґрунт, наприклад, вирощування енергетичних культур з хорошими меліоративними властивостями [4–6]. Вирощування вищенаведених енергетичних культур є перспективним комплексним заходом, що відкриває можливості для фіторемедіації ґрунтів з системними результатами: зменшення ступеню розораності земель, відтворення родючості ґрунтів, збереження біорізноманіття, підвищення рівня екологічної безпеки землеробства. Ця теза особливо актуальна як в умовах воєнного стану, так і в умовах післявоєнної відбудови агропромислового виробництва та розвитку «зеленої енергетики». Разом із тим вивчення ефективності культивування енергетичних культур на мілітарно деградованому ґрунті потребує розширення польових досліджень, що значно ускладнюється на тлі посух, що почастишали. У статті висвітлено науково-методичні аспекти посадки та вирощування енергетичних культур на мілітарно деградованому ґрунті в посушливих умовах.

2. Метеорологічні умови у період досліджень

В останні роки зміни кліматичних умов, найбільш помітно відображаються через зміни погодних умов, а саме у більш частих посухах та аномально високих температурах повітря, що є вагомою перепорою для вирощування сталих урожаїв продовольчих та енергетичних культур. Відносно тривалий час впродовж минулого століття вважалося, що клімат Харківської області належить до помірно континентального середньозволоженого. Середня щорічна сума опадів у Харківському районі становила 520 мм, а за півроку вегетаційного періоду — біля 260 мм, тобто за один місяць в середньому стабільно надходило біля 43 мм

опадів. Абсолютний мінімум температури повітря становив -36°C , абсолютний максимум — $+35^{\circ}\text{C}$. При цьому сума річних позитивних температур на дослідному полі ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського» біля селища Новий Коротич у Харківському районі становила 2850°C , що було цілком достатньо для визрівання головних сільськогосподарських культур [7]. Багаторічні дані метеостанції Харків свідчили про те, що найбільш холодним місяцем в області був грудень, а найтеплішим — липень. Зауважимо, що дані погодних умов на дослідній ділянці в районі селища Новий Коротич Харківського району Харківської області, за вегетаційні періоди у 2010–2024 рр., наведені в таблиці, отримано з різних джерел інформації [7–9], при цьому за 2023–2024 рр. значення показників «температура повітря» і «кількість опадів» були виміряні безпосередньо авторами в полі біля дослідної ділянки.

Представлені метеодані є свідоцтвом того, що починаючи з 2010, практично з кожним роком, кількість опадів скорочувалась, а середнє значення температури повітря збільшувалось. Слід відмітити, що хоча вегетаційні періоди 2021 і 2023 рр. і відрізнялися більшою кількістю опадів, але температури повітря по місяцях були близькими.

Незважаючи на такі форсмажорні обставини завдання ґрунтознавців полягає у науковому забезпеченні сталого розвитку ґрунтових ресурсів України, відтворення родючості, збереження здоров'я ґрунтів та підтримання їх екологічних і продуктивних функцій.

Таблиця

Середньомісячна температура повітря та кількість опадів на дослідній ділянці (Новий Коротич) за період квітень – вересень у роки спостережень

Місяць	2010		2015		2020		2021		2023		2024	
	t	Оп.	t	Оп.	t	Оп.	t	Оп.	t	Оп.	t	Оп.
IV	10,4	25	17,3	64	8,3	17	9,4	56	11,2	62	13,9	13
V	18,0	46	14,2	41	14,0	110	16,5	34	16,0	11	14,2	17
VI	23,3	20	19,2	24	22,4	33	20,0	45	18,5	27	21,3	35
VII	25,8	63	21,7	27	23,2	19	23,5	54	21,0	130	24,3	2
VIII	26,1	17	24,8	7	21,7	10	23,5	19	21,6	39	24,4	15
IX	15,7	119	17,6	9	19,0	0	18,0	34	15,3	14	19,1	0
Сума	-	290	-	172	-	189	-	242	-	283	-	82

Примітки: t — середньомісячна температура повітря; $^{\circ}\text{C}$; Оп. — середньомісячна кількість опадів, мм; 2010–2021 рр. — архівні дані; 2023–2024 — власні спостереження

Веgetаційний період у 2024 р. відзначався мізерною кількістю опадів та аномальною спекою. У липні зафіксовано новий абсолютний максимум температури повітря $+35,9^{\circ}\text{C}$, а за три місяці — у липні, серпні та вересні, випало лише 17 мм опадів.

Таким чином, є очевидною помітна зміна погодних умов, як фактора, який відображує зміни клімату, що, безумовно, не може не впливати на розвиток деградаційних процесів у ґрунті, що призводить до втрати його родючості.

3. Особливості закладання дослідів і висаджування рослин

Дрібноділянковий польовий дослід з вирощування енергетичних культур на мілітарно деградованому ґрунті закладено у 2023–2024 рр. на дослідному полі Інституту біля селища Новий Коротич, Харківського району, Харківської області. Ґрунт темно-сірий опідзолений важкосуглинковий на лесі.

Ділянку для проведення досліду вибрано на площі поля, де ґрунт зазнав радикального руйнування внаслідок вибуху в 2022 р. потужної фугасної авіаційної бомби, через що утворилася вирва, глибиною біля 5 м та діаметром біля 7 м на поверхні землі. Через механічне травмування частини нижніх шарів ґрунту опинилися на поверхні і навпаки, частина верхніх шарів — глибоко вниз, а загалом вся стратиграфія ґрунту була деформована повністю і про її відновлення не може бути й мови. Вирва утворилася на невеликому плато зі схилом з півдня на північ 1,5–2,0 градуси, а на схід з доволі крутим спуском на 10–12 м до заплави невеликого струмка, який влітку повністю пересихає. Материнською породою є лес, а в ґрунтовому розрізі, закладеному нами на краю вирви, виявлено, що вцілілий ґрунт на 25–35 см перекрито лесом або лесовою породою, тобто утворився похований ґрунт під лесом.

У досліді ми використали Міскантус гігантський сорту «Осінній зорецьвіт», зареєстрований в Україні у державному реєстрі рослин № 150903, який створено в Інституті біоенергетичних культур і цукрових буряків. Саме цей сорт може протягом 20–30 років зростати на одному місці та кожний рік продукувати біля 20 т/га сухої речовини, забезпечуючи вихід енергії — 360 ГДж/га [10].

Посадковий матеріал міскантусу було підготовлено навесні 2023 р. шляхом ділення маточного куща на п'ять-шість частин (після зрізання стебел на висоті 15–20 см від землі), залишаючи кореневу систему разом із ґрунтом у відносно цілому природному стані.

Рослини міскантусу висадили у чотири ряди від поверхні вирви і вниз у бік сходу, з відстанню між рядами 65–70 см та між кущами — 70–75 см. Для посадки рослин вузькою лопатою викопували лунки глибиною 20–25 см, які повністю заливали водою і чекали повного всмоктування води. Підготовлену до посадки частину маточного куща міскантусу, кореневу систему якого разом із залишками ґрунту також обприскували водою, висаджували в лунку, потім засипали ґрунтом, викопаним з лунки. Таким чином було закладено дослідну ділянку Міскантусу площею 18 м² (3 x 6 м).

Посадковий матеріал Сильфію пронизанолистого та Сіди багаторічної також було взято з маточної ділянки та висаджено на мілітарно деградованому ґрунті поруч із міскантусом. Сильфій пронизанолистий висаджено у чотири ряди від поверхні вирви і вниз у бік сходу з відстанню між рядами 65–70 см та між кущами 70–75 см. Також було пересаджено п'ять кущів сіди багаторічної в один ряд з відстанню 80–90 см між рослинами.

4. Особливості догляду за рослинами у перший рік

Як зазначено вище, у 2024 р. на дослідному полі спостерігалася неймовірна спека і аномально жорстока посуха так за півроку вегетаційного періоду випало лише 94 мм опадів тоді як за нормальних погодних умов цей кліматичний показник становив не менше 258 мм. Найбільш спекотним виявився липень коли на фоні 2 мм опадів температура повітря впродовж 25 діб перевищувала 30 °С, з максимальним значенням 35,9 °С. У серпні випало 15 мм опадів, а максимальна температура повітря сягала 29,9 °С.

З лівого боку ділянки було закладено прикопку де відібрано проби ґрунту на визначення вмісту органічного вуглецю та гумусу, а також активної кислотності (рН водний). Встановлено, що вміст органічного вуглецю та значення рН водного в шарі ґрунту 0–20 см становили відповідно – 0,92 % і 7,1; у шарі 20–40 см — 1,10 % і 7,3; у шарі 40–60 см — 1,31 % і 6,7.

Дослід закладено з метою визначення можливих способів рекультивації, ремедіації та управління родючістю мілітарно деградованого ґрунту в умовах змін

клімату. Факторами впливу на мілітарно деградований ґрунт є вирощування енергетичних культур другого покоління — Міскантусу гігантського, Сіди багаторічної та Сильфію пронизанолистого. Контрольованими показниками є такі: (1) для контролю екологічних функцій ґрунту — секвестрація вуглецевого газу, надання екосистемних послуг; (2) біологічних функцій — зміни складу мікроорганізмів, та перебігу ґрунтотворних процесів.

Фенологічні спостереження за зростанням міскантусу засвідчили, що у середині червня 2024 р. рослини розкущилися, листові стеблі сягали 30–35 см та подекуди кінцівки стебел вже були прихоплені жовтизною, що є ознакою дефіциту вологи. Рослини сильфію були в задовільному стані, вони потягнулися до гори та мали насичений зелений колір листової поверхні, висота листя сягала 15–17 см. З п'яти кущів сіди прийнялося лише три. Вцілілі рослини мали висоту куща до 16 см і ширину 14–15 см.

Несприятливі погодні умови року досліджень, які проявилися тривалим посушливим періодом та яскраво вираженим гідродифіцитом в орному шарі ґрунту у травні/червні та серпні/вересні, через ще слабку кореневу систему енергетичних культур, особливо міскантусу, на першому році їх зростання, змусили нас провести декілька періодичних поливів із розрахунку 10 л води на один квадратний метр. Всього було здійснено сім поливів, по два у травні, червні та серпні і один у вересні. Вчасне застосування цього потужного агро меліоративного заходу забезпечило збереження переважної кількості рослин міскантусу на першому році зростання. Також цьому сприяло й рішення залишати бур'яни поруч з міскантусом як покривну культуру. Так приживлюваність рослин міскантусу на поливі була на рівні 93 %, тоді як без поливу вдалося зберегти лише 27 % рослин.

Фенологічні спостереження за рослинами проведені нами 12 серпня 2024 р. показали, що дев'ять рослин Сильфію пронизанолистого на час обстеження пережили спеку, з них п'ять рослин непогано розвинуті, із яскраво зеленим листям, знаходилися у фазі цвітіння, і сягали заввишки 49–67 см. Інші були дещо пригнічені і мали висоту від 18 до 40 см. Вціліли й дванадцять кущів міскантусу, які були світло зеленими, з жовтизною і сягали у висоту від 55 до 112 см. Рослини міскантусу, які не отримали поливу, від спеки повисихали.

Втім наш попередній досвід свідчить, що якщо коренева система рослини вціліла, то наступною весною є велика вірогідність відродження міскантусу. Із п'яти висаджених рослин сіди багаторічної вижило (квітень 2024 р.) лише три рослини, які на час фенологічних спостережень липень 2024 р. були зеленими, у фазі бутонізації, заввишки 37 та 61 см. Можна констатувати, що міскантус погано переносить пересадку, оскільки після травм від ділення під посадку кореневища, рослини відновлюються досить довго. Втім, завдяки застосуванню таких агро заходів як зрошення, створення напівтіні від бур'янів, нам все ж таки, частково вдалося нівелювати ці негаразди.

5. Попередні висновки

Отже, для відновлення родючості мілітарно пошкоджених ґрунтів треба застосувати заходи з їх рекультивациі та ремедіації, тобто лікування ґрунтів, наприклад шляхом вирощування енергетичних культур з яскраво вираженими меліоративними властивостями.

Встановлено, що із трьох досліджених нами енергетичних культур, найкраща приживлюваність у перший рік зростання в умовах посухи на мілітарно деградованому ґрунті виявилася у Сильфію пронизанолистого.

Засвідчено, що погодні умови є важливим фактором кліматичних змін, який вносить суттєві корективи в технологію вирощування енергетичних культур на маргінально деградованому ґрунті — застосування зрошення.

Список використаних джерел

1. Сплодитель А., Голубцов О., Чумаченко С., Сорокіна Л. Забруднення земель внаслідок агресії росії проти України. 2023. 154. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii1.pdf> (дата звернення: 26.03.2025).
2. Нейтер Р., Душко Д., Нів'євський О., Стольнікович Г. Огляд непрямих втрат від війни в сільському господарстві України. 2022. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2022/06/Losses_report_issue1_ua.pdf (дата звернення: 27.03.2025).
3. Кургак В. Г., Слюсар С. М. Продуктивність багаторічних трав'янистих рослин при вирощуванні для енергетичних потреб. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 11. С. 48-54. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202111-06>
4. Цапко Ю. Л., Водяк Я. М., Зубковська В. В., Холодна А. С. Перспективи вирощування міскантусу гігантського для покращення екосистемних послуг чорнозему опідзоленого важкосуглинкового. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 9. С. 48-54. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202109-07>
5. Vodiak Y., Tsapko Yu., Kucher A., Krupin V., Skorokhod I. Influence of Growing *Miscanthus x giganteus* on Ecosystem Services of Chernozem. *Energies*. 2022. 15(11), 4157. <https://doi.org/10.3390/en15114157>
6. Tsapko Yu., Starchenko O., Vodiak Y. (). Using the ecosystem services potential of Chernozem to restore war-damaged land, *International Journal of Environmental Studies*. 2023. Vol. 80(2). P. 399–409. <https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2179760>
7. Агрокліматичне районування України / Карти України. 2016. URL: <http://geomap.land.kiev.ua/zoning-3.html#close> (дата звернення: 27.03.2025).
8. Meteo.farm. Агро погода. URL: <https://www.meteo.farm/dashboard> (дата звернення: 27.03.2025).
9. Клімат Харкова. Харківський регіональний центр з гідрометеорології. 2018. URL: <http://kharkiv.meteo.gov.ua/klimat-kharkova/> (дата звернення: 27.03.2025).
10. Міскантус в Україні: Київ: ТОВ «ЦП «Компрінт», 2019. 256 с. URL: https://bio.gov.ua/sites/default/files/documentation/miskantus_v_ukrayini.pdf (дата звернення: 27.03.2025).

УДК 633.282:620.952

Scientific and methodological aspects of cultivating energy crops on militarily degraded soil in arid conditions

Yu. L. Tsapko¹ ✉, Ya. M. Vodiak¹, V. V. Zubkovska¹, N. Yu. Palamar¹, O. O. Trotsenko¹, T. V. Shevchenko²

¹ National Scientific Center "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky", Kharkiv, Ukraine

² National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

✉ Tsapkoul@i.ua

Received 15.11.2025; Revised 16.12.2025; Accepted 17.06.2025; Available online 01.07.2025

Abstract

The review article presents the results of our own observations and conclusions on the scientific and methodological aspects of planting and growing energy crops on militarily degraded soil in conditions of drought and heat due to climate change in the forest-steppe part of the Kharkiv region. A small-scale field experiment on growing energy crops on militarily degraded soil was established in 2023–2024 on the Institute's experimental field near the village of Novy Korotych, Kharkiv district, Kharkiv region. The soil is dark gray podzolized (Luvic Greyzemic Phaeozem) heavy loam on loess. The site for the experiment was chosen on a section of the field where in 2022 a deep crater was formed from the explosion of an enemy shell and the genetic horizons of the soil were mixed. Because of this, the soil was recognized as militarily degraded. The growing season in 2024 was marked by a small amount of precipitation and abnormal heat. In July, a new absolute maximum of air temperature of +35.9° C was recorded, and in three months — July, August and September, only 17 mm of precipitation fell. We studied the methodological aspects of cultivating perennial energy crops — planting, care in the first period, agrotechnical support of the ability of crops to adapt and survive during the first year in difficult meteorological conditions. Among the cultivated energy crops - *Miscanthus giant*, *Sida perennial*, and *Sylphia pendens*, the worst survival rate in the first year of growth in conditions of heat and drought on militarily degraded soil was unexpectedly found in *Miscanthus giant*. The results of the effect of irrigation on the survival rate of crops are described in detail. Special attention is paid to the need to expand field research on methods for increasing the efficiency of growing energy crops to restore and improve the condition, positive orientation of soil-forming processes, perform ecological functions and increase the productivity of militarily degraded soil in conditions of increasing aridity of the climate in the Forest-Steppe zone.

Keywords: energy crops; climate; military soil degradation; arid weather conditions

Citing: Tsapko, Yu. L., Vodiak, Ya. M., Zubkovska, V. V., Palamar, N. Yu., & Shevchenko, T. V. (2025). Scientific and methodological aspects of cultivating energy crops on militarily degraded soil in arid conditions. *AgroChemistry and Soil Science*, 98, 84-90. doi:10.31073/acss98-06 [in Ukrainian].

References

1. Sploditel, A., Golubtsov, O., Chumachenko, S., & Sorokina, L. (2023). Land pollution as a result of Russian aggression against Ukraine, 154 [In Ukrainian]. Retrieved from <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii1.pdf> (date of application: 26.03.2025).
2. Neiter, R., Dushko, D., Niv'evsky, O., & Stolnikovich, G. (2022). Review of indirect losses from the war in Ukrainian agriculture. 2022. Retrieved from https://kse.ua/wp-content/uploads/2022/06/Losses_report_issue1_ua.pdf [In Ukrainian] (date of application: 27.03.2025).
3. Kurhak, V.G., & Slyusar, S.M. (2021). Productivity of perennial herbaceous plants when grown for energy needs. *Bulletin of Agrarian Science*, 99(11), 48-54. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202111-06> [In Ukrainian].
4. Tsapko, Yu. L., Vodiak, Ya. M., Zubkovska, V. V., & Kholodna, A. S. (2021). Prospects for growing giant miscanthus to improve ecosystem services of podzolized heavy loamy chernozem. *Bulletin of Agricultural Science*, 99(9), 48-54. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202109-07> [In Ukrainian].
5. Vodiak, Y., Tsapko, Yu., Kucher, A., Krupin, V., & Skorokhod, I. (2022). Influence of Growing Miscanthus x giganteus on Ecosystem Services of Chernozem. *Energies*, 15(11), 4157. <https://doi.org/10.3390/en15114157>
6. Tsapko, Yu., Starchenko, O. & Vodiak, Y. (2023). Using the ecosystem services potential of Chernozem to restore war-damaged land, International. *Journal of Environmental Studies*, 80(2), 399–409. <https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2179760>
7. Agroclimatic zoning of Ukraine / Maps of Ukraine. (2016). Retrieved from <http://geomap.land.kiev.ua/zoning-3.html#close> (date of application: 27.03.2025).
8. Meteo.farm. Agro weather. Retrieved from <https://www.meteo.farm/dashboard> [In Ukrainian] (date of application: 27.03.2025).
9. Climate of Kharkiv. Kharkiv Regional Center for Hydrometeorology. 2018. Retrieved from <http://kharkiv.meteo.gov.ua/klimat-kharkova/> [In Ukrainian] (date of application: 27.03.2025).
10. Miscanthus in Ukraine: Kyiv: LLC "CP "Compprint" 2019. Retrieved from https://bio.gov.ua/sites/default/files/documentation/miskantus_v_ukrayini.pdf [In Ukrainian] (date of application: 27.03.2025).

ІСТОРИЯ НАУКИ HISTORY OF SCIENCE

УДК 636.4:061.2:005.745(477)(091)

Український поступ в історії створення Міжнародного та національного товариств ґрунтознавців (1907–1928) (оглядова)

В. В. Кунець^a ✉, Т. М. Лактіонова^b, І. Ф. Парасочка^c

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

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 12.03.2025 Отримано після доопрацювання 12.05.2025 Затверджено до видання 17.16.2025 Доступно онлайн 07.07.2025	У статті розглянуто історію зародження ідеї об'єднання світової ґрунтознавчої наукової спільноти, розкрито науково-організаційні підходи задля розвитку педології як самостійної науки. Проаналізовано результати роботи перших профільних наукових форумів, скликаних з метою створення Міжнародного товариства ґрунтознавства (ISSN/ISSS) та пізніше Українського товариства ґрунтознавців (УТГ). Відстежено послідовність подій у розвитку галузевої наукової думки та розкрито динаміку зміни її пріоритетних напрямів, виділено українську складову. Хронологічні межі дослідження включають 1907–1928 роки — від перших зборів наукової спільноти в колишній Російській імперії, де було вирішено проводити періодичні з'їзди ґрунтознавців, та I Міжнародної агрогеологічної конференції до Всеукраїнської наради ґрунтознавців (1928), яка стала вирішальним кроком у справі створення національного галузевого товариства на теренах України. Всесвітні Конгреси та, між ними, міжнародні та національні конференції, з'їзди і численні наради дозволяли науковцям обмінюватися думками, досягати наукового консенсусу і тим самим розвивати та вдосконалювати методологічні та теоретичні основи ґрунтознавства. Наукові дискусії та колективні польові екскурсії, як традиційні атрибути зборів різного рівня, також були необхідним доповненням до дослідницького процесу. Так спільними зусиллями у творчій роботі ґрунтознавчих колективів різних поколінь та країн викристалізовувалися основні напрями досліджень, наукові положення та гіпотези. Для забезпечення послідовності відображення подій матеріал представлено у хронологічному порядку. Розкрито діяльність українських учених Г. Г. Махова, О. Н. Соколовського, Д. Г. Віленського, Г. М. Висоцького, Ф. І. Левченка, В. І. Крокоса, М. К. Крупського та інших у справі створення Українського товариства ґрунтознавців і розбудови системи національної консолідації знань про ґрунти. Особливий інтерес для висвітлення цієї теми становили галузеві періодичні видання досліджуваного періоду. Першочергової значущості надавали вивченню опублікованих офіційних документів наукових та громадських організацій і державних установ — постанов, протоколів, рішень наукових форумів та нарад. Це стало підґрунтям для уточнення окремих суперечливих моментів у висвітленні історичних подій, і допомогло розкрити логічність їх послідовного ряду та збагатити реальним тематичним змістом. Матеріал доповнено особистими спогадами та враженнями вчених від участі в окремих подіях світового рівня. Важливим результатом дослідження є конкретизація процесу еволюціонування сучасної громадської організації — Українського товариства ґрунтознавців та агрохіміків. Фактично доведено дату його заснування.

✉ victoriya.viva@ukr.net

ORCID: ^a0000-0001-7169-5418, ^b0000-0002-8681-6224, ^c0000-0002-3274-2776

Форма цитування: Кунець В. В., Лактіонова Т. М., Парасочка І. Ф. Український поступ в історії створення Міжнародного та національного товариств ґрунтознавців (1907–1928) (оглядова) *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГ" ім. О. Н. Соколовського". Харків, 2025. Вип. 98. С. 91-108 doi: 10.31073/acss98-07

1. Вступ

Віковий поступ Міжнародного товариства ґрунтознавства (МТГ) / International Society of Soil Science (ISSS) та його правонаступника — Міжнародного союзу ґрунтознавців / International Union of Soil Sciences (IUSS) — це історія сучасної глобальної ґрунтознавчої спільноти [1]. Завдяки зусиллям окремих учених, зародилася ідея створення міжнародного об'єднання науковців, зацікавлених у

розробці стандартизованих і гармонізованих методів аналізу та уніфікованих підходів до номенклатури і класифікації ґрунтів.

До початку XX ст. ґрунтознавство, на думку відомого сучасного дослідника історії розвитку науки про ґрунт А. Е. Hartemink [2], носило регіональний характер, а також мало або геологічний, або хімічний фокус. На ранніх етапах наукового вивчення природи і розвитку ґрунту методи дослідження сильно розходилися. По суті, як вважають Н. Van Baren et al. [3], це були польові (агрогеологія) і лабораторні (агрохімія) методи. У Західній Європі ґрунтознавство здебільшого зароджувалося в лабораторіях, тоді як у США та Російській імперії воно розпочалося з польових досліджень. Коли вивчення ґрунту стало більш систематичним і глибоким, і дослідники з різних країн почали відвідувати лабораторії один одного, відбувся обмін висновками та ідеями щодо процесів ґрунтоутворення, методів вимірювання параметрів властивостей ґрунту, живлення рослин тощо [4].

Так позначилися потреби щодо регулярного обміну науковою інформацією. Тому синергійний рух формування світової спільноти мав фундаментальну значущість для становлення ґрунтознавства як наукової дисципліни. Товариство було створено в Римі під час IV Міжнародної конференції з педології (1924). Спочатку воно називалося «Міжнародне товариство ґрунтознавства» (International Society of Soil Science) і за словами Edoardo A. C. Costantini, Президента IUSS, на Всесвітньому Конгресі ґрунтознавців у 2024 р. [1], складалося з окремих членів, і лише у 1998 р., після затвердження Генеральною асамблеєю нового статуту, товариство було перейменовано на «Міжнародний союз ґрунтознавства» (International Union of Soil Sciences), який вже виступив як альянс національних товариств або академій. Зміна була офіційно оформлена під час 16-го Всесвітнього конгресу ґрунтознавства в Монпельє, Франція [1, 5].

Як відомо з фундаментальної праці, опублікованої до 100-річчя Міжнародного товариства ґрунтознавців за редакцією R. Horn та ін. [6], міжнародний рівень об'єднання провідних ґрунтознавців світу послугував поштовхом до створення національних ґрунтознавчих товариств у багатьох країнах. Українські вчені-ґрунтознавці, навіть і за тих часів, коли працювали в умовах, які не сприяли розвитку національної науки, знаходилися в авангарді великого загону науковців, об'єднаних ідеєю консолідованого розвитку всіх наук, пов'язаних з ґрунтом.

Мета статті: (1) висвітлення результатів дослідження історичних документів та аналізування послідовного ряду подій у сфері світової ґрунтознавчої спільноти, включаючи й Україну, спрямованих на консолідацію наукової думки; (2) розкриття історії зародження сучасної громадської організації — Українського товариства ґрунтознавців та агрохіміків і фактичне підтвердження дати його заснування.

2. Історичні відомості про об'єднаних зусилля ґрунтознавців світу

Перша нарада ґрунтознавців у Російській імперії (1907)

Цікаво, що перші збори ґрунтознавчої спільноти в Російській імперії передували західноєвропейським. Так, перша нарада ґрунтознавців, скликана Агрономічною комісією при московському Музеї прикладних знань, відбулася 1–3 березня 1907 р., на яку зібралися 40 учасників. На засіданні було ухвалено рішення про влаштування періодичних з'їздів вчених, які працюють у галузі ґрунтознавства, і перший з них вирішено скликати на Різдвяні свята 1907 р. у Москві [7]. Для складання програми запланованої зустрічі було організовано спеціальну комісію з фахівців, працюючих у сфері наукового і генетичного ґрунтознавства. До

складу комісії увійшли й провідні українські вчені — В. І. Вернадський, Г. М. Висоцький, Г. І. Танфільєв, В. І. Талієв. Було організовано й виконавчий орган — Бюро, до функцій якого, крім ведення протоколів, опублікування програми і всіх матеріалів майбутньої зустрічі, також включено збирання бібліографічних відомостей про всі опубліковані роботи в галузі ґрунтознавства. Таким чином, говорячи сучасною мовою, Бюро взяло на себе відповідальність за створення бібліотеки і бази даних публікацій з ґрунтознавства з виданням у подальшому бібліографічного покажчика для загального користування [7].

I Міжнародна агрогеологічна конференція (1909)

Загальновідомо, що I Міжнародна агрогеологічна конференція відбулася 14–24 квітня 1909 р. у Будапешті, скликана задля обговорення низки основних питань ґрунтознавства та узгодження методів польових і лабораторних досліджень ґрунтів. У ній взяли участь 86 науковців із 23 країн [3].

Детальний звіт про конференцію опублікував професор К. Д. Глінка, який на той час працював на кафедрі ґрунтознавства Ново-Александрійського інституту сільського господарства і лісівництва (Інститут переведено до Харкова у 1914 р.) [8]. Головним організатором зібрання виступив Угорський геологічний комітет на чолі з директором L. Loczy. Першим доповідачем був професор К. Д. Глінка. Його виступ на тему «Про ґрунтові зони та ґрунтові типи Європейської та Азіатської Росії» було ілюстровано колекцією ґрунтів, мапою ґрунтів Європейської та невеликою схематичною картою ґрунтів Азіатської частин Росії. Цікаво, що другий доповідач, професор G. Murgoci (Бухарест), демонструючи власну карту ґрунтів Румунії, відмітив спорідненість ґрунтових зон на мапах європейської частини Росії та країн Європи.

На думку К. Д. Глінки, особливу зацікавленість викликала доповідь P. Treitz (Будапешт) про спосіб обчислення спеціального коефіцієнту для характеристики клімату різних ґрунтових зон, якому автор дав назву «Sättigungsdeficit» («Дефіцит насичення»), та про метод аналізування дрібноземистих часточок ґрунту для характеристики різних типів ґрунтів. У статті К. Д. Глінка також підкреслив, що саме P. Treitz більше за інших додав зусиль для організації конференції та екскурсії [8].

Решта доповідей стосувалася широкого кола питань: колоїдні сполуки та їх роль у процесах вивітрювання та ґрунтоутворення; фізико-географічні зони земної кулі у зв'язку з її кліматичними зонами; методи польових і лабораторних досліджень; картографія ґрунтів; способи та прийоми відбирання зразків ґрунту та інше.

Однак найбільш цікавою виявилась польова екскурсія, де дебатовалися різноманітні питання з ґрунтознавства й зональності типів ґрунтів, методи вивчення безпосередньо у ґрунтових розрізах морфології ґрунтів різних типів і на різних породах. Саме впродовж екскурсії, запевняв К. Д. Глінка, встановилося найясніше порозуміння між окремими учасниками і користь міжнародного зібрання стала настільки очевидною, що було висловлено загальне побажання, щоб такі конференції періодично повторювались.

Важливою була також запропонована професором B. Von Inkey (Будапешт) (член-кореспондент Угорської академії наук, засновник агрогеологічних досліджень в Угорщині) і доповнена професором E. Ramann (один із засновників ґрунтознавства у Німеччині) рекомендація учасникам конференції створити оглядові карти ґрунтів у тих країнах, де проводяться дослідження, що було одностайно схвалено конференцією.

На заключному засіданні, за ініціативою професора F. Wahnschaffe (Берлін) (у 1912 р. він став головою Німецького геологічного товариства) було висунуто пропозицію відокремити ґрунтові конгреси від геологічних та скликати наступну

агрогеологічну конференцію одночасно з геологічним конгресом. Зі статті D. J. Hissink у журналі «Почвоведение» 1928 р. [9] відомо також, що на конференції ухвалено створення великого агрогеологічного комітету (комісії), секретарем якого став B. von Inkey.

II Міжнародна агрогеологічна конференція (1910)

II Міжнародну агрогеологічну конференцію було скликано у серпні 1910 р. у Стокгольмі, і в ній взяли участь 170 ґрунтознавців з усього світу [3]. Роботу конференції було розподілено на шість секцій, присвячених механічному аналізу ґрунту, ґрунтовим колоїдам, підготовці ґрунтових екстрактів для хімічного аналізу, ґрунтова картографії, класифікації та номенклатурі типів ґрунтів і ґрунтових умов у різних країнах. Було ухвалено низку важливих рішень: закрити великий агрогеологічний комітет, який було обрано на I Міжнародній агрогеологічній конференції (1909) та передати його функції Організаційному комітетові, який функціонуватиме упродовж кожної конференції. Також вирішено створити три міжнародних комісії: з механічного аналізу ґрунту; з хімічного аналізу; з номенклатури ґрунтів у моренних зонах Європи. Професору F. Wahnschaffe доручено організувати випуск міжнародного агрогеологічного журналу. Наступну (третю) конференцію ухвалили скликати у 1914 р. у С.-Петербурзі. Головою її Організаційного комітету було обрано проф. О. П. Карпінського [9].

Роки 1910–1914 D. J. Hissink [9] характеризує як такі, що сповнені прогресом у міжнародному спілкуванні ґрунтознавців: було створено міжнародний науковий журнал «Internationale Mitteilungen Fur Bodenkunde»/«Міжнародні комунікації з ґрунтознавства» (1911); доктор А. М. Atterberg у Берліні провів засідання комісії з механічного і фізичного дослідження (1913); професор А. V. Sigmond у Мюнхені зібрав членів Комісії з хімічного аналізу ґрунтів (1914). Протоколи проведених засідань і повідомлення їх учасників було розміщено у міжнародному журналі.

Світова війна зруйнувала всі плани ґрунтознавчої спільноти щодо проведення спільних конгресів, конференцій, співпрацю зупинено, зв'язки розірвано. О. П. Карпінський і К. Д. Глінка розмістили у міжнародному журналі (1913) статтю з поясненням щодо неможливості (в силу несприятливих обставин) проведення наступної агрогеологічної конференції у Петербурзі у 1914 р.

III З'їзд ґрунтознавців у колишньому СРСР (1921)

У 20-ті роки XX ст. у колишньому СРСР часто проводилися з'їзди ґрунтознавців, які не були багатолюдними, але були змістовними. У 1921 р. було скликано III З'їзд ґрунтознавців і число делегатів, присутніх на цьому заході, досягло 117. Важливим кроком в об'єднанні ґрунтознавчої спільноти стало створення рішенням цього З'їзду Бюро уповноважених ґрунтознавців СРСР (БУГ), якому спочатку відводилася вузька роль консультативного органу серед працівників галузі ґрунтознавства та організаційного органу у проведенні всесоюзних з'їздів. Та вже наприкінці 1922 р., відповідно до викликів часу, значно змінився характер роботи БУГ [10].

Надзвичайна (III Міжнародна) конференція з педології у Празі (1922)

Міжнародна спільнота відновила свою діяльність лише через вісім років після закінчення Першої світової війни — 19–25 квітня 1922 р. було скликано Надзвичайну (III Міжнародну) конференцію у Празі, яка вперше організовувалася як суто педологічна і мала за мету довести, що ґрунтознавство є самостійною

науковою дисципліною, а не галуззю агрогеології, що розглядає ґрунт лише як геологічне утворення. Саме на Празькій конференції було організовано комісії, які надалі сформулюють структуру майбутнього МТГ/ISSS, а саме: 1) з механічно-фізичного дослідження ґрунтів з підкомісією для «культуртехнічного» ґрунтознавства; 2) з хімії ґрунтів; 3) з біології ґрунтів; 4) з картографії; 5) з номенклатури і класифікації з підкомісією для аридних областей [9].

На форумі у Празі було обрано місто Рим, як місце проведення наступної IV Міжнародної конференції ґрунтознавців у 1924 р. та створено Міжнародний комітет для підготовки до неї з президентом Josef Koresky і генеральним секретарем D. J. Hissink.

Всеукраїнська нарада (з'їзд) ґрунтознавців (1923)

У Києві, 15–21 квітня 1923 р., відбулася Всеукраїнська нарада (з'їзд) ґрунтознавців — перше офіційне зібрання ґрунтознавців і дослідників з інших галузей сільськогосподарської науки, дотичних до ґрунтознавства — геологів, агрономів та ін., на теренах радянської України. Організатор — Секція ґрунтознавства Сільськогосподарського наукового комітету України (СГНКУ), якою керував проф. Г. Г. Махов і був головним ініціатором зібрання. На нараді було презентовано і рекомендовано до видання першу карту ґрунтів України у 25- верстовому масштабі. Розглянуто також попередній план роботи зі створення десятиверстової карти [11, 12]. Зауважимо, що автори цитованих публікацій називають нараду першим з'їздом ґрунтознавців України.

Варто зазначити, надалі діяльність Секції ґрунтознавства СГНКУ у справі картографування ґрунтів буде відмічено на I Всеукраїнському з'їзді вивчення продуктивних сил та народного господарства України, скликаному Наркомпросом (28 грудня 1924–5 січня 1925 рр.) у Харкові. І хоча цей форум не був суто галузевим зібранням і на ньому не піднімалося питання консолідації ґрунтознавчих сил у формі товариства, але було приділено належну увагу проблемам агроґрунтознавства, а саме, обстеженню ґрунтів, та складено плани подальшої роботи з вивчення властивостей ґрунтів. З'їзд проходив за активної участі академіка П. А. Тутківського, професорів Є. В. Опокова, О. І. Янати, Г. Г. Махова, С. С. Соболева, В. І. Крокоса та ін. [12].

Нарада Міжнародного комітету ґрунтознавців у Цюриху (1923)

Свою діяльність з підготовки до форуму в Римі Міжнародний комітет ґрунтознавців (створений на Празькій конференції) розпочав з наради, яка відбулася у Цюриху 7–10 червня 1923 р. Важливою тезою зібрання стала пропозиція Комітету заснувати на майбутній зустрічі в Римі **Міжнародне товариство ґрунтознавства** (МТГ/ISSS): «Незважаючи на існування національних організацій, потрібно прагнути до об'єднання усіх ґрунтознавців у міжнародну організацію — Міжнародне товариство ґрунтознавства» [9, с. 157]. Для підготовки проєкту Статуту Товариства було створено міжнародну комісію у складі: B. Frosterus, J. Girsberger, G. Wiegner і H. Gessner [9].

Підкреслимо, що у статті німецькою мовою [9], де D. J. Hissink описує цю нараду, зафіксовано назву майбутнього Товариства як «Міжнародне товариство ґрунтознавства» (Internationale Bodenkundliche Gesellschaft), так само як і в інших публікаціях англійською (International Society of Soil Science). Однак у ранніх перекладах російською і українською назва звучить як «Міжнародне товариство ґрунтознавців», яку ми і використовуємо.

Стосовно «національних організацій», згаданих у цитаті зі статті [9, с. 157], треба зазначити, що, очевидно, маються на увазі різні установи, але на той час ще не існувало (принаймні, не зафіксовано в публікаціях) жодного офіційно затвердженого національного товариства ґрунтознавців.

IV Міжнародна конференція ґрунтознавців (1924)

Заохочення до вивчення ґрунтів у всьому світі, спонукало наукову спільноту щодо формування відповідної методологічної бази досліджень, тому 12–19 травня 1924 р. у Римі відбулася IV Міжнародна конференція ґрунтознавців. Загалом на конференції було представлено 280 повідомлень, розподілених між різними комісіями. Обговорювалися питання розробки уніфікованих методів аналізу ґрунту; номенклатури для класифікації ґрунтів; підготовки агрогеологічних карт Європи; організації обстежень і досліджень ґрунтів у країнах, де вони ще не були розпочаті; введення вивчення ґрунтів у навчальні програми середніх та вищих шкіл [3]. Саме на цій конференції було ухвалено рішення про заміну назви «педологія» на «ґрунтознавство» та щодо регулярного проведення міжнародних конгресів.

Українську делегацію представляли О. Н. Соколовський і Д. Г. Віленський [13]. До участі у заході було запрошено і Г. Г. Махова. Вчений підготував та надіслав доповідь "Питання еволюції ґрунтів України", проте влада не надала йому дозволу на виїзд.



Міжнародна конференція ґрунтознавців, Рим, 1924 (Джерело: Reyes-Sánchez L. B., Irazoque A. Reevaluating Diversity and the History of Women in Soil Science: A Necessary Step for a Real Change. *Span. J. Soil Sci.* 2022. Vol. 12. Article 10401. <https://doi.org/10.3389/sjss.2022.10401>)

Результати роботи українських вчених були представлені на конференції у вигляді стендових доповідей: Г. Махов (Харків) «Питання про еволюцію ґрунтів України» [14] і «Карта ґрунтів України, масштаб: 10 верст в англійських дюймах» [15]; В. Крокос (Одеса) «Лесові та викопні ґрунти південно-східної України» [16] і «До питання про класифікацію чорноземів на півдні України» [17];

М. Фролов (Київ) «Як працюють картографувальники ґрунтів в Україні» [18] і «Про набоківський (трифазний) метод польових робіт» [19].

19 травня 1924 р. під час ранкового засідання останнього дня IV Міжнародної конференції, учасники ухвалили заснування **Міжнародного товариства ґрунтознавців (МТГ/ISSS)**. Проект Статуту було схвалено одностайно. Згідно з § 2 Статуту Товариство мало за мету піклуватися про всі підгалузі ґрунтознавства шляхом організації конгресів та засідань, створення секцій та комісій, видання журналу та організації бібліографічного центру з проблем ґрунтознавства при Міжнародному сільськогосподарському інституті в Римі. Було ухвалено рішення щодо скликання I Конгресу новоствореного товариства у США і доручено першому президенту J. G. Lipman (США) створення американського організаційного комітету [3; 9].

Журнал «Internationale Mitteilungen für Bodenkunde» завершив своє існування у 1924 р., і мав з'явитися у 1925 р. у новому статусі — друкованого органу МТГ/ISSS як частина Міжнародного науково-агрономічного огляду Міжнародного сільськогосподарського інституту (Рим). Отже у 1925 та 1926 рр. щоквартально виходили друком відомості МТГ/ISSS «Neue Folge» (переклад — «Новий епізод»), але наприкінці 1926 р. Інститут письмово повідомив, що не може видавати журнал на встановлених фінансових умовах і просив віднайти нові можливості вирішення проблеми.



Створення Міжнародного Товариства Ґрунтознавців, Рим, 19.05.1924 (Джерело: Bulletin of the International Society of Soil Science. Bulletin de L'association International du La Scienccee du Sol. Mitteilunggeng der Internationalhn Bodenkundlichen Gesellschaft. Amsterdam: Übukkeru Systema B.V., 1974. № 45. P.11)

Після створення Міжнародного товариства ґрунтознавців особливо розширилися рамки роботи БУґ в СРСР. Тепер, на прохання Центрального Секретаріату МТГ/ISSS, Бюро прийняло на себе посередництво між ним і членами Товариства, які мешкали в СРСР. До складу Бюро увійшли українські вчені Г. Г. Махов (Харків) та Ф. І. Левченко (Київ) [20].

V Всесоюзний з'їзд ґрунтознавців (1926)

Важливим для свого часу форумом став V Всесоюзний з'їзд ґрунтознавців, який відбувся 10–16 січня 1926 р. в Москві за участю 250 делегатів. Головним із питань, що розглядалися, була участь ґрунтознавців СРСР у I Міжнародному Конгресі ґрунтознавців у Вашингтоні у 1927 р., а також піднімалися питання щодо організації дослідних кафедр та інститутів ґрунтознавства при вищих навчальних закладах, зокрема й технічних, і про видання найбільш цінних наукових праць та матеріалів А. І. Набокова, виконання останнього покладалося на Г. Г. Махова [20, с. 50].

Результати роботи українських вчених були представлені на з'їзді в численних доповідях. Так, у Переліку доповідей V Всесоюзного з'їзду ґрунтознавців від 15 грудня 1925 р. [21] було заявлено такі: Д. Г. Віленський (Харків) «Проблеми створення генетичної класифікації ґрунтів», «ґрунти Терського округу та пов'язані з ними питання»; П. А. Костюченко (Ічня) «Про постановку викладання ґрунтознавства у школах профосвіти сільськогосподарського типу»; В. І. Крокос (Одеса) «Час походження Українського лесу», «Вікові коливання у Нижньодніпровському районі та пов'язане з ними засолення ґрунтів, що прогресує»; Є. Лавренко (Харків) «Рослинність Нижньодніпровських пісків»; Г. Г. Махов (Харків) «Масштаб ґрунтових зйомок у зв'язку з завданнями вивчення ґрунтового покриву», «ґрунти Донбасу (Результати робіт 1925 р.)», «Нижньодніпровські піски (Робота 1925 р.)», «Найголовніші моменти морфології і географії ґрунтів України»; Г. І. Танфільєв (Одеса) «Про ґрунтову карту кол. Херсонської губернії».

Особливої схвальної реакції здобули доповіді Г. Г. Махова, як констатація значущих успіхів українських ґрунтознавців в обстеженні й картографуванні ґрунтів України. Вчений представив вагомі висновки з експедиційних досліджень ґрунтового покриву Донбасу: про лісостеповий характер області Донецького кряжу, дочетвертинний вік материнських порід, морфологічні характеристики чорноземів, і заключення про те, що своєрідне співвідношення висот місцевості призвело тут до утворення вертикальних ґрунтових підзон — південного, звичайного і глибокого чорноземів [22].

У доповіді Г. Г. Махова про результати експедиції з обстеження Нижньодніпровських (Олешківських) пісків було розкрито походження й еволюцію піщаних арен, закономірності руху пісків, характеристики ґрунтів міжаренних проміжків і лесової тераси, ґрунтів подів та інше [23].

У доповіді Д. Г. Віленського [24] з класифікації ґрунтів було представлено чітку систему таксономічних одиниць з наданням конкретного змісту поняттю «тип» ґрунтового покриву, під яким слід розуміти сукупність ґрунтів з близькими морфологічними ознаками навіть за різного географічного положення. Однією з позитивних рис своєї схеми класифікації доповідач назвав її генетичність, простоту і водночас місткість, і те, що вона забезпечує можливість передбачити ще не описані типи ґрунтів і прогнозувати їхні ознаки. Важливо, що «вона дає можливість перейти до позначення ґрунтів літерними символами у вигляді ґрунтових формул».

Обговорюючи доповідь Д. Г. Віленського делегати відмічали важливість спільного вивчення похованих реліктів ґрунтоутворювальних процесів разом з археологами.

На з'їзді було винесено пропозицію щодо «видання праць українських ґрунтознавців, за можливості, ще й російською мовою» [20].

Рішенням з'їзду О. Н. Соколовського було обрано членом постійної комісії з розробки методів хімічного та фізичного дослідження ґрунтів та доручено йому зведення матеріалів щодо використання центрифужного методу механічного аналізу ґрунтів [20].

До складу новоствореної постійної комісії з розробки єдиної класифікації та номенклатури ґрунтів увійшли Д. Г. Віленський, Ф. І. Левченко та Г. Г. Махов [20]. Також двох останніх, рішенням з'їзду, було введено до складу Бюро БУГ.

Пленум Бюро уповноважених ґрунтознавців (1926)

Вже 17 січня 1926 р. у Москві було скликано пленум БУГ. Головним питання зібрання була підготовка до I Міжнародного Конгресу ґрунтознавців, тому було ухвалено відповідні рішення. На українських вчених покладалося складання колекції ґрунтових карт, планів, та профілів зональних ґрунтів різних типів. Запис у постанові пленуму: «... ґрунтова карта УСРР (масштабу 25 верст у дюймі), якщо не буде до того часу видана, виготовити спеціальний екземпляр — куратор Г. Г. Махов» [25, с. 74]. Для створення рисунків ґрунтів основних типів у кольорах та складання ґрунтових профілів пропонувалося «... використати успішні спроби в цьому напрямі Г. Г. Махова» [25. С. 75].

Всесоюзний з'їзд геологів у Києві (1926)

Цікавим фактом в історії українського ґрунтознавства є участь у Всесоюзному з'їзді геологів, який проходив у Києві з 30 вересня до 6 жовтня 1926 р. Від ґрунтознавців України виступив з вітальним словом професор В. Крокос (Одеса), який наголосив на особливій зацікавленості роботою з'їзду, бо одним з питань, які розглядалися, було дослідження четвертинних відкладів, як найбільш розповсюдженої ґрунтотвірної породи на території України. Було відмічено семирічну роботу українських вчених із систематичного вивчення лесу. Пізніше В. Крокос у доповіді «Методика вивчення четвертинних відкладів України» підкреслив необхідність їх дослідження шляхом глибоких штучних шурфів на плато, з огляду на те, що природні відслонення, які обстежували на схилах, не надавали правильної картини та не містили повної серії четвертинних нашарувань [26].

У другій доповіді професор В. Крокос вказував на чотири яруси лесу, які спостерігалися всюди в Україні — від північного заходу Полтавщини (Лубни, Лохвиця) до Чорного моря. Другий ярус лесу залягав частково над мореною Дніпровського зледеніння, частково під нею, тобто морена вклинювалася в цю частину лесу. Вчений звернув увагу спільноти на те, що верхній ярус лесу причорноморської смуги заходив навіть під рівень моря.

Професор московського університету Г. Ф. Мирчинк підтримав погляди українських ґрунтознавців, які визнавали льодовиковий вік лесу. У доповіді «Стратифікація четвертинних відкладів заходу СРСР» він навів факти тісного зв'язку верхнього ярусу лесу з флювіогляціальними відкладами останнього зледеніння, які спостерігав у Чернігівській губернії.

Професор Д. Н. Соколов у доповіді «До морфології льодовикових та прильодовикових відкладів України та сусідніх країн» вказував, що в Україні спостерігаються ті самі зони льодовикових відкладів, які раніше були вказані для Німеччини та Польщі.

Професор П. А. Двойченко (Крим) зробив доповідь «Історія та генезис Чорного моря». Опираючись на великий фактичний матеріал, який було зібрано в районі Таврії, доповідач описав третинну та четвертинну історії Чорноморського басейну.

Професор Б. Личков у своїй доповіді «Тірренська тераса Дніпра та Черкаська безвалунна область» охарактеризував надзвичайно широку лівобережну терасу р. Дніпро на території Полтавщини, яка покрита моренними відкладами та відноситься до Дніпровського зледеніння. Вчений підкреслював факт відсутності морени у частині тераси між річками Дніпро та Тясмин.

В. В. Резниченко (Київ) у доповіді «Про стародавні пустелі на території Середньої України» надав докази існування міжльодовикових та післяльодовикових пустель України.

Після з'їзду було проведено екскурсії до м. Канів, Поділля та Волині.

Сесія I Міжнародної комісії з фізики та механічного аналізу ґрунту (1926)

14–20 жовтня 1926 р. у Ротамстеді проходила робота I Міжнародної комісії з фізики та механічного аналізу ґрунту, у якій брав участь О. Н. Соколовський. Після повернення, ділячись своїми враженнями від поїздки у науковій статті [27], вчений відмітив високу зацікавленість англійців досягненнями вітчизняного ґрунтознавства та власне О. Н. Соколовського, як його представника.

Роботу комісії було присвячено напрацюванню домовленостей щодо методики механічного аналізу ґрунту для того, щоб результати аналізу можна було використовувати в різних країнах, а не лише у тій, де його виконано, щоби дані давали достовірну картину складу ґрунту, а сам метод був би простим для виконання, що важливо у масових аналізах.

Окрім методики підготовки зразків до аналізування, яка за думкою О. Н. Соколовського, не була новою для вітчизняних ґрунтознавців, вченого більше зацікавило визнання групою колег та комісією рівноцінності зі звичайними методами аналізу (осадження або відмулювання у висхідному струмені) методу піпетування, запропонованого професором Краусом (G. A. Krauss). Цей метод значно спрощував механічний аналіз і був доступним у застосуванні. Обговорювалася також і придатність методу з використанням центрифуги, який за результатами досліджень Новака (V. Novak) і Йозефа (A. P. Joseph) та інших, виявився цілком співставним з седиментаційним методом [27].

VI Всесоюзний з'їзд ґрунтознавців (1927)

Роком пізніше, 5–13 січня 1927 р., відбувся VI Всесоюзний з'їзд ґрунтознавців у Ленінграді з 485 учасниками. На порядку денному обговорювалося те саме питання — проведення підготовчих робіт до конгресу у Вашингтоні. Було заслухано 68 наукових доповідей [28].

На з'їзд прибули і президент МТГ/ISSS J. G. Lipman (Нідерланди) і віцепрезидент D. J. Hissink (США). Їх присутність була дуже важливою у зв'язку з уже розпочатою підготовкою до проведення у 1930 р. в Росії наступного, II Міжнародного Конгресу.

Постановою з'їзду затверджено список із 15 делегатів на I Міжнародний Конгрес у Вашингтоні з розподілом по секціях: Секція фізичних властивостей — В. В. Гемерлінг; Хімії — К. К. Гедройц, О. Н. Соколовський, І. В. Тюрин; Мікробіології — В. Л. Омелянський; Родючості — Н. М. Тулайков, С. П. Кравков; Номенклатури і картографії — Л. І. Прасолов, Я. Н. Афанасьєв; Обробітку — Н. А. Дімо, С. П. Кравков.

Вирішено створити редакційну колегію для видання англійською і російською мовами збірника текстів основних доповідей на Конгресі.

Окремим пунктом у постанові було відмічено досягнення ґрунтознавства в Україні, представлені у доповіді Г. Г. Махова (Харків) «Основні моменти генезису і географії ґрунтів України та їх урахування в картографічній і агрономічній роботі», стосовно вивчення провінційних і районних різновидів чорнозему у зв'язку з орографічними і кліматичними особливостями районів. Визнано дуже важливим досвід українських ґрунтознавців у дослідженні властивостей ґрунтів у різних підзонах з урахуванням агрономічної складової. Висловлено побажання

обов'язково представити на майбутньому Конгресі результати як картографічних робіт, так і закінченого вже обстеження ґрунтів 33-х дослідних станцій України. При цьому, слід звернути увагу на те, що Г. Г. Махова не було включено до списку делегатів.

За доповіддю на з'їзді Є. М. Лавренка (Харків) «Основні риси рослинності України» визнано необхідним якнайшвидше опублікування цієї роботи російською мовою. Також висловлено рекомендацію чимскоріше видати російською мовою 4-й том «Географії Росії і України» проф. Г. І. Танфільєва (Одеса).

Постановили наступний VII Всесоюзний з'їзд ґрунтознавців зібрати у 1928 р. в Україні. Але пізніше місце зібрання було змінено.

Під час з'їзду було проведено декілька засідань БУГ спільно зі спеціальною комісією з підготовки матеріалів для демонстрації на Конгресі. Від України треба було представити ґрунтову карту, ґрунтові моноліти, які «... бажано монтувати за способом Д. Г. Віленського. Просити Віленського для цього прибути в Ленінград». Моноліти чорнозему, підзолистих і каштанових ґрунтів та солонця планувалося демонструвати як ілюстрації до доповідей [28, с. 60–61].

На засіданні БУГ 2 березня 1927 р. було переглянуто список делегатів на Конгрес у зв'язку з виділенням коштів РНК Союзу. Тепер кількість делегатів було зменшено до 14 і не всі відрядження підтримувалися державним коштом. Від України обрано ще одного делегата — О. Н. Соколовського за умови, що його поїздку фінансуватиме Українська АН [28, с. 63].

I Міжнародний конгрес ґрунтознавців (1927)

I Міжнародний конгрес ґрунтознавців проходив з 13 до 22 червня 1927 р. у Вашингтоні. Його було організовано, як повідомляє А. Е. Hartemink [29], МТГ/ISSS, Американським товариством агрономів і Департаментом сільського господарства США (USDA). Головними організаторами були Jacob Lipman (президент Конгресу) і Curtis Marbut. На Конгресі були присутніми делегати з 31 країни світу [29].



Іноземні делегати I Міжнародного конгресу ґрунтознавців, Вашингтон, 1927 (Джерело: Proceedings and papers of the First International Congress of Soil Science (June 13-22, 1927, Washington, D.C, USA.). Washington, 1928. P. XXII)

На цьому заході ґрунтознавців СРСР було введено до МТГ/ISSS, що знаменувало новий етап розвитку міжнародних відносин. Число учасників від СРСР становило 21, в тому числі, 2 від України і обидва з Харкова — професор О. Н. Соколовський, керівник Науково-дослідної кафедри ґрунтознавства у Харківському сільськогосподарському інституті і професор Д. Г. Віленський, завідувач секції геоботаніки цієї кафедри (1924–1930) [29, 30]. Загалом Оргкомітет

отримав 361 статтю (тези), більшість — до комісій з біології та біохімії, класифікації, номенклатури і картографування [29].

У своїй статті у «Віснику природознавства» (1927) [30] Д. Г. Віленський докладно описав всі події Конгресу і додав декілька власноруч зроблених фото.

З привітальною промовою виступив президент США Calvin Coolidge, підкресливши надзвичайну важливість Конгресу з огляду на виключну значущість ґрунту в людському житті і докладно зупинившись на зусиллях Уряду США для розвитку науки у галузі сільського господарства і ґрунтознавства зокрема. Закінчив він свою промову побажанням «... щоб іноземні вчені поділилися своїми знаннями з американськими, наука бо не знає національних меж і досягнення її служать всьому світові...» [30, с. 70].

Після відкриття одразу розпочалася робота у 6 секціях. Офіційними мовами Конгресу вважалося 5: англійська, німецька, французька, італійська та іспанська. Короткі резюме доповідей (2-ма або 3-ма мовами) опубліковані у 3-х томах. З оголошених 400 доповідей на Конгресі було заслухано більшу частину. Прийнято рішення всі матеріали видати у вигляді «Праць Конгресу» у 5 томах.

Серед заслуханих на пленарних засіданнях була доповідь К. Д. Глінки «Коротка історія ґрунтознавства в Росії».

За оцінкою Д. Г. Віленського, Конгрес «... безумовно займе почесне місце як в історії ґрунтознавства, так і в історії інтернаціональних наукових об'єднань взагалі» [30]. На всій роботі Конгресу відчувався «... вплив нових ідей, зокрема доучаєвської, або, як її називають в Америці, "профільної" школи ґрунтознавства» [30].

Знаковою подією для України та всього колишнього СРСР стало те, що вперше на Міжнародному Конгресі була представлена перша 25-колірна детальна карта ґрунтів України на новій генетичній основі в масштабі 1:1 000 000 з текстом українською та англійською мовами, складена професором Г. Маховим, хоча серед делегатів Конгресу його не було.

Після закінчення засідань всі делегати виїхали у 30-денну польову екскурсію (trans-continental excursion) для дослідження різних типів ґрунтів у різних природних зонах на території США і Канади, огляду сільськогосподарських коледжів, дослідних станцій та окремих ферм. Матеріали, зібрані за маршрутом екскурсії, карти, фото учасників та їхні враження описані в окремому томі Конгресу [31].

В офіційному путівнику, складеному для членів Міжнародного конгресу, надруковано статтю доктора W. W. Weir (представник USDA), в якій викладено нове (на той час) розуміння ґрунту: «ґрунт — це природно-динамічне тіло, продукт ґрунтоутворювальних факторів. Найголовнішими факторами генезису ґрунтів є клімат і життєві ("біотичні") впливи; первинний склад, характер і відношення породи до води і повітря є другим рядом факторів, що визначають властивості ґрунту. "Нова" концепція ґрунту робить можливою природну класифікацію ґрунтів і розвиток ґрунтознавства. Російські ґрунтознавці були піонерами в розвитку цієї концепції, але Сполучені Штати йдуть на чолі всіх інших країн у справі класифікації та картографування ґрунтів. Раніше на ґрунт дивилися, як на кінцевий продукт вивітрювання гірських порід (пісок, глина, мул), через що не було можливості скласти природну класифікацію ґрунтів.» [32, с. 60].

Підсумовуючи результати Конгресу Д. Г. Віленський так описав успішність роботи української делегації: «Крім Бюро ґрунтознавців у Вашингтоні, багатьох університетів і сільськогосподарських коледжів та численних дослідних станцій, українська делегація встановила зв'язок, з метою налагодження регулярного обміну виданнями та різними матеріалами, з низкою інших установ Америки: різними відділами Bureau of Plant Industry у Вашингтоні (ботанічним, у справах вивчення солонців, сухого хліборобства, інтродукції чужоземних рослин та інтеграції), з Geological Survey, зі Смітсонським Інститутом, та Інститутом Бойс-Томпсона біля

Нью-Йорку, з Бруклінським Ботанічним Садам, з Американським Географічним Товариством, з Американським Товариством Культурного зв'язку з Радянським Союзом, і нарешті, з деякими українськими громадськими організаціями Америки, зокрема – з Союзом Українських Робітничих Організацій в Нью-Йорку» [30, с. 76].

Конгресом було ухвалено місце і дату проведення наступної зустрічі — м. Ленінград, 1930 р. Президентом майбутнього конгресу та МТГ/ISSS терміном на три роки обрано академіка К. Д. Глінку. Віцепрезидентом Першої Комісії МТГ/ISSS у справі вивчення механічного складу і фізичних властивостей ґрунту обрано професора О. Н. Соколовського.

Реакцією уряду СРСР щодо організації та проведення II Міжнародного Конгресу ґрунтознавців на теренах Радянського союзу стала постанова РНК СРСР від 18 травня 1926 р. «Про скликання Міжнародного Конгресу з ґрунтознавства в 1930 р. на теренах СРСР» та доповнення до неї, в якому було оголошено склад Комісії (з представників московської інтелігенції) щодо спостереження за організацією майбутнього заходу. До складу виконавчого бюро було введено лише одного представника з України — харківського (на той час) вченого Д. Г. Віленського, на нього було покладено кураторство видавничою діяльністю [33].

Пленум Бюро уповноважених ґрунтознавців СРСР (1927)

Усю підготовчу роботу з проведення II Міжнародного Конгресу було покладено на БУГ, тому вже 28–30 грудня 1927 р. в Москві відбувся його черговий пленум. Від УСРР був присутнім Г. Г. Махов (Харків) і також був запрошеним, але не приїхав за невідомих причин, Ф. І. Левченко (Київ) [34]. На цьому засіданні ухвалено рішення провести опитування, шляхом анкетування ґрунтознавців, і за результатами обрати кандидата у Президенти МТГ/ISSS (через раптову смерть академіка К. Д. Глінки, обраного Президентом на I Конгресі у Вашингтоні). Найбільш бажаним кандидатом вважався К. К. Гедройц. У випадку відмови останнього, рекомендовано обрати одного з таких осіб — професорів А. А. Ярилова, С. А. Захарова або академіка В. І. Вернадського [34].

Також пленум БУГ постановив утворити Центральний та республіканські організаційні комітети. Піднімалося питання про створення окремої секції МТГ/ISSS — Організації об'єднання слов'ян — членів міжнародного Товариства. Ця ідея була висунута членами попереднього Вашингтонського Конгресу слов'янського походження з огляду спільності та легкості розуміння слов'янських мов, але, з огляду на те, що сама ідея створення такої організації порушувала принципи єдності Товариства, пропозицію було відхилено. У той же час, пленум БУГ ініціював створення Всесоюзного центру ґрунтознавців з міжнародним характером роботи [34].

У бесіді доктора D. J. Hissink з академіком В. І. Вернадським (від 22 квітня 1928 р.) щодо організації наступного Міжнародного Конгресу ґрунтознавців йшлося про те, що Організаційний комітет Конгресу повинен обиратися членами МТГ/ISSS саме з тієї країни, де збирається Конгрес. Комітет повинен бути тісно пов'язаний з Президією МТГ/ISSS (Гронінген, Нідерланди) та з головами Міжнародних комісій, але вся відповідальність покладається на Організаційний Комітет [35].

Всеукраїнська нарада ґрунтознавців у Харкові (1928)

Наступним вагомим кроком у справі єднання вітчизняної ґрунтознавчої спільноти стала Всеукраїнська нарада ґрунтознавців, скликана і проведена Науково-дослідною катедрою ґрунтознавства при Харківському сільськогосподарському інституті 28–29 травня 1928 р. у Харкові. На нараду з'їхалися 32 представники 22 установ з різних регіонів України: науково-дослідних

кафедр ґрунтознавства і лісівництва, сільськогосподарських інститутів і політехнікумів, дослідних станцій та інших наукових закладів. У порядку денному наради стояло чотири основних доповіді: 1. О. Н. Соколовський «Завдання і програми викладання ґрунтознавства у ВИШах України»; 2. Д. Г. Віленський «Чергові завдання у справі дослідження ґрунтів України»; 3. М. К. Крупський «Організація Українського товариства ґрунтознавців»; 4. Д. Г. Віленський «Підготовчі роботи у справі організації II Міжнародного Конгресу ґрунтознавців» [36].

Окрім питань, пов'язаних з навчальним процесом і викладанням ґрунтознавства в українських вишах та нагальних завдань у дослідженні ґрунтів республіки, стало питання щодо створення й організації діяльності **Українського товариства ґрунтознавців** на тлі активних підготовчих робіт до запланованого у 1930 р. II Міжнародного конгресу ґрунтознавців у СРСР. У своїй доповіді «Організація українського товариства ґрунтознавців» М. К. Крупський наголосив на необхідності заснування товариства ґрунтознавців як спеціального органу науково-громадської думки і запропонував, для розгляду учасниками наради, тези проекту Статуту майбутнього товариства [37, 38].

Цілком погодившись із думкою доповідача нарада на вечірньому засіданні 29 травня 1928 р. за головування О. Н. Соколовського одногolosно затвердила проект Статуту Всеукраїнського Товариства ґрунтознавців і всі учасники наради стали першими його членами. Для керування справами Товариства було обрано тимчасове Бюро у складі: проф. О. Н. Соколовського, проф. Ф. І. Левченка, проф. Д. Г. Віленського, М. М. Годліна, О. О. Іллічевського, Т. М. Германова, М. К. Крупського. Почесним Головою товариства обрано проф. Г. М. Висоцького, а почесними членами — К. К. Гедройця, і проф. Г. І. Танфільєва. Детальні протоколи Наради опубліковано в «Трудах науково-дослідної кафедри ґрунтознавства» [37].

Як відомо зі зведення інформації про історію національних організацій—членів Міжнародного союзу ґрунтознавства у виданні за редакцією Dr. Rainer Horn, Dr. Winfried Blum, and Dr. Laura Bertha Reyes-Sánchez [6], створення Міжнародного товариства ґрунтознавства (MTГ/ISSS) у 1924 р. активізувало національні зусилля. Але на момент історичної для українських ґрунтознавців наради, ініційованої Науково-дослідною кафедрою ґрунтознавства, очолюваною академіком О. Н. Соколовським, у світі було засновано лише декілька національних товариств. Першим стало Німецьке товариство ґрунтознавства (Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, DBG), засноване 24 лютого 1926 р. в Берліні як секція Міжнародного товариства ґрунтознавства (ISSS). Потім, вже після I Конгресу, ініціативу підхопила Японія (Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition, 1927), українські ґрунтознавці створили своє товариство 29 травня 1928 р. і через півроку (7 грудня 1928) національне товариство було створено в Данії (Danish Soil Science Society) [6].

Важливість цієї травневої наради у Харкові ще й у тому, що у промові Д. Г. Віленського «Чергові завдання у справі дослідження ґрунтів України» висловлено загальну думку ґрунтознавців щодо необхідності організації **Українського Інституту Ґрунтознавства** заради раціональної спланованості ґрунтознавчих робіт та упорядкування і погодженості методик досліджень. Нарада ухвалила Проект Інституту, розроблений науково-дослідною кафедрою ґрунтознавства, і звернення до НКО та Наркомзему щодо скорішого затвердження Статуту і Проекту аби «...з 1-го жовтня поточного року Інститут міг розпочати роботу» [37, с. 221].

За доповіддю Д. Г. Віленського, який ознайомив учасників з протоколами Пленуму Всесоюзного організаційного Комітету щодо підготовки до проведення II Міжнародного Конгресу ґрунтознавців та проекту екскурсійного маршруту, нарада

ухвалила організувати по місцях на території України, де буде проходити маршрут, «осередки сприяння що мають провести підготовчу роботу» [36].

3. Заключення

Усі міжнародні й національні наукові форуми ґрунтознавців були і є дієвою формою будь-якого співробітництва. Вони надавали можливість вченим обмінюватися передовими думками, полемізувати та, досягнувши наукового консенсусу, розробляти й вдосконалювати методичні підходи до польових і лабораторних досліджень, і тим самим розвивати як теоретичні, так і практичні основи ґрунтознавства як науки.

Створення у 1924 р. Міжнародного товариства ґрунтознавців (МТГ/ISSS) зумовило необхідність ухвалення важливих рішень щодо організації відповідних галузевих товариств всесоюзного та республіканського рівнів у колишньому СРСР. Значну частину організаційної роботи виконувало, створене з цією метою, Бюро уповноважених ґрунтознавців, у роботі якого брали участь відомі українські вчені.

Найвагомішим вітчизняним форумом залишається Всеукраїнська нарада ґрунтознавців, яка була скликана і проведена під егідою науково-дослідної кафедри ґрунтознавства при Харківському сільськогосподарському інституті 28–29 травня 1928 р. у Харкові. Головним рішенням зібрання стало затвердження Статуту новоствореного Українського товариства ґрунтознавців (УТГ) і списку перших його членів.

У статті розкрито діяльність українських вчених Г. Г. Махова, О. Н. Соколовського, Д. Г. Віленського, Г. М. Висоцького, Ф. І. Левченка, В. І. Крокоса, М. К. Крупського та інших (всього згадано 25 прізвищ) у справі створення УТГ і розбудови системи національної консолідації знань про ґрунти.

Отже, аналіз офіційних документів дає підставу стверджувати, що сучасна галузева громадська організація — Українське товариство ґрунтознавців та агрохіміків, член Міжнародного союзу ґрунтознавців (ISSS/IUSS) є правонаступником Українського товариства ґрунтознавців, яке було створене 97 років тому у Харкові, тобто через чотири роки після утворення МТГ/ISSS. Точною датою створення УТГ, на нашу думку, треба вважати 29 травня 1928 р., коли одноставним голосуванням було затверджено Статут Товариства і перший список його добровільних членів.

Список використаних джерел

1. Costantini E. A. C. 100 years of Soil Sciences: Centennial Opening Speech. *IUSS Bulletin*. 2024. 144. P. 17–19. URL: <http://www.iuss.org/> (date of application: 20.04.2025).
2. Hartemink A. E. On global Soil Science and regional solutions. *Geoderma Regional*. 2015. Vol. 5. August. P. 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.02.001>
3. van Baren H., Hartemink A. E., Tinker P. B. 75 years the International Society of Soil Science. *Geoderma*. 2000 Vol. 96(1–2). P. 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00097-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00097-X)
4. Hartemink A. E. Early international connections in the development of Soil Science. *Centennial Celebration and Congress of the International Union of Soil Sciences* (Florence – Italy May 19–21, 2024). Abstract book. P. 31. URL: https://drive.google.com/file/d/1mcbITzR1wfY1b4vLAaceHAyg_y_K3vzq/view (date of application: 20.04.2025).
5. Hartemink A. E. 90 years IUSS and global soil science, *Soil Science and Plant Nutrition*. 2015. Vol. 61(4). P. 579–586. <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1055699>
6. Horn R., Blum W., Reyes-Sánchez L. B. (eds.). The International Union of Soil Sciences: A Centennial documentation of its national members. *International Union of Soil Sciences (IUSS)*. Rome, Italy. 2024. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.iuss.org/wp-content/uploads/2024/06/CENTENNIAL-1-5-2024-fabbri.pdf> (date of application: 20.04.2025).
7. Хроника. *Почвоведение*. 1907. № 3. С. 349–354.
8. Глинка К. Д. Первая агрогеологическая конференция в Будапеште. *Почвоведение*. 1909. № 2. С. 125–140.
9. Hissink D. J. Kurze Skizze der Geschichte der internationalen Bodenkundlichen Gesellschaft. *Pedology*. 1928. № 1–2. С. 155–161.
10. Пятая годовщина Бюро уполномоченных почвоведов СССР. *Бюллетени почвоведов*. 1926. № 1. С. 5–6.
11. Тихоненко Д. Г., Вергунов В. А., Горін М. О., Новосад Н. М. Ґрунтознавство в Україні: історія та сучасність: монографія / за ред. Д. Г. Тихоненка. Харків: Майдан, 2016. С. 47–48.

12. Пашківська О. А. Роль I-го Всеукраїнського з'їзду у справі вивчення продуктивних сил та народного господарства України у вирішенні проблем ґрунтознавства в середині 20-х рр. XX ст. *Історія науки і біографістика*. 2015. № 1. URL: <https://inb.dnsgb.com.ua/2015-1/11.pdf> (дата звернення: 15.03.2025).
13. Sokolowsky A. N. Über eine neue methode der chemizch-mechanizchen bodenanalyse. *Actes de la IV Conference Internationale de Pedologie (Rome, 12-19 mai 1924)*. Rome, 1926. Vol. II: I et II comissions. P. 177–180.
14. Mahoff G. G. Questions de L'Evolution du Sol de L'Ukraine. *Actes de la IV Conference Internationale de Pedologie (Rome, 12-19 mai 1924)*. Rome, 1926. Vol. III: III, IV, V, VI comissions. P. 482.
15. Mahoff G. G. Carte des Sols de L'ukraine, Echelle:10 Verstes en Pouces Anglais. *Actes de la IV Conference Internationale de Pedologie (Rome, 12-19 mai 1924)*. Rome, 1926. Vol. III: III, IV, V, VI comissions. C. 528.
16. Krokos W. Le Loess et Les Sols Fossiles du Sud-Ovest de L'ucraïne. *Actes de la IV Conference Internationale de Pedologie (Rome, 12-19 mai 1924)*. Rome, 1926. Vol. III: III, IV, V, VI comissions. P. 482.
17. Krokos W. Sur la question de la classification du tchernoziom (terre noire) dans le midi de l'Ukraine. *Actes de la IV Conference Internationale de Pedologie (Rome, 12-19 mai 1924)*. Rome, 1926. Vol. III: III, IV, V, VI comissions. P. 481.
18. Frolov N. Die Bodenkartographische Arbeiten In der Ukraine. *Actes de la IV Conference Internationale de Pedologie (Rome, 12-19 mai 1924)*. Rome, 1926. Vol. III: III, IV, V, VI comissions. P. 528.
19. Frolov N. Sur La Methode Nabokich (a trois phases) De Travaux Sur Le Terrain. *Actes de la IV Conference Internationale de Pedologie (Rome, 12-19 Mai 1924)*. Rome, 1926. Vol. III: III, IV, V, VI comissions. P. 528.
20. Постановления V Всесоюзного съезда почвоведов. *Бюллетени почвоведа*. 1926. № 2–4. С. 50–55.
21. Список докладов V Всесоюзного Съезда почвоведов. *Бюллетени почвоведа*. 1926. № 2–4. С. 11–15.
22. Махов Г. Г. Почвы Донбасса. Тезисы. *Бюллетени почвоведа*. 1926. № 1. С. 38.
23. Махов Г. Г. Почвы песчаного Нижне-Днепровья (Алешковские пески). Тезисы. *Бюллетени почвоведа*. 1926. № 1. С. 38.
24. Виленский Д. Г. Проблема создания генетической классификации почв. Тезисы. *Бюллетени почвоведа*, 2026. №1. С. 16–17.
25. Сообщения Бюро уполномоченных почвоведов СССР. Постановления Пленумов Бюро. *Бюллетени почвоведа*. 1926. № 2–4. С. 72–78.
26. Всесоюзный съезд геологов в Киеве 30/IX – 6/X 1926. *Почвоведение*. 1926. № 1. С. 104–105.
27. Соколовский А. Н. I Международная комиссия по физике и механическому анализу почвы. Заседания 14–20 октября 1926 г. *Почвоведение*. 1927. № 3. С. 106–111.
28. Постановления 6-го Всесоюзного съезда почвоведов, 1927 г. *Бюллетени почвоведа*. 1927. № 1–2. С. 47–58.
29. Hartemink A. E. First International Congress of Soil Science 1927. *Soil Science Americana (Chronicles and Progressions 1860-1960)*. Springer International Publishing, 2021. P. 385–434. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71135-1_11
30. Віленський Д. Г. Перший міжнародний конгрес ґрунтознавців в Америці. *Вісник природознавства*. 1927. № 2. С. 69–76.
31. Proceedings and papers of the First International Congress of Soil Science (June 13–22, 1927, Washington, D. C, U. S. A.) Transcontinental Excursion and Impressions of the Congress and of America. Edited by S. A. Waksman and R. B. Deemer. Washington, 1928. 198 p. URL: https://old.iuss.org/index.php%3Frex_media_type=download&rex_media_file=first_internat_congress_of_soil_science_v ol_i_1927_compressed.pdf (date of application: 20.04.2025).
32. Веир В. В. Новый взгляд на почву: извлечение из статьи д-ра В. В. Веир в официальном Путеводителе для членов I Международного Конгресса почвоведов в Вашингтоне в 1927 г. *Бюллетени почвоведа*. 1927. № 3–7. С. 60–62.
33. Решения Правительства СССР по II Международному Конгрессу почвоведов. *Бюллетени почвоведа*. 1928. № 3–7. С. 127.
34. Протокол заседания Пленума Бюро Уполномоченных почвоведов Союза 28, 29 и 30 декабря 1927 г. *Бюллетени почвоведа*. 1927. № 58. С. 149–154.
35. Резюме беседы д-р Хиссинка с акад. Вернадским 22 апр. 1928 г. *Бюллетени почвоведа*. 1928. № 3–7. С. 135–136.
36. З матеріалів 1-ої Всеукраїнської наради ґрунтознавців 28-29.05.1928 р. (Конаков М. К. укладач). *Труди науково-дослідної катедри ґрунтознавства* / за ред. акад. О. Соколовського. Харків, 1930. Т. 1. С. 211–222.
37. Крупський М. К. Перша всеукраїнська нарада ґрунтознавців. *Вісник сільськогосподарської науки та досвідної справи*. 1928. Т. V. № 5. С. 136–138.
38. Кунець В. В., Лактіонова Т. М., Парасочка І. Ф. Професор М. К. Крупський (1903–1986): життєвий шлях та головні віхи наукової творчості. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків: 2024. Вип. 96. С. 58–74. <https://doi.org/10.31073/acss96-07>

UDC 636.4:061.2:005.745(477)(091)

The Ukrainian path in the history of the creation of the International and National Soil Science Societies (1907–1928) (review)

V. V. Kunets ✉, T. M. Laktionova, I. F. Parasochka

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

✉ victoriya.viva@ukr.net

Received 12.03.2025; Revised 12.05.2025; Accepted 17.06.2025; Available online 01.07.2025

The article examines the history of the origin of the idea of uniting the world soil science scientific community, reveals scientific and organizational approaches for the development of Pedology as an independent science. The results of the work of the first specialized scientific forums convened with the purpose of creating the International Society of Soil Science (ISSN/ISSS) and later the Ukrainian Society of Soil Scientists (USS) are analyzed. The sequence of events in

the development of sectoral scientific thought was traced and the dynamics of changes in its priority areas were revealed, and the Ukrainian component was highlighted. The chronological boundaries of the study include the years 1907–1928 – starting with the first meeting of the scientific community in the former Russian Empire, at which it was decided to hold periodic congresses of soil scientists, and the First International Agrogeological Conference to the All-Ukrainian Conference of Soil Scientists (1928), which became a decisive step to the All-Ukrainian Conference of Soil Scientists (1928), which became a decisive step in the creation of a national Society of Soil Scientists in Ukraine. World Congresses and between them international and national conferences, congresses and numerous meetings allowed scientists to exchange opinions, reach scientific consensus and thereby develop and improve the methodological and theoretical foundations of Soil Science. Scientific discussions and joint field excursions, as traditional attributes of the meetings, were also a necessary addition to the research process. Thus, through joint efforts in the creative work of soil science teams of different generations and countries, the main directions of research, scientific provisions and hypotheses were crystallized. To ensure the sequence of events, the material is presented in chronological order. The activities of Ukrainian scientists G. G. Makhov, O. N. Sokolovsky, D. G. Vilensky, G. M. Vysotsky, F. I. Levchenko, V. I. Krokos, M. K. Krupsky and others in creating the Ukrainian Society of Soil Scientists and developing a system of national consolidation of knowledge about soils are revealed. Important documents for covering this topic were periodical scientific publications of the period under study. Primary importance was given to the study of published official documents of scientific and public organizations and government agencies - decrees, protocols, decisions of scientific forums and meetings. This became the basis for clarifying individual contradictory points in the description of historical events and helped to reveal the logic of their sequential series and enrich them with real thematic content. The material is supplemented with personal memories and impressions of scientists about participation in individual world-class events. An important result of the study is the specification of the process of evolution of a modern public organization – the Ukrainian Society of Soil Scientists and Agrochemists. In fact, the date of its foundation has been proven.

Keywords: soil science; history; congress; conference; national congress; meeting; Ukraine

Citing: Kunets, V. V., Laktionova, T. M., & Parasochka I. F. (2025). The Ukrainian path in the history of the creation of the International and National Soil Science Societies (1907–1928) (review). *AgroChemistry and Soil Science*, 98, 91–108. doi:10.31073/acss98-07 [in Ukrainian].

References

1. Costantini, E. A. C. (2024). 100 years of Soil Sciences: Centennial Opening Speech. *IUSS Bulletin*, 144, June 2024, 17–19. Retrieved from <http://www.iuss.org/> (date of application: 20.04.2025).
2. Hartemink, A. E. (2015). On global Soil Science and regional solutions. *Geoderma Regional*, 5, 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.02.001>
3. van Baren, H., Hartemink, A. E., & Tinker, P. B. (2000). 75 years the International Society of Soil Science. *Geoderma*, 96(1-2), 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00097-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00097-X)
4. Hartemink, A. E. (2024). Early international connections in the development of Soil Science. *Centennial Celebration and Congress of the International Union of Soil Sciences* (Florence – Italy May 19–21, 2024). Abstract book. 31. Retrieved from https://drive.google.com/file/d/1mcbITzR1wFY1b4vLAaceHAyg_y_K3vzq/view (date of application: 20.04.2025).
5. Hartemink, A. E. (2015). 90 years IUSS and global Soil Science. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61(4), 579–586, <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1055699>
6. Horn, R., Blum, W., & Reyes-Sánchez, L. B. (eds.) (2024). The International Union of Soil Sciences: A Centennial documentation of its national members. *International Union of Soil Sciences (IUSS)*. Rome, Italy. Retrieved from chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefndmkaj/<https://www.iuss.org/wp-content/uploads/2024/06/CENTENNIAL-1-5-2024-fabbri.pdf> (date of application: 20.04.2025).
7. Chronicle. (1907). *Pochvovedenie* [Pedology], 3, 349–354. [In Russian].
8. Glinka, K. D. (1909). The First Agrogeological Conference in Budapest. *Pochvovedenie* [Pedology], 2, 125–140 [In Russian].
9. Hissink, D. J. (1928). Kurze Skizze der Geschichte der internationalen Bodenkundlichen Gesellschaft. *Pochvovedenie* [Pedology], 1–2, 155–161.
10. Fifth anniversary of the Bureau of Authorized Soil Scientists of the USSR. (1926). *Biulleten Pochvoveda* [Soil Scientist's Bulletins], 1, 5–6 [In Russian].
11. Tykhonenko, D. G., Vergunov, V. A., Gorin, M. O., & Novosad, N. M. (2016). *Soil Science in Ukraine*. Kharkiv: Maidan [In Ukrainian].
12. Pashkivska, O. A. (2015). The role of the first All-Ukrainian Congress in the study of the productive forces and the economy of Ukraine in solving the problems of Soil Science in the middle of 20ies years of XX century. *History of science and biographical studies*, 1. Retrieved from <https://inb.dnsgb.com.ua/2015-1/11.pdf> [In Ukrainian] (date of application: 15.03.2025).
13. Sokolowsky, A. N. (1926). Über eine neue methode der chemizch-mechanizchen bodenanalyse. *Actes de la IV Conference Internationale de Pedologie (Rome, 12–19 mai 1924)*. Vol. II: I et II comissions, 177–180.
14. Mahoff, G. G. (1926). Questions De L'Evolution Du Sol De L'Ukraine. *Actes de la IV Conference Internationale de Pedologie (Rome, 12–19 mai 1924)*, Vol. III: III, IV, V, VI Comissions, 482.
15. Mahoff, G. G. (1926). Carte des Sols de L'Ukraine, Echelle: 10 Verstes en Pouces Anglais. *Actes de la IV Conference Internationale de Pedologie (Rome, 12–19 Mai 1924)*. Vol. III: III, IV, V, VI Comissions, 528.
16. Krokos, W. (1926). Le Loess Et Les Sols Fossiles du Sud-Ovest de L'Ukraine. *Actes de la IV Conference Internationale de Pedologie (Rome, 12–19 Mai 1924)*, Vol. III: III, IV, V, VI Comissions, 482.
17. Krokos, W. (1926). Sur la question de la classification du tchernoziom (terre noire) dans le midi de l'Ukraine. *Actes de la IV Conference Internationale de Pedologie (Rome, 12–19 Mai 1924)*, Vol. III: III, IV, V, VI Comissions, 481.
18. Frolov, N. (1926). Die Bodenkartographische Arbeiten in de l'Ukraine. *Actes de la IV Conference Internationale de Pedologie (Rome, 12–19 Mai 1924)*, Vol. III: III, IV, V, VI Comissions, 528.
19. Frolov, N. (1926). Sur La Methode Nabokich (a trois phases) De Travaux Sur Le Terrain. *Actes de la IV Conference Internationale de Pedologie (Rome, 12–19 Mai 1924)*, Vol. III: III, IV, V, VI Comissions, 528.

20. Resolutions of the V All-Union Congress of Soil Scientists. (1926). *Biulleten Pochvoveda* [Soil Scientist's Bulletins], 2–4, 50–55 [In Russian].
21. List of reports for the V All-Union Congress of Soil Scientists. (1926). *Biulleten Pochvoveda* [Soil Scientist's Bulletins], 2–4, 11–15 [In Russian].
22. Makhov, G. G. (1926). Soils of Donbass. Theses. *Biulleten Pochvoveda* [Soil Scientist's Bulletins], 1, 38 [In Russian].
23. Makhov, G. G. (1926). Soils of the sandy Lower Dnieper region (Aleshkovsky sands). Theses. *Biulleten Pochvoveda* [Soil Scientist's Bulletins], 1, 38 [In Russian].
24. Vilensky, D. G. (1926). The problem of creating a genetic classification of soils. Theses. *Biulleten Pochvoveda* [Soil Scientist's Bulletins], 1, 16–17 [In Russian].
25. Communications of the Bureau of Authorized Soil Scientists of the USSR. Resolutions of the Plenums of the Bureau. (1926). *Biulleten Pochvoveda* [Soil Scientist's Bulletins], 2–4, 72–78. [In Russian].
26. All-Union Congress of Geologists in Kyiv 30/IX – 6/X 1926. (1926). *Pochvovedenie* [Pedology], 1, 104–105 [In Russian].
27. Sokolovsky, A. N. (1927). I International Commission on Physics and Mechanical Analysis of Soils. Sessions October 14–20, 1926. *Pochvovedenie* [Pedology], 3, 106–111 [In Russian].
28. Resolutions of the 6th All-Union Congress of Soil Scientists (1927). *Biulleten Pochvoveda* [Soil Scientist's Bulletins], 1–2, 47–58 [In Russian].
29. Hartemink, A. E. (2021). First International Congress of Soil Science 1927. *Soil Science Americana (Chronicles and Progressions 1860-1960)* Springer International Publishing, 385–434). https://doi.org/10.1007/978-3-030-71135-1_11
30. Vilensky, D. (1927). The first international congress of soil scientists in America. *Visnyk pryrodoznavstva* [Bulletin of Natural Sciences], 2, 69–76 [In Ukrainian].
31. Waksman, S. A. & Deemer, R. B. (Eds.). (1928). Transcontinental Excursion and Impressions of the Congress and of America. *Proceedings and papers of the First International Congress of Soil Science* (June 13–22, 1927, Washington, DC, USA). Washington. Retrieved from https://old.iuss.org/index.php%3Frex_media_type=download&rex_media_file=first_internat_congress_of_soil_science_vol_i_1927_compressed.pdf (date of application: 20.04.2025).
32. Weir, W. W. (1927). The new concept of soils. A Handbook especially prepared for the meeting and tour of the first International Soil Congress. Extract from the article by Dr. W. W. Weir in the Official Guide for Members of the First International Congress of Soil Scientists in Washington in 1927. *Biulleten Pochvoveda* [Soil Scientist's Bulletins], 3–7, 60–62 [In Russian].
33. Decisions of the Government of the USSR on the II International Congress of Soil Scientists. (1928). *Biulleten Pochvoveda* [Soil Scientist's Bulletins], 3–7, 127 [In Russian].
34. Minutes of the Meeting of the Plenum of the Bureau of Authorized Soil Scientists of the Soviet Union on December 28, 29, and 30, 1927. (1927). *Biulleten Pochvoveda* [Soil Scientist's Bulletins], 5–8, 149–154 [In Russian].
35. Summary of the Conversation between Dr. Hissink and Academician Vernadsky on April 22, 1928. (1928). *Biulleten Pochvoveda* [Soil Scientist's Bulletins], 3–7, 135–136 [In Russian].
36. From the materials of the 1st All-Ukrainian Conference of Soil Scientists 05/28-29/1928. (M. K. Konakov, Compil.) (1930). In O. Sokolovsky (Ed.). *Proceedings of the Research Department of Soil Science*, 1, 211–222. Kharkiv. [In Ukrainian].
37. Krupskyi, M. K. (1928). The First All-Ukrainian meeting of soil scientists. *Journal of Agronomical Science and Agricultural Research*, 5(5), 136–138 [in Ukrainian].
38. Kunets, V. V., Laktionova, T. M., & Parasochka, I. F. (2024). Professor M. K. Krupskyi (1903–1986): life path and main milestones of scientific creativity. *AgroChemistry and Soil Science*, 96, 58–74. <https://doi.org/10.31073/acss96-07> [In Ukrainian].

**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 98**

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)

Підписано до друку 9.12.2025 р. Формат 60x84 1/8.
Папір офсетний. Друк цифровий. Гарнітура Arial.
Умов. друк. арк. 12,8. Наклад 16 прим. Зам. №7-4/12/25.

Виготовлювач: ФОП Панов А. М. Свідотцтво серія ДК №4847 від 06.02.2018 р.
м. Харків, вул. Жон Мироносиць, 10 оф. 6,
тел.: +38(057)714-06-74, +38(050)976-32-87; e-mail: copy@vlavke.com