

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ ГРАНУЛОМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ ҐРУНТУ ЗА МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

**Іванюта Михайло Васильович**

кандидат технічних наук

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків  
Національної академії аграрних наук, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-2180-1929

ur6hdc@ukr.net

*В статті наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень з визначення магнітної сприйнятливості ґрунту за його гранулометричних складових індукційним методом. За своїм фізико-хімічним складом ґрунт можна класифікувати як композитний матеріал з діаманетиків та парамагнетиків з гранулометричним складом піску і глини у відповідних пропорціях, що є значимими при потоковому визначенні щільності ґрунту.*

*Мета досліджень: Удосконалення поточкового неруйнівного визначення щільності ґрунту в технологічному ланцюгу «Композиційний склад – магнітна сприйнятливості в цикловому магнітному полі – щільність основних типів ґрунтів».*

*Методи дослідження. Аналітичні дослідження принципів взаємодії магнітного поля з діа- та парамагнетиками. Експериментальні дослідження взаємодії зразків ґрунту і його гранулометричних складових в змінному магнітному полі. Статистичний аналіз експериментально отриманих характеристик в межах діапазонів взаємодії гранулометричного складу ґрунту з магнітним полем.*

*Результати дослідження. Отримано залежності взаємодії магнітної сприйнятливості з показником щільності та гранулометричного складу ґрунту. Виконано регресійний аналіз зв'язків щільності з магнітною сприйнятливостю за циклової взаємодії магнітного поля. Обґрунтовано час взаємодії циклової взаємодії з позиції можливості опису кореляцій моделями другого порядку для показників магнітної сприйнятливості за обраних гранулометричних композицій основних типів ґрунтів України.*

*Розроблено лінійні моделі функціональних зв'язків показників щільності та магнітної сприйнятливості за тривалості діапазону циклової взаємодії для досліджуваних гранулометричних композицій за циклової взаємодії з періодом  $T = 0,6$  мкс.*

*Визначено, що моделі функціональних зв'язків значень щільності для композицій типових ґрунтів в діапазоні  $1.0\text{--}1.5$  г/см<sup>3</sup> з показниками магнітної сприйнятливості в межах діапазону  $\chi = 55\text{...}105 \cdot 10^{-4}$  за циклової взаємодії з періодом  $T=0,6$  мкс мають кореляційні узгодження з коефіцієнтами детермінації  $R^2 = 0.91\text{--}0.97$ .*

*Результати досліджень є перспективними для розвитку індукційних методів в технологіях і засобах поточкового неруйнівного дослідження агрофізичних показників ґрунту.*

**Ключові слова:** щільність ґрунту, гранулометричний склад, магнітна проникність, магнітна сприйнятливості, магнетохімія.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.2.6>

**Вступ.** Сучасні технології землеробства вимагають застосування інтелектуальних систем високоякісного поточкового моніторингу стану ґрунту та адаптації робочих органів машин на забезпечення отриманих запланованих агрофізичних показників ґрунту, зокрема щільності в процесі передпосівного обробітку ґрунту (Ivaniuta at all, 2023, Kravchuk at all, 2023).

Дані експериментальних досліджень дозволили визначити, що відхилення щільності ґрунту, порівняно з оптимальною на  $0,1\text{...}0,3$  г/см<sup>3</sup> приводить до значного зниження врожаю, зокрема буряків цукрових на 20-40% (Kartashov at all, 2012).

Відомі методи поточкового неруйнівного визначення щільності ґрунту, що функціонують за принципом визначення показників вихрових струмів з послідуною побудовою електронних карт для відповідно регульованих робочих органів машин. За таким методом визначаються проблемні питання реалізації процесу в часовому просторі технологій сівби просапних культур, зокрема буряків цукрових, та визначення щільності ґрунту як композитного тіла залежно від його хімічного складу.

Відомо також, що з позиції агрофізичних показників ґрунт можна характеризувати як композит, що складається з твердої (мінеральної та органічної), рідкої, газоподібної частин. Тверда частина ґрунту на 90% складається з трьох основних елементів: оксиду кремнію, оксиду алюмінію і кисню (Hudz at all., 2010; Volodin, 2002; Kravchuk at all, 2023).

За умови циклової взаємодії неоднорідного магнітного поля з ґрунтом процес характеризується як діаманетизм та парамагнетизм і може бути покладений в основу магнітохімічних досліджень властивостей композитного ґрунту (Jordanova, 2017; Orchard, 2003).

### **Завдання досліджень:**

1. Дослідити експериментальні значення тривалості (діапазону) магнітної взаємодії, магнітної сприйнятливості, та щільності залежно від композитного складу ґрунту.

2. Розробити моделі взаємозв'язків показників магнітної проникності та магнітної сприйнятливості ґрунту із показниками агрофізичного стану за циклової взаємодії магнітного поля.

3. Провести аналітичні дослідження принципів взаємодії змінного магнітного поля із діа- та парамагнетиками у вигляді комбінацій гранулометричного складу для основних типів ґрунтів що представляють композитні тіла основних типів ґрунтів.

**Матеріали і методи досліджень.** Загальна методика рекомендувала дослідження передумов пошуку раціонального технологічного рішення взаємодії магнітної сприйнятливості з агрофізичними показниками ґрунту.

Дослідження магнітних взаємодій виконувались за визначених параметрів індукційного поля для основних типів ґрунтів.

Експериментальні дослідження виконувались шляхом застосування індукційних методів дослідження магнітної сприйнятливості та вимірювання частоти за зміною агрофізичних параметрів дослідних зразків і побудови графіків. Порядок виконання досліджень узгоджено з рекомендаціями теорії планування факторного експерименту.

Аналітичні дослідження результатів взаємодії магнітного поля з діа- та парамагнетиками виконувались на основі аналізу та оцінки відомих (Orchard, 2003) методів і засобів визначення магнітних властивостей речовини.

Для обробки експериментальних даних застосовувались методи обробки і порівняння відповідно до правил математичної статистики та теорії ймовірності з застосуванням моделювання в програмному комплексі Excel.

Для оцінки експериментальних досліджень застосовано відомі методи дисперсійного аналізу результатів експериментальних досліджень.

**Результати досліджень.** Відомо, що щільність ґрунту зв'язана з питомою магнітною сприйнятливістю  $\chi$  наступним співвідношенням (Morrish, 1965):

$$\chi_{\text{пит}} = \frac{\chi}{\rho} \quad (1)$$

де:  $\rho$  – щільність ґрунту, г/см<sup>3</sup>.

Магнітна сприйнятливості  $\chi$  зв'язана відношенням власної взаємодії одиниці маси ґрунту до напруженості зовнішнього магнітного поля (Orchard, 2003):

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2)$$

де  $M$  – власна намагніченість ґрунту, або магнітний момент одиниці об'єму речовини, А/м;

$H$  – напруженість магнітного поля, А/м.

Магнітна сприйнятливості  $\chi$  є безрозмірною величиною та зв'язана з магнітною проникністю  $\mu$  (Morrish, 1965; Saidati at all, 2023):

$$\mu = 1 + \chi. \quad (3)$$

або:

$$\chi = \mu - 1. \quad (4)$$

В процесі циклової взаємодії магнітного потоку з ґрунтом, в його доменних структурах відбуваються процеси зміщення та обертання спінів що залежать від магнітної структури, наявності дефектів та пустот, форми та інших факторів. На різних етапах магнітної взаємодії можна описати кривою, що пов'язано зі взаємодією

розмагнічуючого фактору (Коерцитивної сили). Цей ефект повністю обґрунтовується Ларморовою прецесією (Biletskyi, 2004; Rekveldt at all, 2002; Ruh 2019).

Для потокового визначення щільності запропоновано використання індукційного методу визначення магнітної проникності. Методи базуються на явищах зміни магнітного поля генератора в часі залежно від питомої взаємодії одиниці об'єму ґрунту.

Напруженість зовнішнього магнітного поля  $H$  та індукція  $B$  в ґрунті пов'язані залежністю (Morrish, 1965):

$$B = \mu \cdot H \quad (5)$$

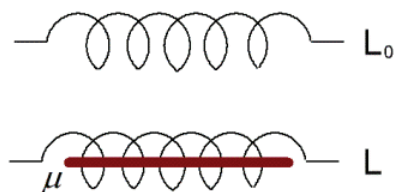
Відомо, що питома сприйнятливості ґрунту також являє собою магнітний момент на 1 г ґрунту (що не є тотожним з атомним магнітним моментом).

Очевидно, що для встановлення зв'язків щільності ґрунту як композитного тіла необхідно виконати дослідження зв'язків магнітної проникності від тривалості взаємодії як композитного тіла за його гранулометричного складу.

За повного циклу магнітної взаємодії в кожен одиницю об'єму ґрунту вводиться енергія, чисельно рівна площі петлі гістерезису або її частині, що використовується на подолання коерцитивних сил і в результаті взаємодії переходить в тепло (Biletskyi 2004; Müller 2001; Rózański 2022).

Відомо, що індуктивність котушки без осердя у вакуумі рівна  $L_0$ . Для котушки з рівномірно заповненою осердям, де присутні магнітні силові лінії індуктивність рівна  $L$  (рис. 1) (Suckling at all, 2024; Bariakhtar at all, 2019; Khilov 2018; Syrotuk at all, 2019).

Для проведення досліджень магнітної проникності запропоновано стенд на основі LC генератора синусоїдальних коливань з котушкою як сенсорним елементом за використання логічних елементів (рис. 2). В якості чутливого елемента використовується безкаркасна котушка, діаметром 32 мм.



**Рис. 1. Принципова схема визначення магнітної проникності**

Магнітна проникність може бути обчислена за визначених показників індуктивності:

$$\mu = \frac{L}{L_0} \quad (5)$$

Під час роботи генератора в сенсорній котушці утворюється магнітне поле частотою  $f_0$  що взаємодіє з дослідними зразками ґрунту в осерді.

В процесі проведення досліджень в магнітному полі котушки розміщувалися зразки ґрунту встановленої маси та об'єму. Магнітні властивості ґрунту впливали на поле котушки та змінювали її індуктивність до значення

$L_1$ , що призводило до зміни інформативного значення частоти  $f_1$ .

Фіксовано частота  $f_1$ , використовувалась в подальшому для обчислення показників магнітної проникності.

Вимірювання значень частоти  $f_1$  забезпечувалось частотоміром PLC-08702F (рис. 3). Для визначення показників магнітної проникності та сприйнятливості використовувались значення тривалості циклової взаємодії  $T = 0.5, 0.6, 0.7$  та  $0.8$  мкс що відповідно частотам 500, 600, 700 та 800 кГц. і встановлювались потенціометром R1.

Частота генерації магнітного поля без взаємодії з ґрунтом  $f_0$  (Гц):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_0 C1}} \quad (6)$$

де  $L_0$  – індуктивність котушки, Гн;

$C1$  – ємність конденсатора, Ф.

Відносна магнітна проникність:

$$\mu = \frac{f_0^2}{f_1^2} \quad (7)$$

Очевидно, з врахуванням (1) питома магнітна сприйнятливість:

$$\chi_{\text{пит}} = \frac{\frac{f_0^2}{f_1^2} - 1}{\rho} \quad (8)$$

Виходячи з (8), значення щільності ґрунту можна зв'язати з показниками питомої магнітної сприйнятливості  $\chi_{\text{пит}}$  через визначену проникність  $\mu$ .

Для експериментального дослідження фізичних складових основних типів ґрунтів і їх взаємозв'язків було підготовано попередньо очищені, осушені до вологості 0,5–1% та зважені з точністю до 0.01 г основні компоненти.

3 компонентів складено суміші згідно із таблицею 1. Щільність утворювалось штучно в діапазоні значень

1.0–1.5 г/см<sup>3</sup> шляхом розподілу проб встановленої маси в об'ємі 50 мм<sup>3</sup>.

Для проведення досліджень в першому наближенні виконано регресійний аналіз магнітної сприйнятливості за циклової взаємодії очищених піску, глини та середньо-суглинкового ґрунту (табл. 2).

Результати проведених досліджень дозволили встановити залежності другого порядку для щільності за значень 1,0–1,5 г/см<sup>3</sup> та магнітної сприйнятливості  $\chi$  за значень 15–28  $10^{-4}$  в діапазоні 500–800 кГц.

За результатами регресійного (табл. 3) та дисперсійного (табл. 4) аналізу для обраного діапазону показників шляхом порівняння асимптотичної значимості встановлено приналежність визначених показників до однієї генеральної сукупності.

Для встановлення функціональних взаємозв'язків магнітної сприйнятливості  $\chi$  та щільності  $\rho$  виконано моделювання зв'язків для кожної з досліджуваних частот поліномами другого ступеня (рис. 4–6).

Дослідженнями магнітної сприйнятливості зразків фізичного піску встановлено, що найвищий показник коефіцієнта детермінації в обраному діапазоні  $R^2 = 0.77$  за циклової взаємодії  $T = 0.5$  мкс (рис. 4).

Дослідженнями магнітної сприйнятливості зразків фізичної глини встановлено, що найвищий показник коефіцієнта детермінації в обраному діапазоні досліджень  $R^2 = 0.86$  за циклової взаємодії  $T = 0.6$  мкс (рис. 5).

Дослідженнями магнітної сприйнятливості зразків ґрунту встановлено, що найвищий показник коефіцієнта детермінації в обраному діапазоні досліджень  $R^2 = 0.97$  за циклової взаємодії  $T = 0.6$  мкс (рис. 6).

Дослідження магнітної сприйнятливості  $\chi$  за щільності  $\rho$  типових ґрунтів повторено за зразків композицій фізичних складових за вологості 0.5–1 % (табл. 5, рис. 7), з використанням іншої магнітної зони котушки, проведено регресійний та дисперсійний аналізи результатів.

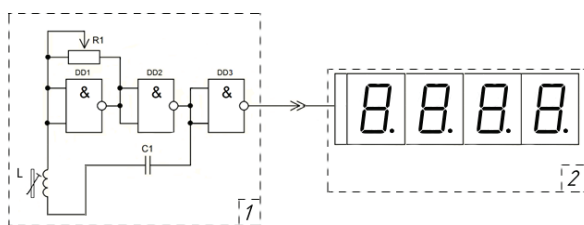


Рис. 2. Принципова схема вимірювальної установки: 1 – генератор змінного струму; 2 – частотомір

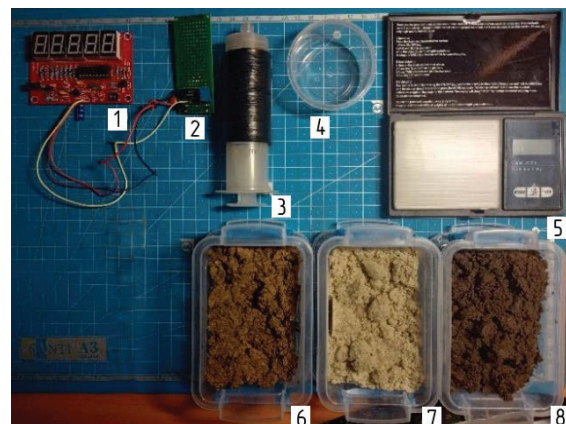


Рис. 3. Прилади і обладнання (основні): 1 – частотомір; 2 – генератор змінного струму; 3 – шприц-дозатор; 4 – мірний стакан; 5 – ваги електронні; 6 – глиня; 7 – пісок; 8 – ґрунт

Таблиця 1

## Класифікація основних типів ґрунтів за гранулометричним складом (за Н. А. Качинським, 1965)

Коротка назва за гранулометричним складом	Вміст "фізичної глини" / "фізичного піску" (частки < 0,01 мм / частки > 0,01 мм), %		
	Підзолистого типу ґрунтоутворення	Степового типу, чорноземи і жовтоземи	Солонці та сильно солонцюваті
супісок	0-20 / 99-80	10-20 / 89-80	10-15 / 89-85
суглинок легкий	20-30 / 79-70	20-30 / 79-70	15-20 / 84-80
суглинок середній	30-40 / 69-60	30-45 / 69-65	20-30 / 79-70
суглинок важкий	40-50 / 59-50	45-60 / 64-40	30-40 / 69-60
глина легка	50-65 / 49-35	60-75 / 39-25	40-50 / 59-50

Таблиця 2

## Розподіл факторів та результати досліджень магнітної сприйнятливості

Щільність г/см <sup>3</sup>	Частота, кГц	Магнітна сприйнятливість, $\chi \cdot 10^{-4}$		
		Ґрунт	Глина	Пісок
1,0	500	20,83	17,19	25,22
	600	22,02	18,70	24,01
	700	20,58	21,46	23,74
	800	16,26	15,00	20,26
1,1	500	16,00	18,79	25,21
	600	21,00	22,34	23,69
	700	19,15	21,44	22,29
	800	17,26	16,76	18,26
1,2	500	18,40	17,18	28,03
	600	21,67	20,02	27,35
	700	21,73	20,02	25,73
	800	15,75	21,76	21,26
1,3	500	16,79	19,58	28,81
	600	23,68	24,30	27,01
	700	22,88	24,31	25,76
	800	17,51	18,25	22,77
1,4	500	16,00	19,61	26,80
	600	25,68	27,01	25,68
	700	20,86	24,28	25,46
	800	18,26	19,26	20,76
1,5	500	18,81	21,58	24,00
	600	27,70	27,64	28,69
	700	26,59	26,89	25,76
	800	20,51	18,27	21,26

Таблиця 3

## Регресійна статистика результатів досліджень

	Глина	Пісок	Ґрунт
Множинний R	0.92371181	0.853786095	0.978334877
R <sup>2</sup>	0.853243508	0.728950695	0.957139131
Нормований R <sup>2</sup>	0.816554385	0.661188369	0.946423913
Стандартна похибка	0.000156095	0.000112969	6.62709E-05
Спостереження	6	6	6

## Результати дисперсійного аналізу визначених показників

Глина					
	df	SS	MS	F	p
Регресія	1	5.66646E-07	5.66646E-07	23.25603438	0.008507838
Залишок	4	9.74622E-08	2.43655E-08		
Всього	5	6.64108E-07			
Пісок					
Регресія	1	1.37286E-07	1.37286E-07	10.75746269	0.030504842
Залишок	4	5.10476E-08	1.27619E-08		
Всього	5	1.88333E-07			
Ґрунт					
Регресія	1	3.92302E-07	3.92302E-07	89.32521848	0.000698982
Залишок	4	1.75673E-08	4.39184E-09		
Всього	5	4.09869E-07			

Примітка: df – число ступенів свободи; SS – сума квадратів відхилень показників  $\chi$ ; MS – дисперсія на одну ступінь свободи; F – отримане емпіричне значення перевірки нульової гіпотези; p – теоретична вірогідність значимості коефіцієнтів регресії.

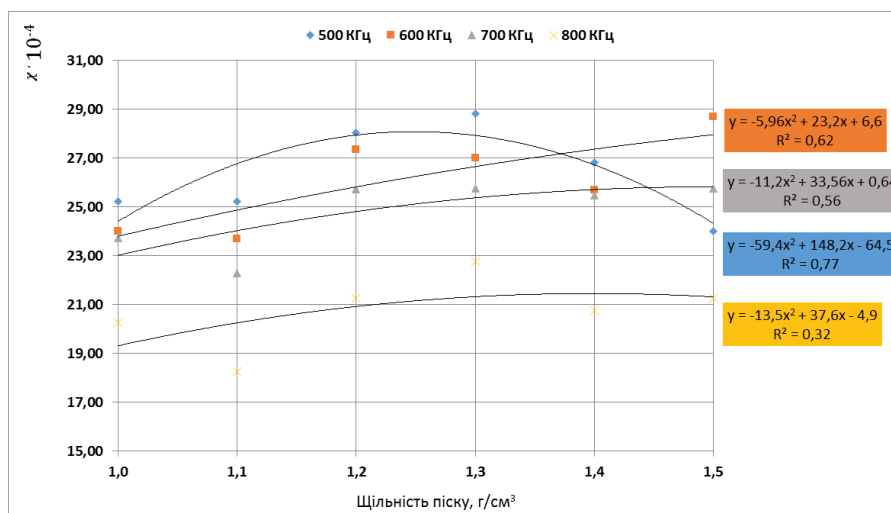


Рис. 4. Зв'язки показників магнітної проникності та щільності за циклової взаємодії фізичного піску

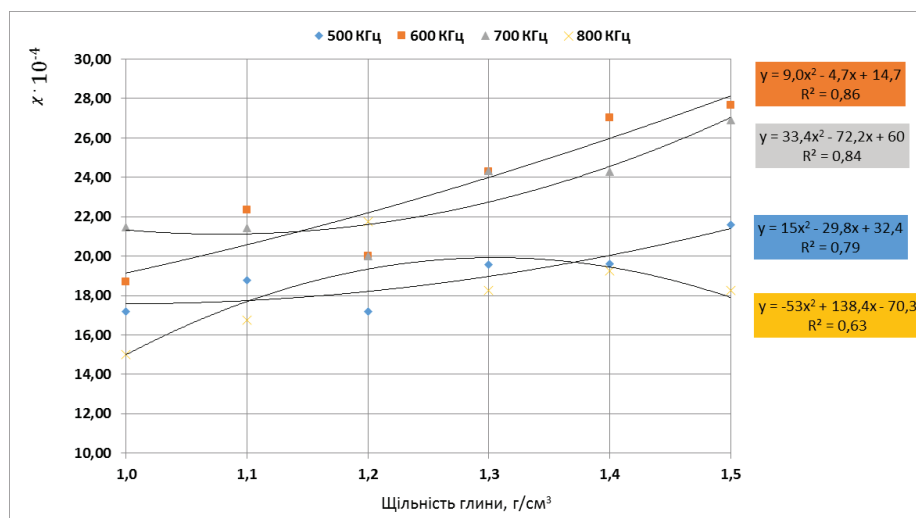


Рис. 5. Зв'язки показників магнітної проникності та щільності за циклової взаємодії фізичної глини

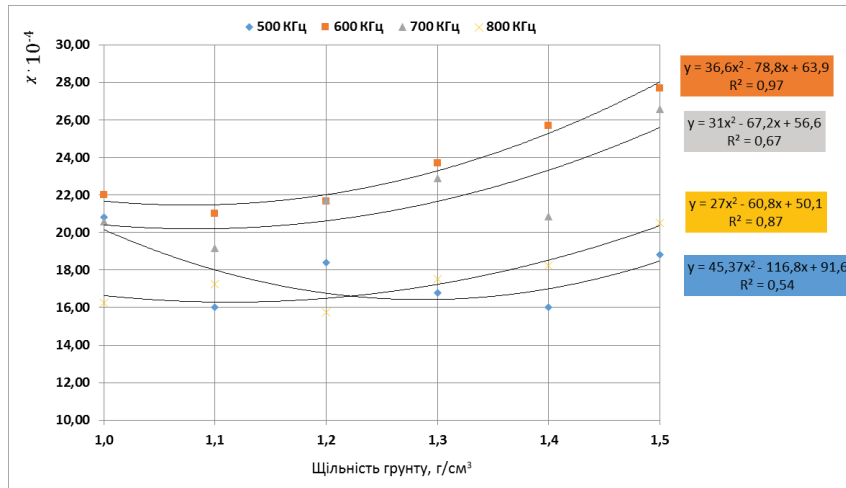


Рис. 6. Зв'язки показників магнітної проникності та щільності за циклової взаємодії ґрунту



Рис. 7. Зразки композицій ґрунту на основі сумішей: 1 – пісок, супіщаний; 3 – легкосуглинистий, 4 – середньосуглинистий; 5 – важкосуглинистий; 6 – глина

Таблиця 5

Магнітна сприйнятливість  $\chi$  композицій ґрунту за циклової взаємодії сумішей  $T = 0.6$  мкс

$\rho, \text{г/см}^3$	$\chi \cdot 10^{-4}$					
	Пісок	Супіщаний	Легко-суглинистий	Середньо-суглинистий	Важко-суглинистий	Глина
1,00	93,43	56,72	73,50	83,06	81,72	77,34
1,05	94,44	61,08	75,17	84,40	85,43	82,73
1,10	97,12	61,75	77,53	89,13	88,13	86,44
1,15	96,11	68,12	80,88	91,50	91,50	90,15
1,20	97,79	71,82	85,25	92,52	91,16	92,51
1,25	99,47	74,51	86,94	96,23	94,20	94,19
1,30	98,80	75,52	89,63	94,20	95,56	96,54
1,35	99,47	78,54	91,31	95,55	96,91	100,59
1,40	102,84	80,56	91,31	96,90	98,60	101,27
1,45	104,19	82,91	91,98	98,58	101,30	101,94
1,50	104,86	84,60	94,00	99,60	100,96	103,29

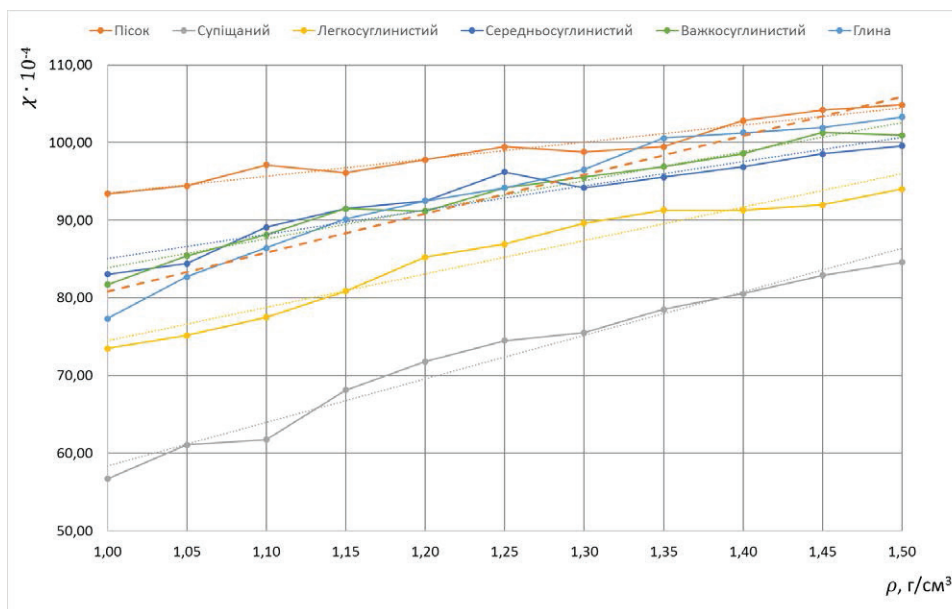
За результатами регресійного (табл. 6) та дисперсійного (табл. 7) аналізу виконано перевірку асимптотичної значимості. Встановлено що визначені показники магнітної проникності  $\chi$  мають зв'язок з генеральною сукупністю обраного діапазону значень щільності  $\rho = 1,0\text{--}1,5 \text{ г/см}^3$  для композицій основних типів ґрунту.

За результатами регресійного аналізу встановлені лінійні моделі зв'язків показників магнітної сприйнятливості  $\chi$  зі значеннями щільності  $\rho$  композитних сумішей для  $T = 0.6$  мкс, з коефіцієнтами детермінації  $R^2 = 0.91\text{--}0.97$ .

Дослідженнями встановлено функціональні моделі магнітної сприйнятливості  $\chi$  та щільності  $\rho$ , що

## Регресійна статистика результатів досліджень композицій ґрунту

	Пісок	Супіщаний	Легко-суглинистий	Середньо-суглинистий	Важко-суглинистий	Глина
Множинний R	0,97	0,99	0,97	0,95	0,98	0,98
R <sup>2</sup>	0,94	0,97	0,95	0,91	0,97	0,95
Нормований R <sup>2</sup>	0,93	0,97	0,94	0,90	0,96	0,95
Стандартна похибка	0,97	1,61	1,76	1,76	1,22	1,94
Спостереження	11	11	11	11	11	11

Рис. 8. Магнітна сприйнятливість  $\chi$  за циклічної взаємодії сумішей композицій ґрунту

характеризовано лінійними рівняннями для кожної з досліджуваних ґрунтових композицій (рис. 8).

Пісок:

$$y = 1,1 \cdot x + 92,35 \quad (9)$$

Супіщаний:

$$y = 2,8 \cdot x + 55,59 \quad (10)$$

Легкосуглинистий:

$$y = 2,15 \cdot x + 72,34 \quad (11)$$

Середньосуглинистий:

$$y = 1,57 \cdot x + 83,47 \quad (12)$$

Важкосуглинистий:

$$y = 1,88 \cdot x + 81,97 \quad (13)$$

Глина:

$$y = 2,5 \cdot x + 78,31 \quad (14)$$

За результатами дисперсійного аналізу встановлено звязки експериментально отриманих показників магнітної сприйнятливості  $\chi$  в діапазоні  $55 \dots 105 \cdot 10^{-4}$  для щільності композитних сумішей ґрунту в межах  $1,0 \text{--} 1,5 \text{ г/см}^3$ .

**Обговорення.** В межах проведених досліджень підтверджено і доповнено що перспективними напрямками розвитку засобів потокового визначення агрофізичних показників є вивчення, розробка та впровадження

технологій взаємодії електромагнітного поля з показниками щільності (Kravchuk at all, 2022; Anyskevich at all, 2018; Freddy at all, 2021; Kravchuk at all, 2023).

Роботи (Dlouhá at all, 2013; Hanxiao at all, 2022; Kravchuk at all, 2022; Sashini at all, 2023) спрямовані на розробку потокових засобів визначення стану ґрунту дозволили встановити методи контактної та безконтактної взаємодії електромагнітного поля з оброблюваним шаром. В проведених дослідженнях висновок отримав подальший розвиток.

За результатами досліджень (Anyskevich at all, 2018; Sashini at all, 2023; Yang at all, 2022; Zhang at all, 2016; Zhang at all, 2017) підтверджено, що засоби потокового неруйнівного визначення агрофізичних показників розроблені на принципах вимірювання вихрових струмів дали можливість визначати глибину залягання ґрунтових вод та текстуру, що не заперечується даними дослідженнями.

За дослідженнями (Kamran at all, 2023; Mohamed at all, 2018; Jordanova 2017) встановлено, що перспективними напрямками дослідження щільності та гранулометричного складу є визначення характеристик магнітної проникності залежно від енергетичних показників індукційного поля, що не суперечить висновкам даної роботи.

Підтверджено висновки (Lundgren at all, 2013), що методи вимірювання магнітної проникності за широкого використання в металодетекторах, засобах магнітної

## Результати дисперсійного аналізу визначених показників

	df	SS	MS	F	p
Пісок					
Регресія	1	133,26	133,26	141,02	0,00000084
Залишок	9	8,50	0,94		
Всього	10	141,76			
Супіщаний					
Регресія	1	860,86	860,86	333,48	0,00000020
Залишок	9	23,23	2,58		
Всього	10	884,09			
Легкосуглинистий					
Регресія	1	507,67	507,67	163,20	0,00000045
Залишок	9	28,00	3,11		
Всього	10	535,66			
Середньосуглинистий					
Регресія	1	270,664	270,664	87,804	0,0000061
Залишок	9	27,743	3,083		
Всього	10	298,408			
Важкосуглинистий					
Регресія	1	386,95	386,95	261,95	0,00000058
Залишок	9	13,29	1,48		
Всього	10	400,25			
Глина					
Регресія	1	692,28	692,28	183,45	0,00000027
Залишок	9	33,96	3,77		
Всього	10	726,24			

дефектоскопії феромагнетиків та біохімічних дослідженнях можуть бути перспективними для потокового визначення агрофізичних показників.

Вивчення циклової взаємодії індукційного поля з основними елементами що складають основу ґрунтових порід (FarzadShirzaditabar et al., 2022) є актуальним для подальших досліджень пов'язаних з вивченням селективних зв'язків магнітної сприйнятливості фізико-хімічних елементів ґрунту з затратами енергії на перемагнічування.

**Висновки.** Досліджено функціональні зв'язки щільності та тривалості намагнічення для діапазону циклової

взаємодії  $T=0,5-0,8$  мкс (500-800 кГц) основних за гранулометричним складом типів ґрунтів.

Досліджено, що лінійні моделі описують функціональні зв'язки значень щільності типових ґрунтів в діапазоні  $1.0-1.5$  г/см<sup>3</sup> з коефіцієнтами детермінації  $R^2 = 0.91-0.97$  за циклової взаємодії з періодом  $T=0,6$  мкс в межах діапазону магнітної сприйнятливості  $\chi = 55 \dots 105 \cdot 10^{-4}$ .

Результати досліджень є перспективними для розробки засобів потокового неруйнівного дослідження агрофізичних показників ґрунту.

**Бібліографічні посилання:**

1. Anyskevich L.V., Voytuk D.G., Zaharin F.M., Ponomarenko S.O., (2018). Systema tochnogo zemlerobstva. [Precision farming systems]. Kyiv: NUBiP Ukrainy, 566 p. (in Ukrainian).
2. Bariakhtar V.G., Dovguy S.O. Bozhynova F.Y. Kiriukhina O.O. (2019). Fizika: Pidruchnyk dlia 11 klasu. [Physics: a textbook for the 11th grade]. Kharkiv: Ranok, 272 p. (in Ukrainian).
3. Biletskyi V.S., (2004). Mala hyrnicha encyclopedia, v 3 t, T1. [Small chemical encyclopedia, in 3 volumes, V1]. Donetsk: Donbas, 640 p. (in Ukrainian).
4. Dlouhá Š., Petrovský E., Kapička A., Borůvka L., Ash C., Drábek O. (2013). Investigation of polluted alluvial soils by magnetic susceptibility methods: a case study of the Litavka River. Soil and Water Research. 151, p 151-157, <https://doi.org/10.17221/14/2013-SWR>.
5. FarzadShirzaditabar and Richard J.Heck. (2022). Characterization of soil magnetic susceptibility, a review of fundamental concepts instrumentation and applications. Canadian Journal of Soil Science. 102(2), p. 231-251. <https://doi.org/10.1139/cjss-2021-0040>.
6. Freddy A., Diaz-Gonzalez, Jose Vuelvas, Carlos A. Correa, Victoria E. Vallejo, D. Patino. (2021). Machine learning and remote sensing techniques applied to estimate soil indicators Review. Ecological Indicators. <http://doi.org/10.1015/j.ecolind.2021.108517>.
7. Hanxiao X., Yingui C., Gubai L. (2022). Variability in reconstructed soil bulk density of a high moisture content soil, a study on feature identification and ground penetrating radar detection. Environ Earth Sci. 81. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10365-1>.



8. Hossain M. Shahadat, G. K., Mustafizur M Rahman, Solaiman A.R.M., Alam M. Saiful, Rahman M. Mizanur & M. A. Baset Mia (2020) Estimating Electrical Conductivity for Soil Salinity Monitoring Using Various Soil-Water Ratios Depending on Soil Texture. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. p 635-644. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1729378>.
9. Hudz' V. P., Primak I.D., Budyonny Yu, V., Tanchik S.P. (2010). *Zemlerobstvo: textbook [Agriculture: textbook]*. Kyiv. Centr uchbovoi literaturi, 464 p.
10. Ivaniuta, M., Dr, prof. Kravchuk V., & Ramus M. (2023). Forecast for the Adaptive Tillage System *International Journal of Life Science and Agriculture Research*. 2(7), p.193–199. <https://doi.org/10.55677/ijlsar/V02I07Y2023-06>.
11. Kamran Azizi, Shamsollah Ayoubi, José A.M. Demattê. (2023). Controlling factors in the variability of soil magnetic measures by machine learning and variable importance analysis. *Journal of Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.104944>.
12. Kartashov S.G., Gorodetsky E.U., Dudka V.S., Moskaluk A.A. (2012) Vpliv optimalnoy schilnosti gruntu dla riznih silskogospodarskih kultur na vrogajnist. [The effect of optimal soil density for different agricultural crops on yield]. *Taurian Scientific Bulletin. Series: Agricultural sciences*. V. 78. P 21-26. (in Ukrainian).
13. Khilov V. S. (2018). *Teoreticni zasady ektrotehniki. [Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering]*. Dnipro. 445 p. (in Ukrainian).
14. Kravchuk V., Ivaniuta M., Bratishko V., Gumeniuk Y., Kurka V. (2023) ON-STREAM SOIL DENSITY MEASURING, *INMATEH*, P. 665-672 <https://doi.org/10.35633/inmateh-69-64>.
15. Kravchuk V.I., Sinchenko V.M., Ivaniuta M.V., Shustik L.P. (2022). Potokove vyznachennia shchilnosti hruntu: stan i prohnoz doslidzhen. The latest technologies in the agroindustrial complex: research and management. [Current determination of soil density: research status and forecast]. v30(44). p 107-115. [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30\(44\)-11](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30(44)-11). (in Ukrainian).
16. Lawrence Que (2011). *Physical methods in bioinorganic chemistry: spectroscopy and magnetism*. University Science Books. p. 345–348.
17. Lundgren, Julia & Grémiaux, Alexandre & Eberhardt, Jacob. (2013). Theoretical study of the interaction between an ion-protein complex and an extremely weak low-frequency combined magnetic field. <https://doi.org/10.13140/2.1.5057.9524>.
18. Mohamed, Abdel-Mohsen & Paleologos Evan (2018). *Magnetic Properties of Soils*. 10.1016/B978-0-12-804830-6.00015-6.
19. Morrish A. H. "The Physical Principles of Magnetism" John Wiley & Sons (1965). 273 p.
20. Müller K. H. (2001). *Magnetic Viscosity*. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00869-X>.
21. Jordanova N. (2017). *Soil Magnetism Applications in Pedology*. Environmental Science and Agriculture. Academic Press. 445 p.
22. Orchard A.F. (2003). *Magnetochemistry*. Oxford Chemistry Primers. Oxford University Press. ISBN 0-19-879278-6.
23. Rekvelde M. & Bouwman, Wim & Kraan, W.H. & Grigoriev, S.v & Uca, Okan & Keller, T. (2002). Overview of new Larmor precession techniques. *Applied Physics. A* 74, p 323-325. <https://doi.org/10.1007/s003390101096>.
24. Rózański Adrian. (2022). Relating thermal conductivity of soil skeleton with soil texture by the concept of "local thermal conductivity fluctuation". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Volume 14, Issue 1, p 262-271, ISSN 1674-7755, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.06.008>.
25. Ruh, A, Kiselev, VG. (2019). Calculation of Larmor precession frequency in magnetically heterogeneous media. *Concepts Magn Reson. Part A*. <https://doi.org/10.1002/cmr.a.21472>.
26. Saidati Bouhlassa, Naima Bouhsane, (2023). "Assessment of the impacts of land-use change and slope position on soil loss by magnetic susceptibility-based models". *International Journal of Sediment Research*. 38(3). <https://doi.org/p.455>. doi:10.1016/j.ijsrc.2022.11.006
27. Sashini Pathirana, Sébastien Lambot, Manokarajah Krishnapillai. (2023). "Ground-Penetrating Radar and Electromagnetic Induction. Challenges and Opportunities in Agriculture". *Remote Sensing*. 15(11). p. 2932. <https://doi.org/10.3390/rs15112932>.
28. Syrotuk V.D., Miroshnychenko Yu.B. (2019). *Fizyka i astronomiia: Pidruchnyk dla 11 klasu. [Physics and astronomy, a textbook for the 11th grade]* Kyiv: Geneza. 368 p. (in Ukrainian).
29. Volodin M.O. (2002). *Osnovy zemel'noho kadastru. Navchal'nyy posibnyk. [Basics of land cadastre. Tutorial]*. Kyiv: Instytut zmistu i metodiv navchannya MON Ukrainy. 352 p. (in Ukrainian).
30. Yang, Y.; Shang, K.; Xiao, C.; Wang, C.; Tang, H. (2022). Spectral Index for Mapping Topsoil Organic Matter Content Based on ZY1-02D Satellite Hyperspectral Data in Jiangsu Province, China. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 11. p. 111. <https://doi.org/10.3390/ijgi11020111>.
31. Zhang, X., Zhang, J., Li, L., Zhang, Y., Yang, G. (2017). Monitoring Citrus Soil Moisture and Nutrients Using an IoT Based System, *Sensors*. 17, p 447. <http://doi.org/10.3390/s17030447>.
32. Zhang, GL., Liu, F., Song, XD., Zhao, YG. (2016). Digital Soil Mapping Across Paradigms, Scales, and Boundaries: A Review. In: Zhang, GL., Brus, D., Liu, F., Song, XD., Lagacherie, P. (eds) *Digital Soil Mapping Across Paradigms, Scales and Boundaries*. Springer Environmental Science and Engineering. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-0415-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-10-0415-5_1).

**Ivaniuta M. V.**, Candidate of Technical Sciences, Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of National Academy of Agrarian Sciences, Kyiv, Ukraine

**Research of the density of the agrophysical composition of the soil based on magnetic properties**

The article presents the results of theoretical and experimental studies to determine the magnetic susceptibility of soil and its particle size distribution components by the induction method. According to its physicochemical composition, the soil

can be classified as a composite material of diamagnets and paramagnets with a granulometric composition of sand and clay in the appropriate proportions, which are significant in the flow determination of soil density.

*Research objective: Improvement of the flow non-destructive determination of soil density in the technological chain "Compositional composition – magnetic susceptibility in a cyclic magnetic field – density of the main types of soils".*

*Research methods: Analytical studies of the principles of interaction of the magnetic field with dia- and paramagnets. Experimental studies of the interaction of soil samples and its particle size distribution components with an alternating magnetic field. Analysis of experimentally obtained characteristics within the ranges of interactions of the particle size distribution of the soil with the magnetic field.*

*Research results: Dependencies of the interaction of magnetic susceptibility with the index of density and particle size distribution of soil were obtained. A regression analysis of the relationship between density and magnetic susceptibility under the cyclic interaction of the magnetic field was performed. The time of interaction of cyclic interaction is substantiated from the standpoint of constructing models of correlation of magnetic susceptibility indicators by particle size distribution components. Linear models of functional relationships of density and magnetic susceptibility indicators for the duration of the cyclic interaction range for granulometric compositions of the main soil types have been developed. The results of the research are promising for the development of means for the flow non-destructive study of agrophysical indicators of the soil.*

**Key words:** soil density, particle size distribution, magnetic permeability, magnetic susceptibility, magnetochemistry.