

АГРОХІМІЯ ТА ҐРУНТОЗНАВСТВО

УДК 631.81:631.45

DOI: <https://doi.org/10.47414/np.33.2025.349297>

Особливості реакції сірих опідзолених ґрунтів на диференційоване вапнування

 Я. І. Бойко

Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна, e-mail: iaroslavboik@gmail.com

Мета. Виявити особливості впливу диференційованого вапнування на родючість сірих опідзолених ґрунтів Полісся України. **Методи.** Дослідження проводили впродовж 2020–2024 рр. на полі площею 415 га (с. Гарбузин, Чернігівська обл.). Відбір ґрунтових зразків здійснювали за адаптивною сіткою (10 га/елементарна ділянка) з використанням автоматичного пробовідбірника AgriSoilSampler та GPS-навігації. Ґрунтовий покрив поля представлений сірими опідзоленими пилувато-суглинковими ґрунтами. Аналіз агрохімічних показників проводили стандартними лабораторними методами, а просторовий розподіл оцінювали методом Крігінга у QGIS. **Результати.** Просторовий аналіз показав, що кислотність ґрунтів є ключовим фактором формування неоднорідності агрохімічних показників. Переважна частина поля мала сильно кислу реакцію (рН 4,7–5,3), локальні ділянки – кислу (рН 5,4–5,7) або слабкокислу/нейтральну (рН 5,8–6,4). Просторовий розподіл органічної речовини був відносно рівномірним (1,3–2,6%), тоді як фосфор і калій мали значну строкатість. Після диференційованого вапнування у 2024 р. вміст органічної речовини знизився на 0,1–0,2%, тоді як рухомі форми фосфору та калію зросли і вирівнялися по всій площі поля. Обмінний кальцій досяг середнього рівня, магній залишався стабільним, а доступність цинку дещо знизилася. Найбільш виразне підвищення доступності макроелементів спостерігалось на сильно кислих ділянках (рН < 5,0), тоді як на ділянках зі слабкокислою реакцією приріст був помірним. **Висновки.** Диференційоване вапнування сірих опідзолених ґрунтів Полісся сприяє вирівнюванню просторового розподілу кислотності, підвищує доступність фосфору та калію для рослин і зменшує ризики обмеженого мінерального живлення на кислих ділянках. Отримані дані можуть слугувати основою для впровадження точних технологій внесення вапнякових меліорантів у виробництво.

Ключові слова: диференційоване вапнування; кислотність ґрунту; рН; агрохімічні показники; рухомий фосфор; рухомий калій; обмінний кальцій; магній; цинк; просторова неоднорідність; точне землеробство; Полісся України.

Як цитувати: Бойко Я. І. Особливості реакції сірих опідзолених ґрунтів на диференційоване вапнування. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2025. Вип. 33. С. 120–136. <https://doi.org/10.47414/np.33.2025.349297>



© The Author(s) 2025. Published by Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the NAAS of Ukraine. This is an open access article distributed under the terms of the license CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Вступ

Кислі ґрунти займають значну частку орних земель у світі [1, 2], зокрема в зоні Полісся України, і залишаються одним із ключових обмежувальних чинників реалізації продуктивного потенціалу сільськогосподарських культур у цьому регіоні. Підвищена кислотність ґрунтового середовища негативно впливає на фізико-хімічні властивості ґрунту, катіонний склад ґрунтового вбирного комплексу, активність ґрунтової біоти та доступність елементів живлення для рослин. За таких умов істотно знижується ефективність мінеральних добрив, а просторові відмінності ґрунтових властивостей зумовлюють нерівномірність росту й розвитку культур у межах одного поля [3, 4].

Особливої актуальності проблема підвищеної кислотності набуває на великих виробничих масивах, де ґрунтовий покрив характеризується строкатістю, сформованою під впливом ґрунтотворних порід, мікрорельєфу, гідрологічних умов і тривалої історії землекористування. За таких обставин у межах одного поля можуть одночасно співіснувати ділянки зі сильно кислою, кислою та слабкокислою реакцією ґрунтового розчину, що суттєво ускладнює застосування уніфікованих агротехнічних заходів і знижує їхню виробничу ефективність [5–7].

Вапнування є базовим агрохімічним прийомом хімічної меліорації кислих ґрунтів, спрямованим на нейтралізацію надлишкової кислотності, підвищення насиченості ґрунтового вбирного комплексу кальцієм і магнієм та оптимізацію катіонного балансу. Водночас численні дослідження свідчать, що суцільне внесення вапнякових матеріалів на просторово неоднорідних за властивостями полях не завжди забезпечує очікуваний агрономічний ефект і може призводити як до локального перевапнування, так і до збереження осередків підвищеної кислотності. У цьому контексті розвиток технологій точного землеробства відкриває нові можливості для впровадження диференційованого вапнування, що ґрунтується на результатах детального агрохімічного обстеження та використанні цифрових карт просторового розподілу кислотності ґрунтів [8–10].

Незважаючи на значну кількість наукових публікацій, присвячених впливу вапнування на окремі агрохімічні показники, питання комплексної оцінки змін кислотності, макро- та мікроелементного складу ґрунту в умовах диференційованого вапнування на великих виробничих полях залишається недостатньо висвітленим [11–14]. Особливо актуальним є аналіз того, наскільки такі меліоративні заходи сприяють зменшенню просторової варіабельності агрохімічних показників і формуванню більш однорідного агрохімічного фону.

Мета досліджень – виявити особливості впливу диференційованого вапнування на родючість сірих опідзолених ґрунтів Полісся України.

Матеріали та методика досліджень

Науково-дослідні роботи проводили на землях, розташованих біля населеного пункту Гарбузин Козелецької селищної громади Чернігівського району Чернігівської області.

У поліській частині області найпоширенішими є дерново-підзолисті ґрунти, переважно супіщаного гранулометричного складу. Водночас у Корюківському та Щорському районах майже половину площ займають зв'язно-піщані ґрунти, для яких характерний нижчий рівень природної родючості. Ґрунти Чернігівського і Ріпкинського районів відзначаються більшою зв'язністю, при цьому частка їх легкосуглинкових відмін становить відповідно 23 і 37 %.

Сірі лісові та дернові ґрунти займають 277,8 тис. га, що становить близько 19 % площі. Вони зосереджені переважно в перехідній зоні та найбільш поширені в Куликівському районі (60 %), Козелецькому (52 %) і Коропському (50 %). Уміст гумусу залежно від гранулометричного складу коливається в межах 1,31–2,37 %: у супіщаних відмінах він у середньому становить 1,60 %, у легкосуглинкових – 1,77 %. За реакцією ґрунтового розчину ці ґрунти переважно є слабкокислими або близькими до нейтральних (рН 5,4–5,8) та характеризуються підвищеним вмістом рухомих форм фосфору і середнім вмістом обмінного калію, середньозважені показники яких становлять відповідно 137–159 і 103–112 мг/кг ґрунту. Забезпеченість обмінним кальцієм і магнієм є дещо вищою та сягає відповідно 4,5–6,2 і

1,0–1,1 мг-екв/100 г ґрунту. Бонітет сірих лісових і дернових ґрунтів коливається в межах 36–57 балів.

Клімат Чернігівської області є помірно континентальним, м'яким і достатньо вологим. Зима, як правило, малосніжна, у більшості років стійка та порівняно тепла, тоді як літо характеризується теплими й помірно вологими умовами. Середньорічна кількість атмосферних опадів на території області становить 594–676 мм, при цьому максимум місячних сум опадів припадає на червень – липень, а мінімум – на січень – березень. У міжрічному розрізі сума опадів коливається від 400 до 850 мм, а максимальна добова кількість в окремі роки може сягати 100–140 мм.

Чернігівська область належить до зони достатнього зволоження. Середня річна відносна вологість повітря становить 75–80 %, змінюючись упродовж року від 50–70 % у липні – серпні до 80–95 % у зимовий період. Протягом року відмічається 20–44 доби з відносною вологістю повітря 30 % і менше, що має певне значення для формування умов вегетації та водного режиму ґрунтів.

Таблиця 1

Кількість опадів у роки проведення досліджень (за даними додатку Geosys, Козелецький р-н, 2020–2024 рр.)

Кількість опадів, мм	2020	2021	2022	2023	2024	Середнє
За рік	618	654	751	690	658	635
За вегетаційний період:						
озимих культур	445	533	451	595	717	500
ранніх ярих культур (03–06)	251	213	200	206	301	197
пізніх ярих культур (04–09)	357	403	408	280	339	332

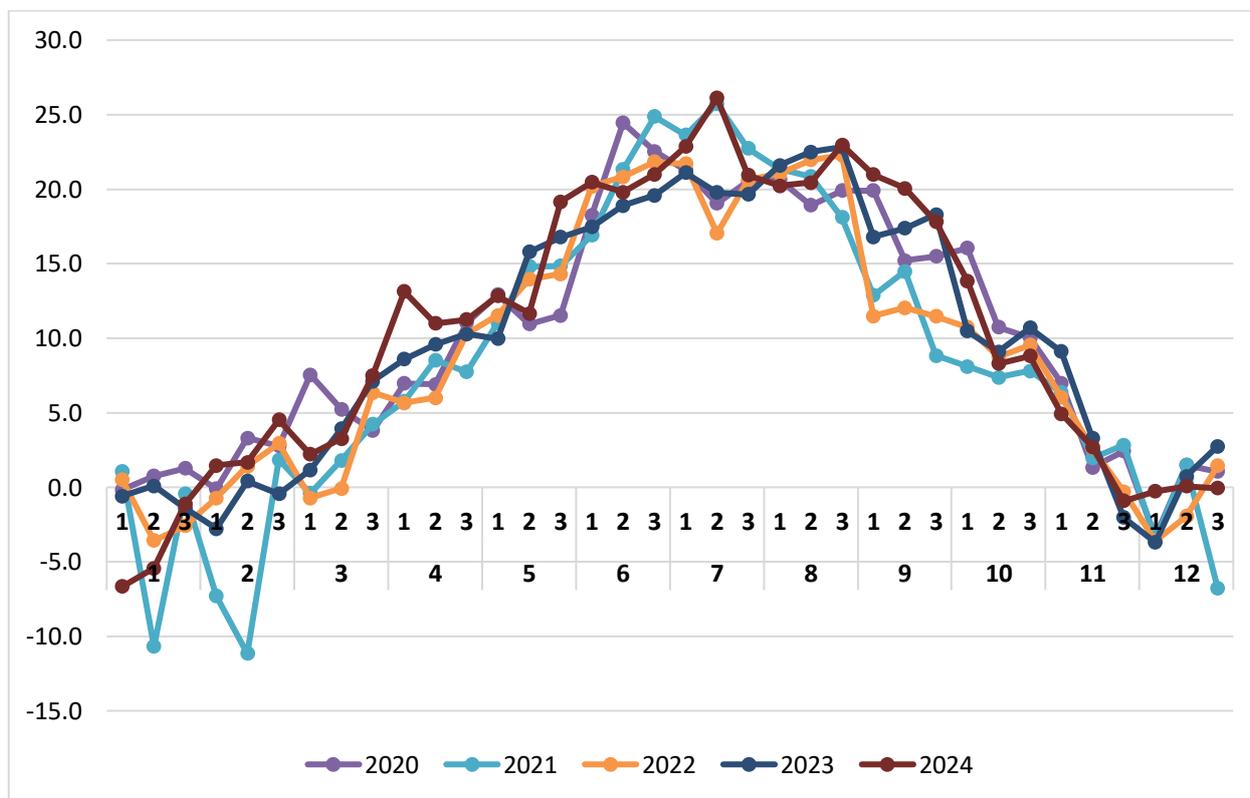


Рис. 1. Середньодобова температура повітря у роки досліджень (за даними додатку Geosys, Козелецький р-н, 2020–2024 рр.)

В умовах Козелецького району динаміка середньодобових температур повітря характеризувалася відносно невеликою декадною мінливістю в межах досліджуваних місяців.

Упродовж 2021–2023 рр. відмічали незначні відхилення середньодобових температур повітря від середньобагаторічної норми у бік її підвищення. Винятком був період із третьої декади червня до другої декади липня 2021 року, коли перевищення температури становило 3,46–5,91 °С. Загалом у зазначений часовий проміжок переважали температури, близькі до середньобагаторічних значень, або їх відхилення у бік зниження.

Такі температурні умови загалом сприятливо вплинули на ріст і розвиток культур, що не потребують накопичення високих сум активних температур повітря, зокрема кукурудзи.

У процесі виконання науково-дослідних робіт застосовано комплекс методів досліджень, зокрема:

– польові – із використанням обладнання та технологій точного землеробства;

– лабораторні – під час проведення агрохімічних і фізико-хімічних аналізів ґрунту та рослин з метою встановлення змін показників родючості ґрунту, рівня засвоєння макро- та мікроелементів рослинами, а також визначення впливу диференційованого застосування вапнякових меліорантів (CaCO_3) на врожайність і якість зерна сільськогосподарських культур;

– математично-статистичні та розрахункові – для аналізу й опрацювання отриманих експериментальних даних та наукового обґрунтування рекомендацій виробництву щодо впровадження технологій диференційованого внесення вапнякових меліорантів (CaCO_3).

Відбір зразків ґрунту здійснювали за допомогою автомобіля типу пікап Mitsubishi L200, обладнаного автоматичним пробовідбірником AgriSoilSampler компанії AgriLab. Пробовідбірник дистанційно керується з кабіни автомобіля та оснащений планшетом із ГІС-програмним забезпеченням для створення і навігації заздалегідь розробленими маршрутами відбору ґрунтових зразків. Автомобіль обладнаний GPS-антенною з точністю позиціонування до 30 см.

Автоматичний відбір ґрунтових зразків проводили за адаптивною сіткою, де площа елементарної ділянки становила 10 га. З кожної ділянки відбирали один змішаний зразок, сформований із 20 точкових проб ґрунту, відібраних буром на глибину до 30 см. Застосована схема відбору забезпечила отримання репрезентативних даних щодо просторової мінливості ґрунтових властивостей на всій території поля та створила передумови для точного агрохімічного аналізу й подальшого впровадження диференційованих агротехнічних заходів (рис. 2).

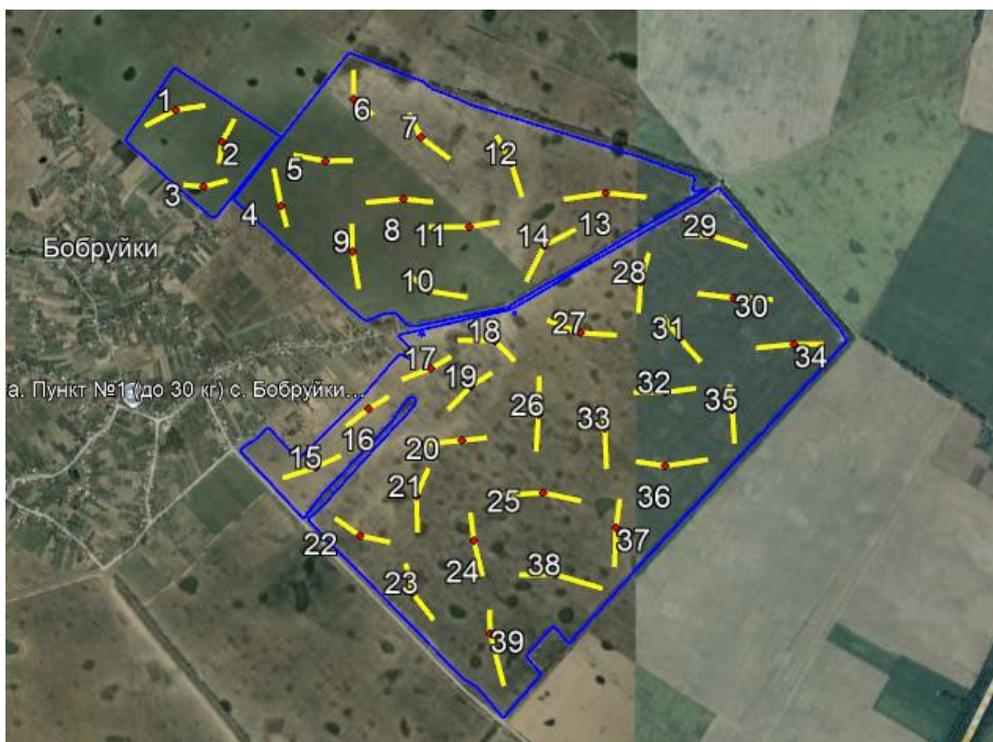


Рис. 2. Схема відбирання ґрунтових зразків на досліджуваному полі 415 га (Гарбузин)

Досліджуване поле загальною площею 415 га, розташоване поблизу села Гарбузин Чернігівської області, характеризується неоднорідним ґрунтовим покривом і значною просторовою мінливістю ґрунтових властивостей, зокрема показника рН. Розміщення варіантів у досліді здійснювали відповідно до зон ґрунтової неоднорідності за рівнем кислотності, повторність досліду була триразовою.

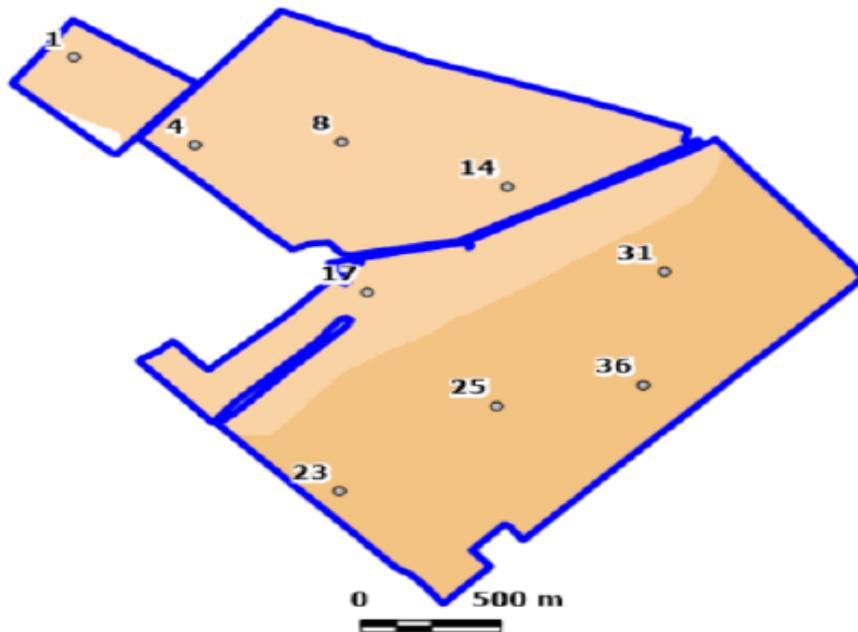
Ґрунтовий покрив дослідного поля представлений сірими опідзоленими пілувато-суглинковими, а також ясно-сірими та темно-сірими опідзоленими пілувато-суглинковими ґрунтами. Агрохімічна та фізико-хімічна характеристика орного шару (0–30 см) цих ґрунтів є такою: рН (1:1) – 4,7–6,5 од.; рН буферний – 6,3–6,9 од.; вміст органічної речовини – 1,3–2,6 %; уміст рухомих форм фосфору – 21–112 мг/кг ґрунту; обмінного калію – 69–134 мг/кг; обмінного кальцію – 180–1672 мг/кг; обмінного магнію – 25–153 мг/кг.

Визначення фізико-хімічних і агрохімічних показників ґрунту проводили з використанням методів, наведених у таблиці 2.

Таблиця 2

Методи визначення агрохімічних та фізико-хімічних показників ґрунту

Показник	Одиниці виміру	Метод визначення
рН ґрунту	од. рН	рН водний (1:1) потенціометрія
рН буферний	од. рН	Wdrf буфер потенціометрія
Орган. речовина	%	Пряме визначення за втратами при спалюванні (LOI)
Нітрати (NO ₃)	мг/кг	Метод відновлення кадмієм (FIA)
Фосфор (P)	мг/кг	Mehlich-3 (Екстрагент: 0,2N CH ₃ COOH, 0,25N NH ₄ NO ₃ , 0,015N NH ₄ F, 0,013N HNO ₃ , 0,001M EDTA)
Калій (K)	мг/кг	Амонійно-ацетатна витяжка (Ac) Екстрагент: 1 M CH ₃ COONH ₄ , рН 7,0 (ICP)
Кальцій (Ca)	мг/кг	Амонійно-ацетатна витяжка (Ac) Екстрагент: 1 M CH ₃ COONH ₄ , рН 7,0 (ICP)
Магній (Mg)	мг/кг	Амонійно-ацетатна витяжка (Ac) Екстрагент: 1 M CH ₃ COONH ₄ , рН 7,0 (ICP)
Натрій (Na)	мг/кг	Амонійно-ацетатна витяжка (Ac) Екстрагент: 1 M CH ₃ COONH ₄ , рН 7,0 (ICP)
Сірка (S)	мг/кг	Монокальцій фосфатна витяжка (Ca-P)
Цинк (Zn)	мг/кг	Діетилен триамін пентаоцтова кислота (DTPA) (ICP)
Залізо (Fe)	мг/кг	Діетилен триамін пентаоцтова кислота (DTPA) (ICP)
Марганець (Mn)	мг/кг	Діетилен триамін пентаоцтова кислота (DTPA) (ICP)
Мідь (Cu)	мг/кг	Діетилен триамін пентаоцтова кислота (DTPA) (ICP)
Бор (B)	мг/кг	Екстрагент: гаряча Н ₂ О
Уміст водорозчинних солей	ммоль/см	Кондуктометрія (Cond 1:1)
Сума катіонів	мг-екв/100 г	Розрахунковий
Насиченість основами	%	Відсоток від базового насичення катіонами



Групування ґрунтів за гранулометричним складом					
Точка	Тип ґрунту	Вміст, %			Гранулометричний склад
		піску	мулу	глини	
1	Ясно-сірі опідзолені ґрунти Темно-сірі опідзолені ґрунти	33	57	10	Пилуватий суглинок
4		22	61	17	Пилуватий суглинок
8		28	64	8	Пилуватий суглинок
14		27	63	10	Пилуватий суглинок
17		36	57	7	Пилуватий суглинок
23	Сірі опідзолені ґрунти	32	55	13	Пилуватий суглинок
25		30	56	14	Пилуватий суглинок
31		29	57	14	Пилуватий суглинок
36		26	60	14	Пилуватий суглинок

Рис. 3. Групування ґрунтів за гранулометричним складом у межах дослідного поля 415 га

Результати досліджень

Результати аналізу зразків ґрунту, відібраних на початку досліджень у межах дослідного поля площею 415 га, наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати аналізу зразків ґрунту, відібраних на початку досліджень у межах дослідного поля 415 га, вихідні дані

Номер зразка	рН (1:1) ґрунту	рН буф.	Розчинні солі, ммоль/см	Органічна речовина, %	Нітрати (NO ₃), мг/кг	Фосфор (P), мг/кг	Амонійно-ацетатний буфер, мг/кг				Сірка (S), мг/кг	Мікроелементи (ДТРА), мг/кг				Сума катіонів, мг-екв на 100 г	Насиченість основами, %				
							K	Ca	Mg	Na		Zn	Fe	Mn	Cu		H	K	Ca	Mg	Na
1	6,1	6,8	0,08	1,4	6,1	40	69	811	91	10	10	0,61	46,0	9,8	0,72	7,1	29	2	57	11	1
2	6,5	6,7	0,09	2,2	6,8	36	99	1330	138	9	8	0,63	58,0	12,1	1,08	11,3	28	2	59	10	0
3	6,5	6,9	0,10	2,6	5,4	38	169	1672	153	9	8	0,59	51,8	10,3	1,29	11,4	11	4	73	11	0
4	5,8	6,4	0,08	2,6	4,2	23	104	1027	136	11	12	0,46	75,9	15,6	1,13	13,0	49	2	40	9	0
5	5,2	6,6	0,09	2,2	4,1	41	111	594	86	10	13	0,35	88,9	20,0	0,91	8,3	52	3	35	9	1
6	5,1	6,4	0,08	1,7	5,0	61	123	225	34	9	16	0,41	125,1	22,9	0,53	8,2	78	4	14	3	0
7	5,0	6,6	0,07	1,3	4,4	51	95	331	42	10	13	0,51	127,4	23,6	0,46	6,1	62	4	27	6	1
8	5,3	6,4	0,04	1,4	3,1	36	92	346	56	10	15	0,62	100,2	20,5	0,52	8,0	69	3	21	6	1
9	5,8	6,8	0,08	1,5	3,2	49	86	617	69	11	11	0,48	89,0	12,5	0,60	6,1	36	4	50	9	1
10	5,8	6,6	0,05	1,3	2,9	42	78	395	52	8	7	0,66	144,3	20,3	0,48	6,5	60	3	29	7	1
11	5,7	6,8	0,06	1,4	4,7	46	116	516	59	8	11	0,41	56,8	12,9	0,43	5,2	35	6	49	9	1
12	5,7	6,5	0,08	1,7	2,1	20	134	696	87	8	11	0,49	56,6	25,4	0,76	9,4	51	4	37	8	0
13	5,5	6,7	0,08	1,6	2,6	20	88	673	78	8	12	0,29	46,9	19,0	0,63	7,0	39	3	48	9	0
14	5,3	6,4	0,06	1,5	5,3	48	78	434	61	9	11	0,43	83,3	18,9	0,66	8,4	65	2	26	6	0

АГРОХІМІЯ ТА ҐРУНТОЗНАВСТВО

Номер зразка	рН (1:1) ґрунту	рН буф.	Розчинні солі, ммоль/см	Органічна речовина, %	Нітрати (NO ₃), мг/кг	Фосфор (P), мг/кг	Амонійно-ацетатний буфер, мг/кг				Сірка (S), мг/кг	Мікроелементи (ДТРА), мг/кг				Сума катіонів, мг-екв на 100 г	Насиченість основами, %				
							K	Ca	Mg	Na		Zn	Fe	Mn	Cu		H	K	Ca	Mg	Na
15	4,7	6,4	0,05	1,3	2,9	106	122	180	31	9	16	0,67	114,9	42,6	0,85	7,0	79	4	12	4	1
16	5,2	6,3	0,04	1,5	5,3	105	104	185	25	9	21	0,89	250,1	54,4	0,78	8,2	83	3	11	2	0
17	5,2	6,7	0,06	1,4	4,7	86	96	367	39	10	14	0,60	162,0	29,0	0,56	6,0	59	4	30	6	1
18	5,3	6,4	0,05	1,4	3,4	112	115	302	30	9	17	0,35	86,6	20,4	0,35	8,3	75	4	18	3	0
19	5,3	6,7	0,08	1,6	3,2	62	87	519	56	9	11	0,41	80,3	15,5	0,59	6,5	49	3	40	7	1
20	5,3	6,5	0,05	1,2	3,2	56	80	342	50	10	12	0,43	68,1	25,6	0,59	7,7	69	3	22	5	1
21	5,4	6,7	0,12	1,8	3,1	21	76	641	98	7	11	0,26	53,3	20,8	0,76	6,8	38	3	47	12	0
22	5,5	6,6	0,07	1,5	2,5	50	77	511	71	7	11	0,52	72,8	20,0	0,77	7,8	57	3	32	8	0
23	5,5	6,7	0,10	1,7	3,6	36	98	888	131	8	12	0,33	57,1	18,5	0,91	8,6	32	3	52	13	0
24	5,3	6,4	0,11	2,0	3,1	22	89	622	89	8	9	0,28	65,6	24,6	0,88	9,8	58	2	32	8	0
25	5,2	6,6	0,12	2,3	3,7	39	123	781	105	9	14	0,32	70,8	27,4	0,95	9,5	46	3	41	9	0
26	5,2	6,4	0,10	1,7	3,6	40	107	444	53	8	12	0,32	88,2	32,8	0,84	9,3	68	3	24	5	0
27	5,0	6,6	0,12	2,0	3,8	47	123	454	74	8	13	0,42	101,8	34,2	0,99	7,6	58	4	30	8	0
28	5,0	6,3	0,11	1,7	2,1	37	128	401	75	9	16	0,36	107,4	40,6	1,00	10,2	71	3	20	6	0
29	5,0	6,5	0,10	1,7	3,2	29	93	597	103	9	12	5,13	91,4	36,3	1,08	8,9	54	3	33	10	0
30	5,3	6,5	0,09	1,8	3,4	39	117	581	116	11	13	0,45	67,3	26,9	0,94	9,4	55	3	31	10	0
31	5,2	6,7	0,09	1,8	2,5	18	70	407	75	6	10	0,18	58,2	25,6	0,86	6,3	54	3	32	10	0
32	5,3	6,5	0,08	1,7	3,2	37	99	534	85	7	14	0,29	65,8	25,3	0,89	9,0	59	3	30	8	0
33	5,4	6,6	0,09	2,1	3,8	4	96	689	75	7	2	0,31	95,4	32,5	0,93	7,9	45	3	43	8	0
34	5,2	6,4	0,09	1,9	2,7	24	111	468	81	9	11	0,37	84,2	28,7	1,09	9,4	65	3	25	7	0
35	5,0	6,6	0,08	1,9	2,7	17	123	611	101	10	13	0,28	73,7	29,7	0,97	8,7	51	4	34	10	1
36	5,1	6,3	0,10	1,9	2,8	36	160	542	78	9	15	0,39	142,1	33,4	0,94	10,8	65	4	25	6	0
37	5,3	6,7	0,11	1,7	2,7	27	122	684	84	8	9	0,39	72,2	23,7	0,86	7,9	43	4	43	9	0
38	5,3	6,4	0,10	2,1	3,8	19	105	845	113	9	6	0,49	88,5	29,6	1,06	11,4	52	2	37	8	0

У середньому по дослідному полю рН ґрунту становив 5,4, буферний рН – 6,6, уміст розчинних солей – 0,08 ммоль/см³, органічної речовини – 1,7 %, нітратів – 3,6 мг/кг, фосфору – 42,3 мг/кг, калію – 105,4 мг/кг. Обмінний кальцій становив 603,2 мг/кг, магній – 81,0 мг/кг, натрій – 8,9 мг/кг, сірка – 11,9 мг/кг, залізо – 88,0 мг/кг, марганець – 25 мг/кг, а сума катіонів – 8,5 мг-екв/100 г ґрунту.

Для картографування ґрунтових властивостей та інтерпретації просторових варіацій застосовували інтерполяцію методом Крігінга у ГІС-програмі QGIS. Цей підхід дає змогу створювати точні карти розподілу ґрунтових показників, урахувавши просторову кореляцію даних і підвищуючи точність прогнозів для диференційованого управління агротехнічними процесами (рис. 4–8).

На відміну від попередніх дослідних полів, локація характеризується більш рівномірним просторовим розподілом показника кислотності. Основна частина ґрунтів має сильно кислу реакцію (рН 4,7–5,3), на другому місці за площею – ґрунти з кислою реакцією (рН 5,4–5,7). Слабокислі та нейтральні ґрунти здебільшого локалізовані в окремих ділянках, що свідчить про їх спільний генезис та однорідність походження.

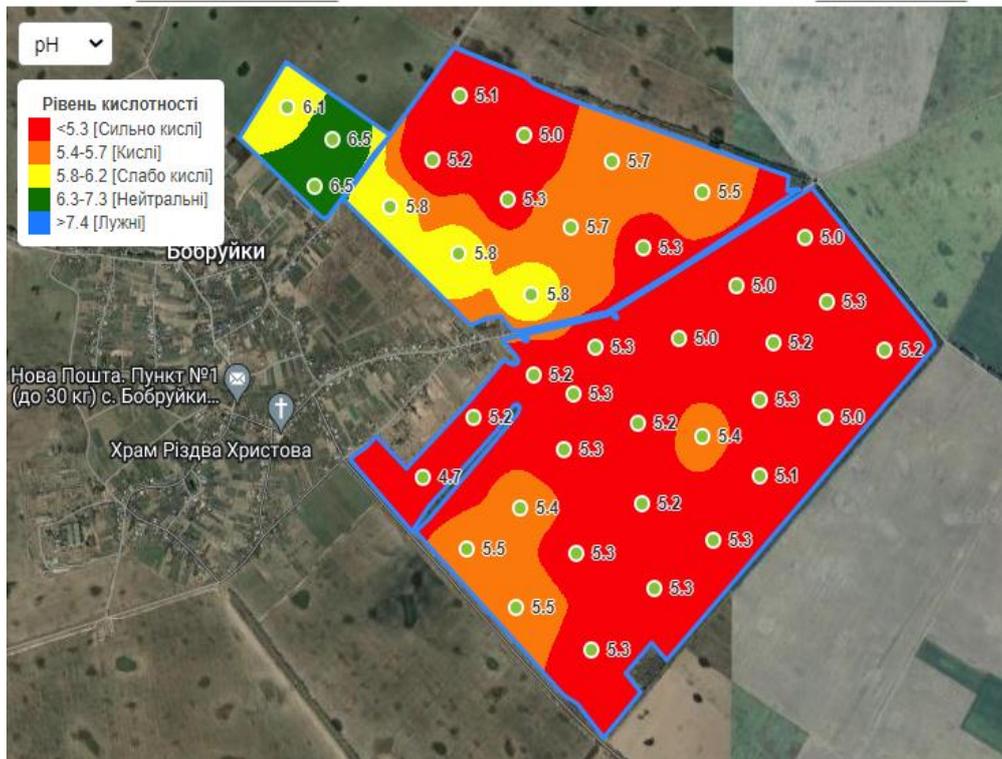
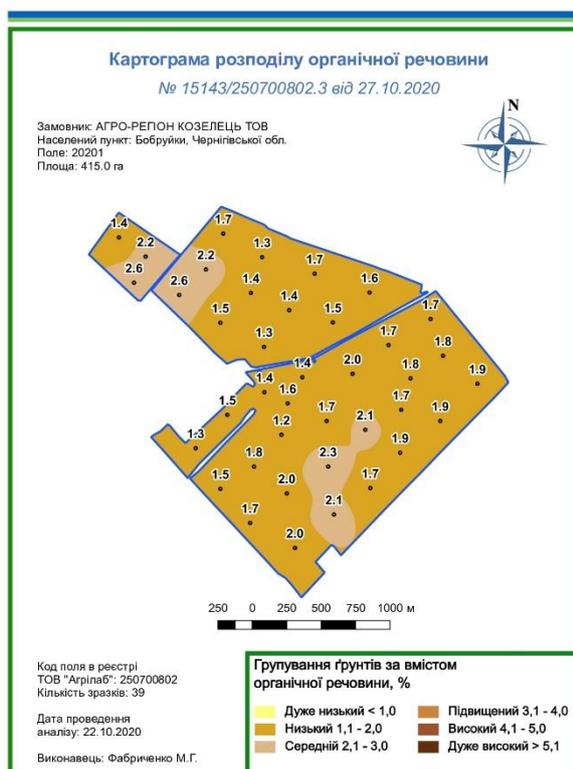
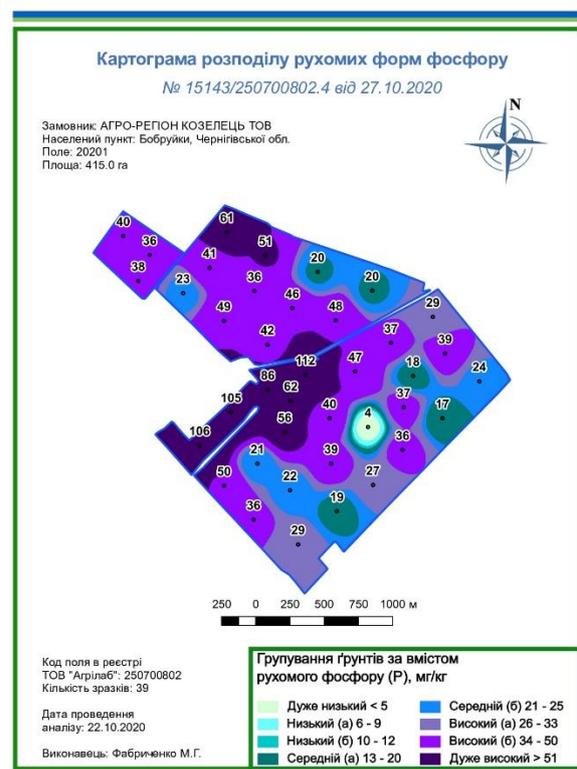


Рис. 4. Картосхема розподілу показника рН (Kriging), поле 415 га, вихідні дані

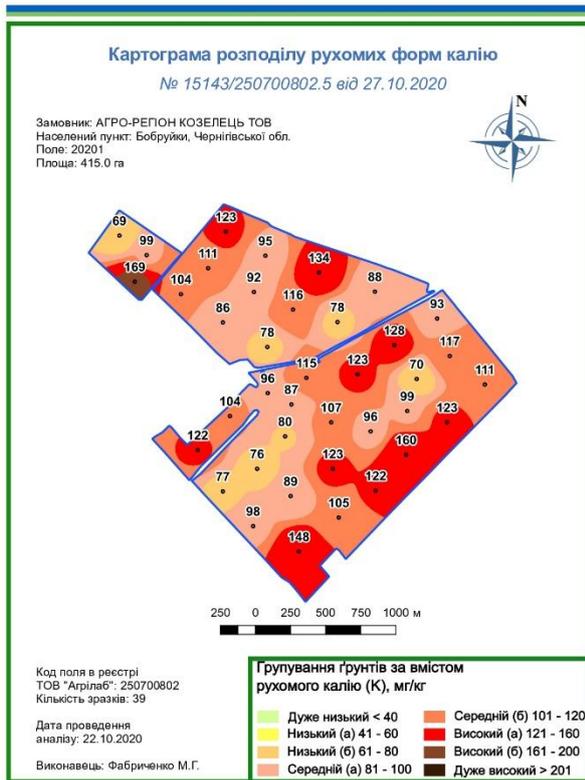
За вмістом органічної речовини дослідне поле характеризується відносно рівномірним розподілом показників, при цьому здебільшого переважають низькі значення, а середні (2,1–2,6 %) зафіксовані лише у двох окремих ділянках. Натомість за вмістом фосфору та калію спостерігалася значно більша просторово-структурна мінливість – від дуже низьких до дуже високих значень. При цьому відповідні ділянки, зазвичай, не корелюють між собою і розташовані в різних зонах кислотності ґрунту (рис. 5).



Уміст органічної речовини



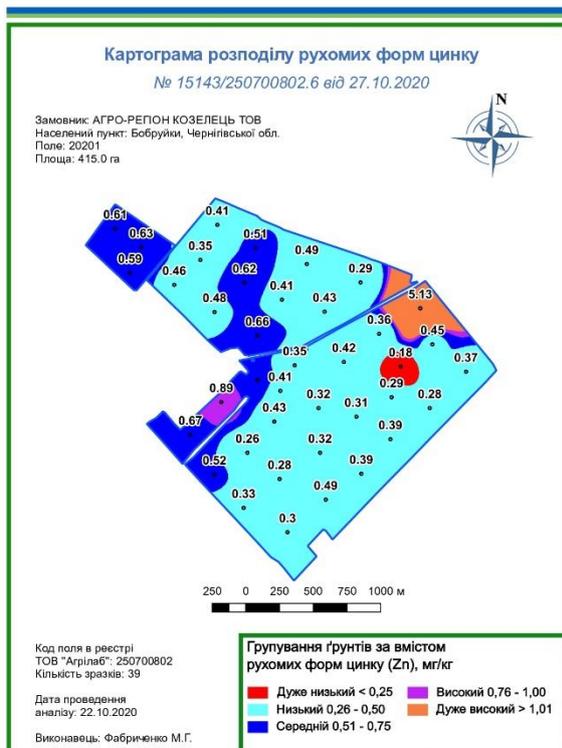
Уміст рухомих форм фосфору



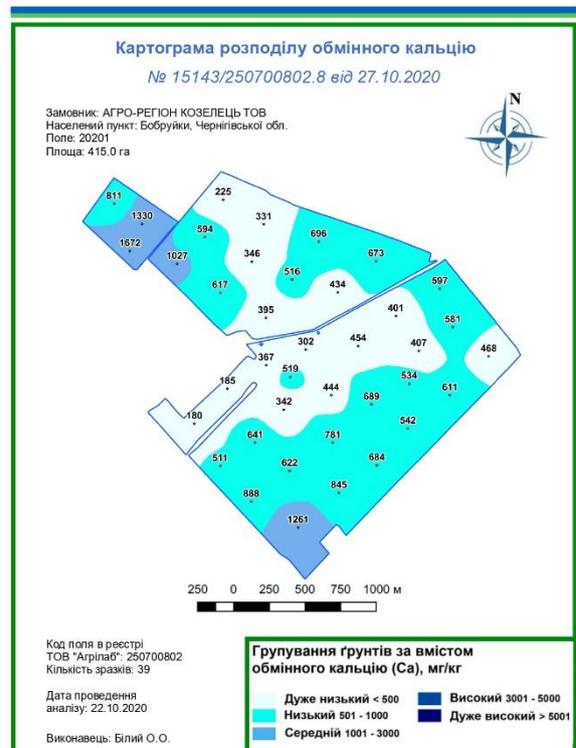
Уміст рухомих форм калію

Рис. 5. Картограма розподілу вмісту органічної речовини, рухомих форм фосфору та калію, поле 415 га, 2020 р.

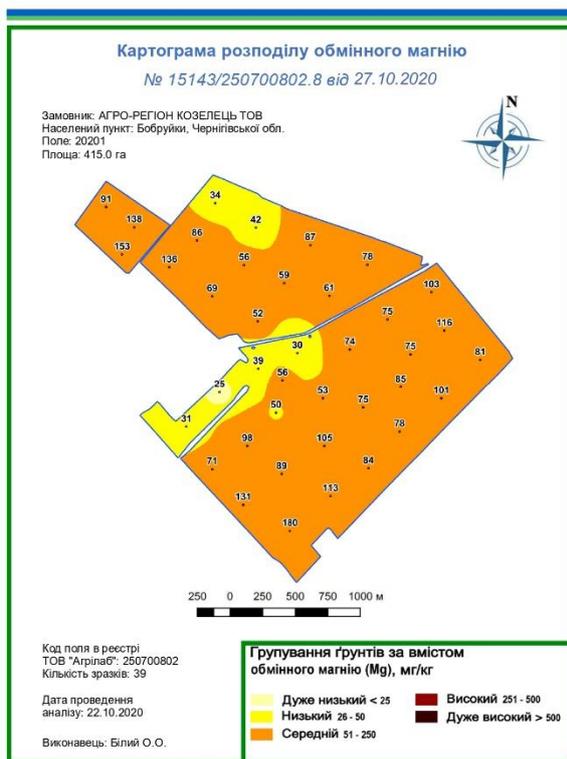
Закономірності зміни рухомих форм цинку та обмінного магнію (рис. 6) мають менш строкатий характер просторового розподілу, з переважанням відповідно низького та середнього забезпечення ґрунту.



Уміст рухомих форм цинку



Уміст обмінного кальцію



Уміст обмінного магнію

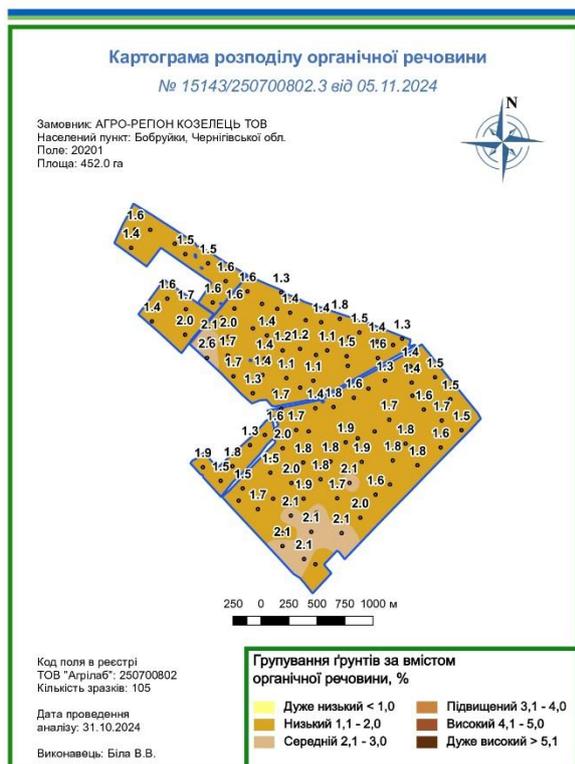
Рис. 6. Картограма розподілу вмісту рухомих форм цинку та обмінного кальцію і магнію, поле 415 га, 2020 р.

Питання просторового розподілу обмінного кальцію залишається не зовсім зрозумілим і потребує додаткового дослідження, оскільки зони підвищеної кислотності ґрунту не завжди збігаються з ділянками з дуже низьким або низьким умістом цього елемента. Особливо це помітно на точці в нижньому лівому куті поля, де рН становить 5,3, а обмінний кальцій має середнє значення – 1261 мг/кг ґрунту.

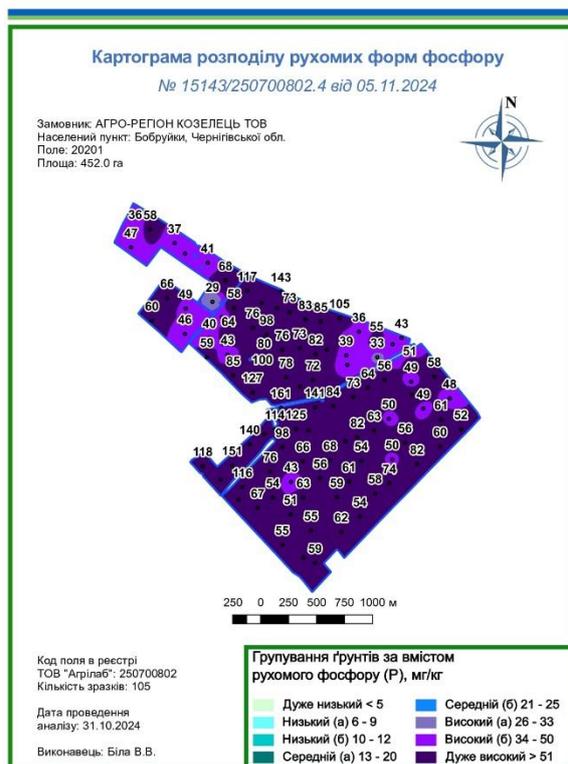
Аналіз змін агрохімічних показників ґрунту дослідного поля після проведення вапнування показав, що станом на 2024 рік вміст органічної речовини здебільшого знизився на 0,1–0,2 % (рис. 7). Зони середнього вмісту органіки частково збереглися, проте скоротилися за площею, а переважна частина поля характеризується низьким рівнем органічної речовини.

За показниками рухомих форм фосфору спостерігається суттєве зростання доступних рослинам кількостей та вирівнювання значень по всій площі поля до рівня дуже високого вмісту. На початку досліджень високий рівень цього елемента відзначався лише в окремих ділянках, а решта поля характеризувалася варіацією від дуже низького до високого вмісту. Зміни вмісту рухомих форм фосфору корелюють із вихідними значеннями: на ділянках із низьким або середнім вмістом у 2024 році зафіксовано високий рівень, тоді як зворотного зниження фосфору на ділянках із початково високим вмістом не спостерігається.

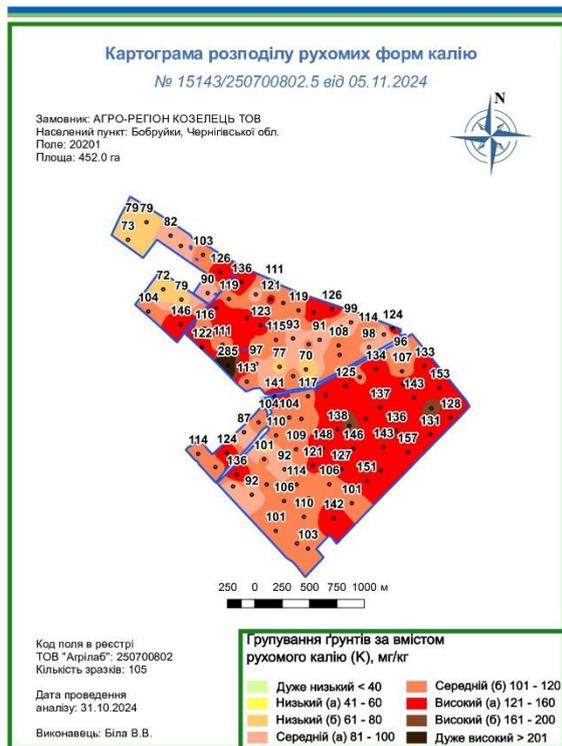
Аналіз картограм розподілу рухомих форм калію показав загальне зростання концентрації цього елемента, особливо у правому середньому куті поля, де відбулося вирівнювання значень до рівня високої концентрації, хоча на початку досліджень вони були середніми або низькими. Водночас окремі точки зберегли початковий рівень або навіть дещо знизили його, що потребує додаткового вивчення.



Уміст органічної речовини



Уміст рухомих форм фосфору



Уміст рухомих форм калію

Рис. 7. Картограма розподілу вмісту органічної речовини, рухомих форм фосфору та калію, поле 415 га, 2024 р.

Також проаналізовано закономірності зміни рухомих форм цинку та обмінного магнію (рис. 8). Аналіз динаміки рухомих форм цинку свідчить про зниження його доступності для рослин порівняно з 2020 роком. Спостерігається розширення площ із дуже низьким умістом елемента, переважно за рахунок трансформації зон, які раніше характеризувалися низьким рівнем забезпеченості.

За вмістом обмінного кальцію спостерігалось насичення ґрунту рухомими формами: з показників дуже низького та низького рівня у 2020 році сформувалися значення, що відповідають низькому та середньому вмісту, а в одній точці – високому. У випадку магнію

просторове групування залишалося незмінним, проте відзначалося підвищення концентрації в межах групи середнього вмісту.

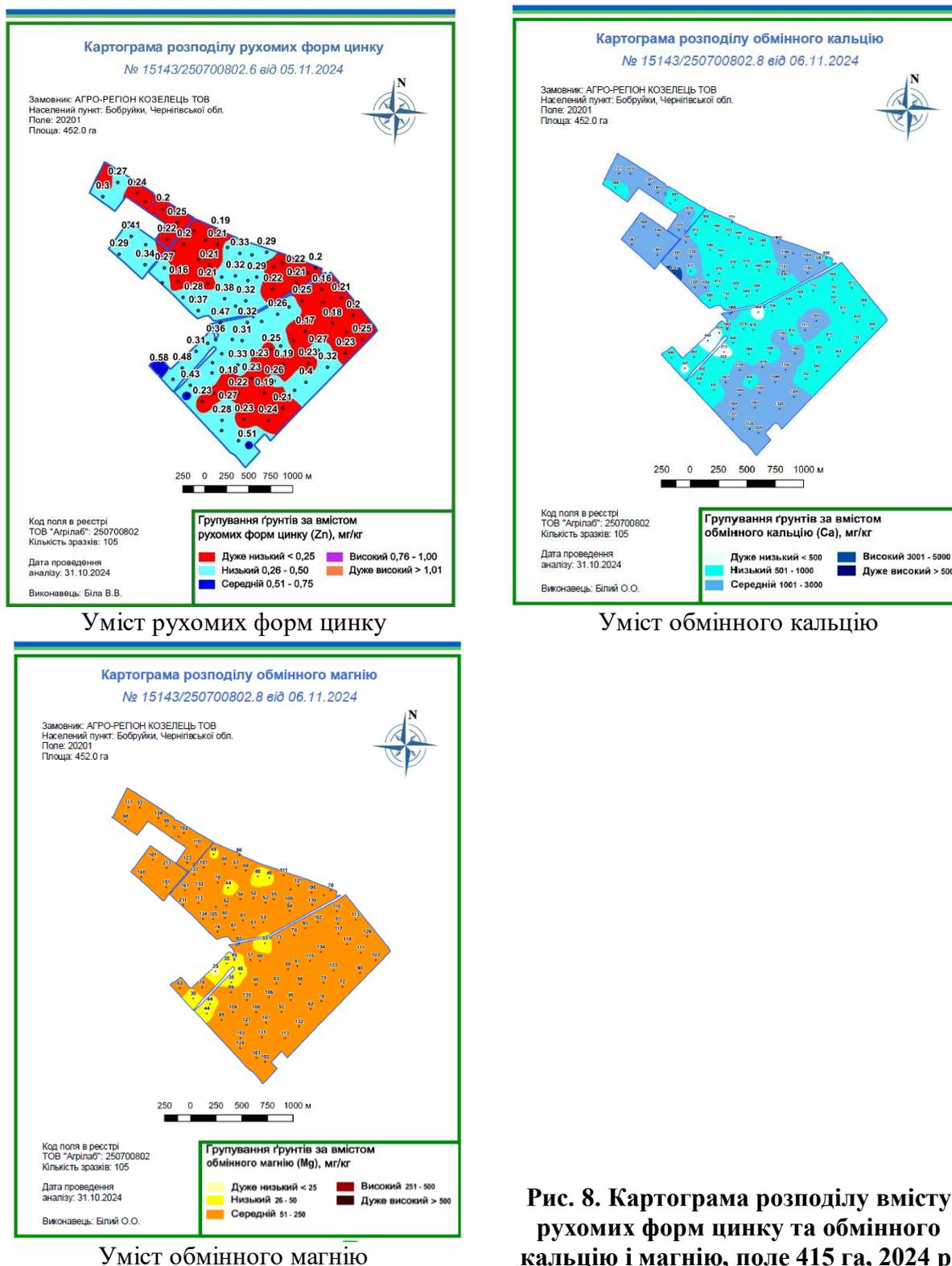


Рис. 8. Картограма розподілу вмісту рухомих форм цинку та обмінного кальцію і магнію, поле 415 га, 2024 р.

Аналіз вихідних агрохімічних даних свідчить, що кислотність ґрунту на дослідному полі площею 415 га є ключовим фактором формування просторової неоднорідності агрохімічних показників. Значення рН(1:1) коливалися в межах 4,7–6,4, а буферний рН – 6,0–6,7, що свідчить про переважання кислих і сильно кислих ґрунтів із наявністю локальних зон зі слабкокислого та близькою до нейтральної реакцією. Картографічний аналіз виявив чітко

виражений просторовий градієнт кислотності з формуванням «острівців» сильно кислих ґрунтів (рН 4,7–5,3), які охоплюють значну частину площі поля.

Саме ці зони виступають осередками потенційного зниження ефективності мінерального живлення, оскільки за таких значень рН підвищується активність рухомих форм Al та Fe, що сприяє фіксації фосфору та зменшенню його доступності для рослин. Водночас у зонах із рН 5,8–6,4 формуються сприятливіші умови для засвоєння макроелементів, проте підвищується ризик зниження доступності деяких мікроелементів, передусім цинку.

Уміст органічної речовини на полі площею 415 га варіював у межах 1,3–2,6 %, із середнім значенням близько 1,7 %, що відповідає низькому та середньому рівню гумусованості сірих опідзолених ґрунтів. Просторовий розподіл цього показника був відносно більш вирівняним порівняно з іншими агрохімічними параметрами, проте ділянки з підвищеним умістом органічної речовини частіше збігалися із зонами підвищених концентрацій калію та, частково, фосфору. Це свідчить про те, що органічна речовина виконує буферну функцію щодо поживних елементів, підвищуючи ємність катіонного обміну та стабілізуючи їх доступність. Водночас слабка кореляція між умістом органічної речовини та кислотністю ґрунту вказує на значний вплив історії землекористування, систем удобрення та гранулометричного складу на формування сучасного агрохімічного стану поля.

Уміст рухомих форм фосфору на полі варіював від 21 до 112 мг/кг, що охоплює градації від низького до дуже високого забезпечення. Просторовий розподіл фосфору мав яскраво виражену строкатість і практично не корелював із картографами кислотності. Така ситуація свідчить про те, що фосфорний режим поля значною мірою сформований під впливом локальних агротехнічних факторів – нерівномірного внесення добрив, різної інтенсивності винесення врожаєм та неоднорідності ґрунтового покриву.

Після проведення диференційованого вапнування у 2024 році зафіксовано істотне підвищення доступності фосфору та одночасне вирівнювання його концентрацій по площі поля. Ділянки з низьким і середнім вихідним умістом фосфору перейшли до групи з високим і дуже високим забезпеченням, при цьому зон зі зниженням цього показника не виявлено. Це підтверджує ключову роль нормалізації кислотності у зменшенні фіксації фосфору сполуками Fe та Al та підвищенні ефективності раніше внесених добрив.

Рухомі форми калію варіювали в межах 69–134 мг/кг із середнім значенням близько 105 мг/кг, що відповідає переважно середньому рівню забезпечення. На відміну від фосфору, калій виявляв меншу чутливість до кислотності ґрунту, а його просторовий розподіл значною мірою визначався текстурними особливостями ґрунтів та історією удобрення.

Після вапнування спостерігалось загальне підвищення концентрацій рухомого калію, особливо в центральних і правобережних частинах поля, де раніше фіксувався середній і низький рівень забезпечення. У низці точок змін не виявлено або зафіксовано незначне зниження, що може бути пов'язано з підвищеним винесенням калію врожаєм або перерозподілом його форм у ґрунті. Це підкреслює необхідність подальшого диференційованого управління калійним живленням навіть після нормалізації рН.

Уміст обмінного кальцію на полі площею 415 га до вапнування варіював від 180 до 1672 мг/кг, що свідчить про значну неоднорідність катіонного складу ґрунтового вбирного комплексу. Просторове співпадіння зон із низьким Ca та зонами високої кислотності було неповним, що вказує на складний генезис ґрунтового покриву та можливий вплив материнських порід.

Після вапнування зафіксовано чітку тенденцію до насичення ґрунту обмінним кальцієм: зони дуже низького та низького забезпечення практично зникли, а більшість площі перейшла до групи середнього вмісту Ca, в окремих точках – високого. Магній характеризувався більш стабільним просторовим розподілом (25–153 мг/кг) і після вапнування демонстрував зростання концентрацій без зміни груп забезпеченості, що свідчить про відсутність негативного дисбалансу Ca:Mg.

Рухомі форми цинку мали відносно вирівняний просторовий розподіл, проте після вапнування спостерігалось зниження його доступності та збільшення площ із дуже низьким

вмістом. Це узгоджується з відомими закономірностями зменшення рухомості Zn за підвищення рН і вказує на необхідність контролю мікроелементного живлення в умовах нормалізованої кислотності. Рухомі форми Fe та Mn, які в кислих ґрунтах можуть проявляти токсичність, після вапнування перебували у більш стабільних концентраціях, що знижує ризики негативного впливу на рослини.

Отримані дані свідчать, що диференційоване вапнування на полі площею 415 га не лише ефективно нейтралізувало кислотність ґрунту, а й суттєво трансформувало просторову структуру агрохімічних показників. Найбільш виражений ефект відзначено для фосфорного режиму та катіонного складу ґрунтового вбирного комплексу, тоді як калій і мікроелементи потребують подальшого диференційованого управління. Результати дослідження підтверджують доцільність інтеграції диференційованого вапнування з системами точного землеробства як ключового інструменту підвищення ефективності використання добрив і стабілізації родючості сірих опідзолених ґрунтів Полісся України.

Висновки

Агрохімічний стан ґрунту дослідного поля площею 415 га до проведення вапнування характеризувався високою просторовою неоднорідністю кислотності, із діапазоном рН(1:1) 4,7–6,4, що обумовлювало формування локальних осередків сильно кислих ґрунтів і створювало нерівномірні умови живлення рослин у межах одного виробничого масиву.

Кисла реакція ґрунтового середовища виступала системообмежувальним чинником родючості, насамперед через посилену фіксацію фосфору сполуками заліза та алюмінію, порушення катіонного балансу ґрунтового вбирного комплексу та зниження ефективності використання внесених мінеральних добрив.

Диференційоване вапнування забезпечило ефективну нейтралізацію кислотності та вирівнювання реакції ґрунтового середовища, що проявилось у зменшенні площ сильно кислих ділянок і переході більшості ґрунтів до слабкокислого та близького до нейтрального діапазону рН. Це підтверджує доцільність просторово орієнтованого підходу до хімічної меліорації на великих неоднорідних полях.

Уміст органічної речовини (1,3–2,6 %) відповідав низькому та середньому рівням гумусованості і мав відносно вирівняний просторовий розподіл порівняно з іншими агрохімічними показниками. Вапнування не призвело до деградаційних змін гумусового стану ґрунту, що свідчить про екологічну безпечність застосованих доз меліорантів.

Фосфорний режим ґрунту характеризувався значною просторовою мозаїчністю (21–112 мг/кг); після нормалізації кислотності відзначено підвищення доступності фосфору та зменшення контрастності його розподілу, що підтверджує ключову роль оптимізації рН у підвищенні ефективності раніше внесених фосфорних добрив.

Рухомі форми калію (69–134 мг/кг) виявляли меншу чутливість до кислотності ґрунту, а їх просторовий розподіл визначався переважно гранулометричним складом ґрунтів та історією удобрення. Після вапнування зберігалася необхідність диференційованого управління калійним живленням для запобігання локальному дефіциту або надлишку елемента.

Обмінний кальцій є основним індикатором ефективності вапнування: після внесення меліорантів зафіксовано істотне підвищення його вмісту та перехід ґрунтів від низького до середнього рівня забезпеченості. Обмінний магній залишався стабільним і не демонстрував ознак негативного дисбалансу у співвідношенні Ca:Mg.

Мікроелементний режим ґрунту після вапнування зазнав диференційованих змін: стабілізувалися концентрації потенційно токсичних форм Fe та Mn, водночас виявлено тенденцію до зниження доступності рухомих форм цинку, що потребує додаткового агрохімічного контролю та корекції системи мікроелементного живлення.

Загальний ефект диференційованого вапнування проявився у зменшенні просторової варіабельності агрохімічних показників, поліпшенні катіонного балансу та створенні більш однорідного агрохімічного фону, що є необхідною передумовою для стабілізації врожайності та підвищення ефективності системи удобрення.

Використана література

1. Li Y., Cui S., Chang S. X., Zhang Q. Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: A global meta-analysis. *Journal of Soils and Sediments*. 2018. Vol. 19. P. 1393–1406. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2120-2>
2. Saarsalmi A., Tamminen P., Kukkola M., Levula T. Effects of liming on chemical properties of soil, needle nutrients and growth of Scots pine transplants. *Forest Ecology and Management*. 2011. Vol. 262, Iss. 2. P. 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.03.033>
3. Šrámek V., Fadrhonsová V., Vortelová L., Lomský B. Development of chemical soil properties in the western Ore Mts. (Czech Republic) 10 years after liming. *Journal of Forest Science*. 2012. Vol. 58, Iss. 2. P. 57–66. <https://doi.org/10.17221/72/2011-JFS>
4. Ouimet R., Moore J.-D. Effects of fertilization and liming on tree growth, vitality and nutrient status in boreal balsam fir stands. *Forest Ecology and Management*. 2015. Vol. 345. P. 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.02.032>
5. Fleck S., Eickenscheidt N., Ahrends B. et al. Nitrogen status and dynamics in German forest soils. *Status and Dynamics of Forests in Germany: Results of the National Forest Monitoring* / ed. by N. Wellbrock, A. Bolte. Cham: Springer Nature, 2019. Vol. 237. P. 123–166. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_5
6. Swoboda P., Döring T. F., Hamer M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 807, Pt 3. Article 150976. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>
7. Zárate-Valdez J. L., Zasoski R. J., Läuchli A. Short-term effects of moisture content on soil solution pH and soil Eh. *Soil Science*. 2006. Vol. 171, Iss. 5. P. 423–431. <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000222887.13383.08>
8. Alloway B. J. Sources of heavy metals and metalloids in soils. *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability* / ed. by B. J. Alloway. Berlin; Heidelberg: Springer, 2012. P. 11–50. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_2
9. Hobara S., Kushida K., Kim Y. et al. Relationships among pH, minerals, and carbon in soils from tundra to boreal forest across Alaska. *Ecosystems*. 2016. Vol. 19. P. 1111–1127. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-9989-7>
10. Wei Y.-M., Chen K., Kang J.-N. et al. Policy and management of carbon peaking and carbon neutrality: A literature review. *Engineering*. 2022. Vol. 14. P. 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.12.018>
11. Zeraatpisheh M., Ayoubi S., Sulieman M., Rodrigo-Comino J. Determining the spatial distribution of soil properties using environmental covariates and multivariate statistical analysis: A case study in semi-arid regions of Iran. *Journal of Arid Land*. 2019. Vol. 11, Iss. 4. P. 551–566. <https://doi.org/10.1007/s40333-019-0059-9>
12. Dietzen C., Harrison R., Michelsen-Correa S. Effectiveness of enhanced mineral weathering as a carbon sequestration tool and alternative to agricultural lime: An incubation experiment. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2018. Vol. 74. P. 251–258. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.05.007>
13. Van Noort R., Mørkved P., Dundas S. Acid neutralization by mining waste dissolution under conditions relevant for agricultural applications. *Geosciences*. 2018. Vol. 8, Iss. 10. Article 380. <https://doi.org/10.3390/geosciences8100380>
14. Boampong L. O., Hyman J. D., Carey W. J. et al. Characterizing the combined impact of nucleation-driven precipitation and secondary passivation on carbon mineralization. *Chemical Geology*. 2024. Vol. 663. Article 122256. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122256>

References

1. Li, Y., Cui, S., Chang, S. X., & Zhang, Q. (2018). Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: A global meta-analysis. *Journal of Soils and Sediments*, 19, 1393–1406. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2120-2>

2. Saarsalmi, A., Tamminen, P., Kukkola, M., & Levula, T. (2011). Effects of liming on chemical properties of soil, needle nutrients and growth of Scots pine transplants. *Forest Ecology and Management*, 262(2), 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.03.033>
3. Šrámek, V., Fadrhonsová, V., Vortelová, L., & Lomský, B. (2012). Development of chemical soil properties in the western Ore Mts. (Czech Republic) 10 years after liming. *Journal of Forest Science*, 58(2), 57–66. <https://doi.org/10.17221/72/2011-JFS>
4. Ouimet, R., & Moore, J.-D. (2015). Effects of fertilization and liming on tree growth, vitality and nutrient status in boreal balsam fir stands. *Forest Ecology and Management*, 345, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.02.032>
5. Fleck, S., Eickenscheidt, N., Ahrends, B., Evers, J., Grüneberg, E., Ziche, D., Höhle, J., Schmitz, A., Weis, W., Schmidt-Walter, P., Andreae, H., & Wellbrock, N. (2019). Nitrogen status and dynamics in German forest soils. In N. Wellbrock & A. Bolte (Eds.), *Status and dynamics of forests in Germany: Results of the National Forest Monitoring* (Vol. 237, pp. 123–166). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_5
6. Swoboda, P., Döring, T. F., & Hamer, M. (2022). Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. *Science of the Total Environment*, 807(Part 3), Article 150976. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>
7. Zárate-Valdez, J. L., Zasoski, R. J., & Läuchli, A. (2006). Short-term effects of moisture content on soil solution pH and soil Eh. *Soil Science*, 171(5), 423–431. <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000222887.13383.08>
8. Alloway, B. J. (2012). Sources of heavy metals and metalloids in soils. In B. J. Alloway (Ed.), *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (pp. 11–50). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_2
9. Hobara, S., Kushida, K., Kim, Y., Koba, K., Lee, B.-Y., & Ae, N. (2016). Relationships among pH, minerals, and carbon in soils from tundra to boreal forest across Alaska. *Ecosystems*, 19, 1111–1127. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-9989-7>
10. Wei, Y.-M., Chen, K., Kang, J.-N., Chen, W., Wang, X.-Y., & Zhang, X. (2022). Policy and management of carbon peaking and carbon neutrality: A literature review. *Engineering*, 14, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.12.018>
11. Zeraatpisheh, M., Ayoubi, S., Sulieman, M., & Rodrigo-Comino, J. (2019). Determining the spatial distribution of soil properties using environmental covariates and multivariate statistical analysis: A case study in semi-arid regions of Iran. *Journal of Arid Land*, 11(4), 551–566. <https://doi.org/10.1007/s40333-019-0059-9>
12. Dietzen, C., Harrison, R., & Michelsen-Correa, S. (2018). Effectiveness of enhanced mineral weathering as a carbon sequestration tool and alternative to agricultural lime: An incubation experiment. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 74, 251–258. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.05.007>
13. Van Noord, R., Mørkved, P., & Dundas, S. (2018). Acid neutralization by mining waste dissolution under conditions relevant for agricultural applications. *Geosciences*, 8(10), Article 380. <https://doi.org/10.3390/geosciences8100380>
14. Boampong, L. O., Hyman, J. D., Carey, W. J., Viswanathan, H. S., & Navarre-Sitchler, A. (2024). Characterizing the combined impact of nucleation-driven precipitation and secondary passivation on carbon mineralization. *Chemical Geology*, 663, Article 122256. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122256>

UDC 631.81:631.45

Boiko, Ya. I. (2025). Peculiarities of grey podzolic soils' response to differential liming. *Scientific Papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet*, 33, 120–136. <https://doi.org/10.47414/np.33.2025.349297> [In Ukrainian]

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony St., Kyiv, 03041, Ukraine, e-mail: iaroslavboik@gmail.com

Aim. To identify the peculiarities of differential liming on the fertility of grey podzolic soils in the Polissia region of Ukraine. **Methods.** The study was conducted in 2020–2024 on a field of 415 ha (Harbuzyn, Chernihiv region). Soil samples were collected using an adaptive grid (10 ha/elementary plot) with an automatic AgriSoilSampler and GPS navigation. The soil cover of the field is grey podzolic silty loam soil. Agrochemical indicators were analysed using standard laboratory methods, and spatial distribution was assessed by Kriging in QGIS. **Results.** Spatial analysis showed that soil acidity is the key factor shaping the heterogeneity of agrochemical indicators. Most of the field had strongly acidic reaction (pH 4.7–5.3), with local areas being acidic (pH 5.4–5.7) or slightly acidic/neutral (pH 5.8–6.4). The spatial distribution of organic matter was relatively uniform (1.3–2.6%), whereas phosphorus and potassium showed considerable variability. After differential liming in 2024, organic matter content decreased by 0.1–0.2%, while mobile forms of phosphorus and potassium increased and became evenly distributed across the field. Exchangeable calcium reached an average level, magnesium remained stable, and zinc availability slightly decreased. The most pronounced increase in macroelement availability was observed in strongly acidic areas (pH < 5.0), whereas in slightly acidic areas the increase was moderate. **Conclusions.** Differential liming of grey podzolic soils in Polissia contributes to levelling the spatial distribution of acidity, increases the availability of phosphorus and potassium for plants, and reduces the risks of limited mineral nutrition in acidic areas. The obtained data may serve as a basis for implementing precision technologies of lime ameliorant application in agricultural production.

Keywords: *differential liming; soil acidity; pH; agrochemical indicators; mobile phosphorus; mobile potassium; exchangeable calcium; magnesium; zinc; spatial heterogeneity; precision agriculture; Polissia of Ukraine.*

Надійшла / Received 03.09.2025

Погоджено до друку / Accepted 21.10.2025

Опубліковано онлайн / Published online 29.12.2025