

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ**

**НАУКОВІ ОСНОВИ
ЕВОЛЮЦІЙНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ
ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ТА
ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
СТАЛОГО УПРАВЛІННЯ РОДЮЧІСТЮ
КИСЛИХ ЯСНО-СІРИХ ЛІСОВИХ
ПОВЕРХНЕВО ОГЛЕСНИХ ҐРУНТІВ**

(науково-методичні рекомендації)



Оброшине – 2025

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ**

**НАУКОВІ ОСНОВИ
ЕВОЛЮЦІЙНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ
ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ТА
ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
СТАЛОГО УПРАВЛІННЯ РОДЮЧІСТЮ
КИСЛИХ ЯСНО-СІРИХ ЛІСОВИХ
ПОВЕРХНЕВО ОГЛЕСНИХ ҐРУНТІВ**

(науково-методичні рекомендації)



Оброшине – 2025

Наукові основи еволюційних закономірностей функціональної стійкості та інформаційного забезпечення сталого управління родючістю кислих ясно-сірих лісових поверхнево оглеєних ґрунтів (науково-методичні рекомендації) / Інститут сільського господарства Карпатського регіону НААН ; Ю. М. Оліфір та ін. Оброшине, 2025. 40 с.

Науково-методичні рекомендації розроблено у відділі агрохімії та ґрунтознавства Інституту сільського господарства Карпатського регіону НААН.

Рекомендації складено за результатами досліджень, проведених у довготривалому стаціонарному досліді, закладеному в 1965 р., при виконанні завдання 01.01.03.08.Ф. «Розробити наукові основи функціональної стійкості кислих ясно-сірих лісових поверхнево оглеєних ґрунтів за умов тривалих антропогенних навантажень та змін клімату» згідно ПНД НААН І «Ґрунтові ресурси України: інформаційне забезпечення, раціональне використання, менеджмент, технології».

Автори: **Ю. М. Оліфір, О. С. Гавришко**, кандидати сільськогосподарських наук, **Т. В. Партика**, кандидат біологічних наук, **Н. І. Козак**, доктор філософії.

Рецензенти:

Ільчук Р. В. – доктор сільськогосподарських наук, Інститут сільського господарства Карпатського регіону НААН.

Лихочвор В. В. – доктор сільськогосподарських наук, професор, член-кореспондент НААН, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З. Ґжицького.

Зубковська В. В. – кандидат сільськогосподарських наук, ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського»

Рекомендації розглянуто й схвалено Вченою радою Інституту сільського господарства Карпатського регіону НААН (протокол №12 від 28.10.2025 р.) та Координаційно-методичною радою Національного наукового центру «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського» (Секція «Ґрунтознавство») протокол № 2 від 25.11.2025 р.

ЗМІСТ

Вступ	4
Екологічно обґрунтовані підходи до хімічної меліорації кислих ґрунтів.....	5
Роль алюмінію у формуванні ґрунтової кислотності.....	8
Вплив марганцю на формування та регулювання кислотності ґрунтового середовища.....	14
Трансформація сполук заліза в ґрунті залежно від тривалого антропогенного впливу.....	18
Оптимізація окисно-відновних умов і їх роль у підтриманні родючості кислих ґрунтів.....	22
Основні принципи, загальні положення та технології управління родючістю кислих ґрунтів.....	25
Продуктивність сівозміни залежно від тривалого застосування різних систем удобрення та вапнування.....	32
Економічна та енергетична ефективність тривалого застосування різних систем удобрення та вапнування.....	34
Література.....	36

ВСТУП

На сьогодні через відчутні зміни клімату проблема ефективного та екологічно безпечного використання кислих ґрунтів загострюється. Кислотна деградація, яка відбувається внаслідок як природних (зміни клімату), так і антропогенних (незбалансованого застосування або цілковитої відсутності добрив) навантажень, спонукає вчених до проведення теоретичних і прикладних досліджень, спрямованих на пізнання процесів, що обумовлюють ґрунтову кислотність, природа якої вельми складна і до останнього часу остаточно не з'ясована. Саме ацидоморфний процес ґрунтотворення, тобто походження ґрунтової кислотності, має важливе значення для системного управління родючістю кислих ґрунтів [1].

Першочергове значення для забезпечення сталого сільського господарства, здоров'я екосистем та добробуту людини має підтримка функціональної стійкості ґрунтів. Вона дозволяє ґрунтовим системам продовжувати надавати життєво важливі екосистемні послуги, незважаючи на зростаючі загрози, пов'язані зі зміною клімату та інтенсифікацією використання земель.

У вирішенні цілої низки сучасних проблем меліорації кислих ґрунтів необхідна об'єктивна оцінка різних теоретичних поглядів щодо природи та механізмів утворення ґрунтової кислотності [2]. Саме тому дослідження поведінки сполук Al, Fe, Mn, їх взаємозалежність та зв'язок з ОВП у різних ґрунтових середовищах і за кліматичних змін залишаються актуальними, доцільним для виконання з можливістю отримання позитивного результату. Об'єктивну інформацію про стан і зміни агроекосистеми та окремих її компонентів під впливом різних антропогенних навантажень можна одержати лише за умов систематичних моніторингових спостережень і аналітичних досліджень.

Такий підхід особливо актуальний для кислих, бідних за рівнем природної родючості ясно-сірих лісових ґрунтів, високопродуктивне використання яких можливе лише за умови зниження кислотності ґрунтового розчину шляхом хімічної меліорації, а також внесення органічних добрив. Разом з тим, традиційна технологія хімічної меліорації в умовах ринкової економіки є досить енерговитратною. Тому на сьогодні потрібні принципово нові підходи до вирішення проблеми хімічної меліорації кислих ґрунтів з обов'язковим переходом на ресурсозберігаючі технології.

ЕКОЛОГІЧНО ОБҐРУНТОВАНІ ПІДХОДИ ДО ХІМІЧНОЇ МЕЛПОРАЦІЇ КИСЛИХ ҐРУНТІВ

Серед галузей економіки сільське господарство найбільш відчутно реагує на кліматичні зміни останніх десятиліть. Від того як воно адаптується до трансформації погодних умов буде залежати майбутнє продовольчої безпеки України. Серед проблемних ґрунтів щодо їх сільськогосподарського використання ФАО особливо виділяє кислі ґрунти, які мають широке розповсюдження і на Україні. За даними Інституту охорони ґрунтів площа кислих ґрунтів в Україні становить 10,5 млн га, або 26,3% від загальної площі, тобто кожний 4-й гектар землі є кислим. У зонах Лісостепу та Полісся кислі ґрунти займають ще більшу площу відповідно 49,7 та 47,4%, це майже кожний 2-й гектар є кислий [3].

Перехід на нові форми господарювання, зміна клімату, підвищення кислотності, застосування непропорційного співвідношення добрив в умовах інтенсивного аграрного виробництва спричиняють посилення деградації ґрунтів і ґрунтового покриву.

Кислі ґрунти – це ґрунти, в яких кислотність є найважливішою проблемою, що визначає ефективність їх використання у сільськогосподарському виробництві. Кисле середовище є генетичною ознакою ясно-сірого лісового поверхнево оглеєного ґрунту, що займає значні площі серед орних земель у зоні Лісостепу Західного та характеризується несприятливими фізико-хімічними властивостями. Потенціал родючості кислих ґрунтів, як правило, низький, а успішне ведення землеробства гальмують ціла низка несприятливих властивостей і процесів, до яких слід віднести диференційованість ґрунтового профілю, надто укорочений гумусовий горизонт, збіднення на орґано-мінеральний колоїдний комплекс, низький рівень біогенності та мікробіологічної активності.

Кисла реакція ґрунтового розчину перешкоджає поглинанню катіонів кальцію, магнію, амонію, руйнує ґрунтові колоїди, підвищує дисперсність і рухомість гумусу. У кислих ґрунтах ослаблена або припинена фіксація азоту повітря, приглушені процеси амоніфікації і нітрифікації, різко погіршуються умови азотного живлення, а доступні форми фосфору утворюють нерозчинні і малодоступні рослинам фосфати алюмінію і заліза.

Висока концентрація водневих іонів H^+ в природних умовах може виникати через гідроліз сполук алюмінію, вміст якого у земній корі досить високий, а також в умовах розкладу свіжих рослинних решток, багатих на вуглеводи. За низьких значень рН у ґрунті зростає

розчинність деяких важких металів та радіонуклідів, і зокрема Al, Mn, Sr та Fe, що супроводжується підвищеною концентрацією рухомих форм названих елементів. Катіони водню і цих металів, активно взаємодіючи з вбирним комплексом, витісняють з нього іони Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ . Це веде до утворення ненасичених на основі ґрунтів. Як правило, такі ґрунти характеризуються і несприятливими агрофізичними властивостями, зокрема безструктурністю, злитістю, низькою аерацією та фільтрацією [4].

Враховуючи значну розповсюдженість кислих ґрунтів у західному регіоні України, важливість екологічної і соціальної значимості застосування агрозаходів з підвищення їх родючості та запобігання деградації є безперечною. Сталий розвиток землеробства на кислих ґрунтах можливий лише за умови постійного збереження та відтворення їх родючості. Це передбачає необхідність дієвого і систематичного контролю стану родючості, реакції середовища, основних властивостей та режимів.

Об'єктивну інформацію про стан саморегулюючих систем ґрунту, їх направленість та інтенсивність залежно від антропогенних факторів, можна отримати у базових стаціонарних дослідях. Одним із таких є тривалий стаціонарний дослід закладений в Інституті сільського господарства Карпатського регіону НААН у 1965 р. на ясно-сірому лісовому поверхнево оглеєному ґрунті з різними дозами та співвідношеннями мінеральних добрив, гною і вапна.

У дослідженнях Інституту сільського господарства Карпатського регіону НААН 50-ти річне використання ясно-сірого лісового поверхнево оглеєного ґрунту з вихідним pH_{KCl} 4,3 без добрив супроводжується зростанням вмісту сполук рухомої міді у верхніх шарах ґрунту до 3,26–3,49 мг/кг ґрунту, що перевищує ГДК на 0,26–0,49 мг/кг ґрунту. За довготривалого внесення подвійної дози мінеральних добрив pH_{KCl} 3,9–4,1 вміст сполук рухомої міді підвищився до 5,62–5,77 мг/кг ґрунту. Дана доза добрив на фоні вапнування в умовах ясно-сірого лісового ґрунту, підвищуючи pH_{KCl} до 5,2–5,4, знижує вміст сполук рухомої міді до 2,65–2,70 мг/кг ґрунту. Це свідчить про те, що як інтенсивне мінеральне удобрення кислого сірого лісового ґрунту з низьким вмістом гумусу, так і використання його без добрив, супроводжуючись подальшим підкисленням (до pH_{KCl} 3,7–4,0), є екологічно небезпечним, адже мідь у високих концентраціях може проявити токсичну дію, яка за даними вчених вдвічі більша за цинк.

Проведені дослідження показали, що систематичне внесення добрив та періодичне вапнування формують високий і сталий рівень

ефективної родючості ясно-сірого лісового поверхнево оглеєного ґрунту. В найбільшій мірі азотний режим покращується за органо-мінеральної системи удобрення на фоні вапнування. При цьому вміст легкогідролізного азоту підвищується до 132–146 мг/кг ґрунту проти 113 мг/кг на контролі без добрив. Вміст легкодоступних фосфатів за цих умов зростає до 204–210 мг/кг ґрунту.

В умовах ясно-сірого лісового поверхнево оглеєного ґрунту висока концентрація сполук рухомого алюмінію зв'язує фосфор ґрунту у важкодоступні форми, тому вміст легкодоступних сполук фосфору є невисоким і становить на контролі без добрив 58,0–59,0 мг/кг ґрунту. В найбільшій мірі – до 204–210 мг/кг ґрунту зростає вміст легкодоступних фосфатів в орному шарі ґрунту у варіанті сумісного внесення високих доз добрив на фоні вапнування. За сумісного внесення 10 т на гектар сівозмінної площі гною, повної дози NPK на фоні післядії вапнування вміст легкодоступних фосфатів зростає до 146–164 мг/кг ґрунту.

Ступінь окультуреності, зокрема, тривале систематичне удобрення та вапнування, позитивно впливають на вміст обмінного калію в ґрунті, підвищуючи його до 196–235 проти 68,0 мг/кг ґрунту на контролі без добрив.

Органо-мінеральна система удобрення на фоні вапнування в найбільшій мірі сприяє швидкому поліпшенню ясно-сірого лісового поверхнево оглеєного ґрунту, своєрідною діагностичною ознакою чого є покращання якісного складу гумусу. При сумісному внесенні у сівозміні 10 т/га гною, повної норми мінеральних добрив $N_{65}P_{68}K_{68}$ на фоні післядії вапнування вміст гумусу на кінець VIII ротації зростає до 1,91% проти 1,50% на контролі, а груповий склад покращується до 0,83 проти 0,63 на контролі без добрив за рахунок підвищення вмісту гумінових кислот. При цьому у фракційному складі зростає вміст гумінових кислот ГК-2, зв'язаних з кальцієм та негідролізованого залишку. За мінеральної системи удобрення груповий склад гумусу формується на рівні контролю без добрив, а у фракційному – зростає вміст рухомих фульвокислот, що спричиняють фульватизацію гумусу.

Дослідження в умовах довготривалого стаціонарного досліді показали, що вагомим чинником покращання екологічного стану ґрунту є включення у сівозміну конюшини лучної. За дворічний період вегетації конюшина лучна накопичує 5-6 т/га корених решток і фіксує 140-250 кг/га азоту повітря. Заорювання зеленої маси II-го укусу конюшини лучної в умовах тривалого стаціонарного досліді мало вирішальний вплив на формування балансу гумусу в цілому. Модельними лабораторно-польовими досліді встановлено, що

коефіцієнт гуміфікації конюшини лучної становить 0,25 проти 0,17 виходу гумусових речовин при заорюванні соломи пшениці озимої. Заорювання органічної маси II-го укосу конюшини лучної сприяло інтенсифікації процесів гуміфікації по всіх варіантах досліджу, однак у більшій мірі орґано-мінеральної системи удобрення на фоні вапнування , що й сприяло формуванню значного позитивного балансу гумусу за ротацію.

Вапнування ясно-сірого лісового поверхнево оглеєного ґрунту, внесення гною, а також сумісне внесення гною, вапна та мінеральних добрив сприятливо впливає на загальну біологічну і протеазну активність зокрема. У варіантах контролю без добрив та інтенсивного мінерального удобрення протеазна активність ґрунту є найнижчою і становить 1,8-2,0%, у варіанті внесення гною на фоні вапнування та орґано-мінеральної системи удобрення протеазна активність зростає у чотири рази порівняно із контролем. Загальна біологічна активність також найнижча у варіанті мінерального удобрення та на контролі – 11%. Найвища 50–55% у варіантах органічної та орґано-мінеральної системи удобрення на фоні вапнування. Мінеральна система удобрення на фоні вапнування підвищує загальну біологічну активність до 19,6%.

РОЛЬ АЛЮМІНІЮ У ФОРМУВАННІ ҐРУНТОВОЇ КИСЛОТНОСТІ

Підкислення ґрунту стає все більшою проблемою для продовольчої безпеки через утворення вільного іона алюмінію (Al^{3+}), який є токсичним для сільськогосподарських культур. Разом з тим основною метою хімічної меліорації не є повна нейтралізація кислотності, але першочергово знизити рівень обмінного Al^{3+} та підвищення рівня обмінного Ca^{2+} у ґрунті.

Дуже часто кислу реакцію ґрунтового розчину пов'язують із наявністю в ґрунті потенційно рухомих сполук алюмінію та вважають, що саме висока токсичність алюмінію (Al) є найбільш поширеним і дуже шкідливим впливом кислотності ґрунту для рослин, мікробного співтовариства та навколишнього середовища. Особливо аюмотоксичність є найнебезпечнішою у ґрунтах із низькою концентрацією іонів магнію та кальцію.

Відомо, що рухомий алюміній з'являється у ґрунтовому розчині при підкисленні нижче ізоелектричної точки, яка у більшості ґрунтів знаходиться за значення рН нижче 4,5 [2]. При низькому значенні рН (приблизно 4,3) тривалентний алюміній (Al^{3+}) є найпоширенішою

формою і має найбільший вплив на ріст рослин, займаючи більшу частину негативних зарядів в кислих ґрунтах [5]. Навпаки, осаджений або хелатований Al з органічними сполуками не є токсичним для рослин.

Домінуючий в складі ґрунту алюміній (Al^{3+}) має значний вплив на встановлення кислотно-лужної рівноваги в ґрунтах, відіграючи тим самим важливу роль у формуванні родючості. У ґрунтах різного складу і генезису його вміст істотно змінюється в залежності від ґрунотвірної породи. У підзолистих та дерново-підзолистих ґрунтах в ілювіальних (I) горизонтах алюмінію буває у 1,5-2,0 рази більше, ніж в елювіальних (E) горизонтах [6].

Значення Al в ґрунтоутворенні та родючості ґрунтів дуже велике: по-перше алюміній відіграє конституційну роль, поскільки алюмосилікати найбільш розповсюджені ґрунтові мінерали – вони становлять до 85% маси земної кори, по-друге Al достатньо реакційно здатний і утворює різноманітні сполуки, що мігрують по профілю. Разом з тим алюміній бере участь у формуванні потенційної кислотності ґрунтів (обмінної та гідролітичної), яка несприятливо впливає на ріст і розвиток сільськогосподарських культур. Водночас вміст Al відображається на живленні рослин, утворюючи важкорозчинні фосфати алюмінію, фосфор яких недоступний для рослин [7].

Загальна концентрація у ґрунті, склад та доступність алюмінію залежать від pH та хімічного середовища розчину. Сполуки Al малорухомі в слаболужному та нейтральному середовищах, однак набирають рухомості у кислотному середовищі, утворюючи розчинні органо-мінеральні комплекси з фульвокислотами, що й зумовлює його активну міграцію по профілю. Утворені алюмо-органічні комплекси набувають різноманітних перетворень у залежності від екологічних умов. Для ґрунтів підзолистої зони вони закріплюються у складі гумусових речовин. З підвищенням pH, як правило, ці комплекси розкладаються і Al осаджується у вигляді гідрооксидів. Підкислення ґрунту нижче pH 5,0-5,5 збільшує розчинність в ґрунті Al^{3+} і негативно впливає на ріст та врожайність сільськогосподарських культур. Крім того, різко зростає рівень та токсичність Al [8].

У кислих ґрунтах з $pH < 5,0$ фітотоксичний алюміній (Al^{3+}) швидко пригнічує ріст коренів і згодом негативно впливає на поглинання води та поживних речовин рослинами. Це є однією із причин чому при підвищеній концентрації алюмінію в профілі ґрунту коренева система розташовується переважно у верхньому шарі з меншим вмістом алюмінію, що є важливою складовою частиною стійкості культури до кислих ґрунтів.

Водночас проблема глобального потепління вносить також вагомі корективи у дослідження механізмів стійкості до алюмінієвої токсичності та умов, що послаблюють або посилюють їх. Відтак дослідження механізмів стійкості до алюмінієвої токсичності та факторів, що впливають на них, є надзвичайно актуальними. А вивчення досліджень зміни вмісту сполук рухомого алюмінію залежно від доз внесення меліоранту дає змогу запропонувати і втілити у практику технології, які побудовані на принципах охорони ґрунтових ресурсів, посилення процесів саморегуляції та відновлення сталого функціонування агроєкосистем.

Дослідження проведені в умовах стаціонарного досліду показали, що в ясно-сірого лісового поверхнево оглеєного ґрунту вміст сполук рухомого алюмінію тісно пов'язаний із величиною кислотності (pH_{KCl} і гідролітичної), системами удобрення, їх післядії та сівозмінного фактору. Включення ясно-сірого лісового ґрунту в систему інтенсивного землеробства без внесення добрив і вапна та одностороннє внесення мінеральних добрив призводить до подальшого погіршення його властивостей, впершу чергу зниження кислотності та зростання вмісту сполук рухомого Al.

Найвищий вміст сполук рухомого алюмінію 92,0 і 132,0 мг/кг ґрунту у варіантах контролю та мінеральної системи удобрення після проходження п'яти семипільних ротацій при pH_{KCl} відповідно 4,1 і 3,8 та Нг 5,20 і 6,43 мг-екв/100 г ґрунту (рис. 1).

У дослідженнях гумусного стану вказаних варіантів в кінці V ротації у складі органічного вуглецю вміст фульвокислот складав відповідно 0,54-0,63%, а співвідношення $С_{тк} : С_{фк}$ становило 0,48-0,41, що згідно класифікації В.К. Пестрякова характеризує фульватний тип гумусу. При цьому у фракції фульвокислот вміст найбільш рухомих та «агресивних» ФК був найвищим і становив відповідно на контролі 0,11 – 0,13%, а у варіанті мінеральної системи удобрення 0,23%. Водночас це сприяло додатковій мінералізації гумусу. Адже відомо, що розчинна органічна речовина легко піддається вимиванню та транспортуванню, спричиненому вітром і водою (ерозія), завдяки чому родючість ґрунту знижується.

У варіантах органо-мінеральної та мінеральної систем удобрення на фоні вапнування 1,0 і 1,5 н $CaCO_3$ за Нг відповідно при pH 5,4, гідролітичній кислотності 2,4 і 2,27 мг-екв/100 г ґрунту в кінці V семипільної ротації вміст сполук рухомого алюмінію знизився до 3,2-3,7 мг/кг ґрунту. За таких умов вміст агресивних фульвокислот зменшився до 0,03-0,09 % при достатньо високому 0,2-0,15% вмісту рухомої фракції фульвокислот. Очевидно, в даному випадку і

проявляється висока буферна дія фульвокислот щодо алюмінієвого навантаження з утворенням комплексних органо-мінеральних сполук.

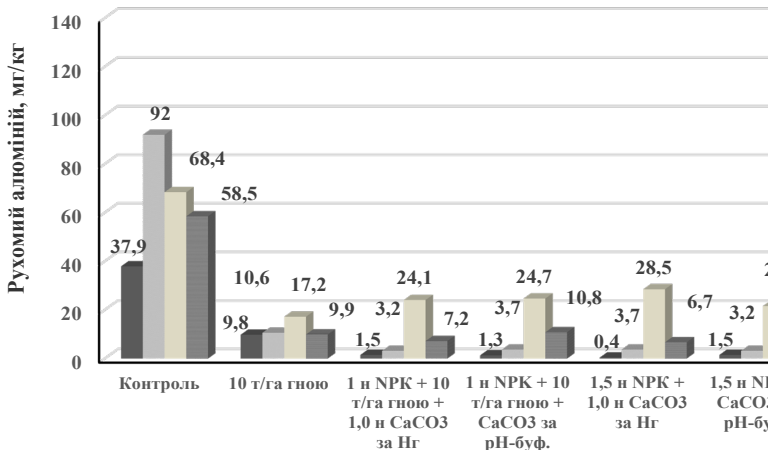


Рис. 1. Динаміка рухомого алюмінію по ротаціях залежно від тривалого антропогенного впливу, мг/кг

Згідно досліджень ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського» алюміній у цих комплексних гетерогенних солях дуже міцно зв'язаний і в межах рН 4,5-7,5, знаходиться у внутрішній частині молекули, тому він не може підкислювати ґрунтове середовище. Деструкція цих комплексів можлива за рН ґрунтового розчину < 4,5 (дуже кисла реакція), що спостерігаємо в нашому випадку у варіантах контролю та мінерального удобрення.

Все це підтверджує непереконливість теорії походження ґрунтової кислотності через алюміній і збігається з поглядами Томашівського З.М. про те, що кислотність ґрунту є результатом довготривалого процесу вимивання опадами з ґрунту кальцію і магнію та збагачення його іонами гідрогену – першоджерелом кислої реакції ґрунту [9].

Дослідження показали, що органічна система удобрення (внесення у сівозміні 40 т/га гною) на ясно-сірому лісовому ґрунті) підвищує показник рН_{KCl} на кінець I і V ротацій до 4,4-4,8, знижує гідролітичну кислотність до відповідно 4,70 і 3,47 мг-екв/100 г ґрунту. Як наслідок, вміст сполук рухомого алюмінію знизився до 9,8-10,6 мг/кг. Очевидно, в даному випадку кислотно-нейтралізуюча

здатність пов'язана з комплексним використанням органічних речовин ґрунту і гною із рухомими сполуками алюмінію.

Неоціненна перевага стаціонарних дослідів в тому, що з тривалістю використання завжди можна внести потрібні корективи на вимоги часу і тим самим підвищити ефективність досліджень.

На кінець VIII ротації у варіанті контролю спостерігається зниження гідролітичної кислотності порівняно із кінцем V семипільної ротації до 4,69 мг-екв/100 г ґрунту в орному шарі, підвищення показника рН до 4,4 проти 4,1, зниження вмісту сполук рухомого алюмінію до 68,4 мг/кг ґрунту. У варіанті мінерального удобрення показник pH_{KCl} зріс до 4,20 проти 3,8 (кінець V ротації), гідролітична кислотність знизилася до 5,78 мг-екв/100 г ґрунту проти 6,43 мг-екв/100 г. При цьому вміст сполук рухомого алюмінію знизився до 110,8 проти 132,0 мг/кг кінця V ротації.

Цьому в значній мірі сприяла заміна семипільної сівозміни на чотирипільну з виключенням енергозатратних сільськогосподарських культур, зокрема буряків цукрових та картоплі. Це супроводжувалось зниженням інтенсивності обробітків, а значна кількість органічних кореневих рештків, що нагромаджувались за чотирипільні ротації сівозміни (кукурудза на силос – ячмінь ярий – конюшина лучна – пшениця озима) суттєво вплинули на кругообіг поживних речовин, фізико-хімічні та агрохімічні показники в першу чергу варіантів контролю та низьких рівнів удобрення.

Показники кислотності та вмісту сполук рухомого алюмінію по варіантах досліду на кінець чотирипільної VIII ротації, (в якій ми вивчали післядію внесення вапна та мінеральних добрив) свідчать про те, що періодичне вапнування було і залишається найбільш надійним та ефективним заходом докорінного покращення агроекологічного стану та підвищення родючості ґрунтів з кислою реакцією середовища.

На кінець X ротації сівозміни у варіанті сумісного застосування орґано-мінеральної системи удобрення з внесенням повної норми NPK, 10 т/га гною та 1,0 н CaCO_3 за Нг вміст сполук рухомого Al становить 7,2 мг/кг, Нг знизилась до 3,59 при рН 5,0. За ідентичної системи удобрення на фоні вапнування за рН-буферністю вміст сполук рухомого алюмінію становить 10,8 мг/кг ґрунту, Нг – 3,85 мг-екв/100 г ґрунту при pH_{KCl} – 5,0. За мінеральної системи удобрення на фоні вапнування 1,5 н CaCO_3 показник рН становить 5,4, на фоні внесення вапна за рН-буферністю – 5,2. Гідролітична кислотність при цьому становить відповідно 3,41 і 4,55 мг-екв/100 г ґрунту, вміст сполук рухомого Al відповідно знизився до 6,7-10,8 мг/кг ґрунту.

Подальше заорювання другого укусу зеленої маси конюшини лучної в якості добрива також сприяли на кінець X ротації стабілізації показника pH_{KCl} до 4,40 на контролі та 4,20 у варіанті мінерального удобрення, зниженню гідролітичної кислотності до 4,29 на контролі та 4,63 мг-екв/100 г ґрунту за мінеральною системою удобрення. При цьому вміст сполук рухомого Al на кінець X ротації становить 58,5 та 68,4 мг/кг відповідно у варіантах контролю та мінерального удобрення.

Фітотоксичність алюмінію є однією з основних проблем, що стосуються формування продуктивності сільськогосподарських культур на кислих ґрунтах. Дослідження проведені в умовах тривалого стаціонарного дослідження свідчать, що систематичне удобрення та періодичне вапнування, покращуючи фізико-хімічні властивості ясно-сірого лісового ґрунту зумовлені в першу чергу зниженням кислотності ґрунтового розчину та сполук рухомого Al забезпечують достатньо високий рівень продуктивності: 5,66-7,09 т/га зернових одиниць. Тривале мінеральне удобрення на даному типі ґрунту формує рівень продуктивності на 1,45 т/га з.о. вищу за контроль без добрив і становить на кінець X ротації 3,99 т/га з.о. За органо-мінеральною та мінеральною системою удобрення на фоні вапнування дозою $CaCO_3$ за Нг рівень продуктивності лише на 0,57-0,50 т/га з.о. вищий ідентичної системи удобрення на фоні вапнування за pH-буферністю.

Слід зазначити, що прослідковуючи динаміку зміни продуктивності сівозміни за ротаціями відзначено її поступове зростання практично по всіх варіантах, в тому числі і на контролі без добрив. Це відбулося внаслідок впливу в першу чергу сівозмінного фактору, що сприяє нагромадженню значної кількості органічних рештків в тому числі конюшини лучної, правильного підбору вирощуваних культур. Все це разом із застосуванням науково обґрунтованих систем удобрення забезпечили зниження вмісту сполук рухомого алюмінію, покращення фізико-хімічних та агрохімічних властивостей, що дозволило на малородючих ґрунтах отримувати достатньо високі врожаї вирощуваних культур сівозміни.

Таким чином, на ясно-сірому лісовому ґрунті вміст сполук рухомого алюмінію тісно пов'язаний із величиною кислотності (pH_{KCl} та гідролітичною), системами удобрення, їх післядією та сівозмінним фактором. За одностороннього внесення високих доз мінеральних добрив та інтенсивного використання ясно-сірого лісового поверхнево оглеєного ґрунту без добрив протягом перших п'яти семипільних ротацій вміст рухомого алюмінію зріс відповідно до 132,0-92,0 мг/кг, що сприяло подальшій фульватизації гумусу з утворенням рухомих фульватів алюмінію.

ВПЛИВ МАРГАНЦЮ НА ФОРМУВАННЯ ТА РЕГУЛЮВАННЯ КИСЛОТНОСТІ ГРУНТОВОГО СЕРЕДОВИЩА

Одним із найважливіших компонентів ґрунтів є марганець який може суттєво впливати на процеси ґрунтоутворення та активно в них брати участь. Mn необхідний для росту рослин мікроелемент та є єдиним елементом, який може протягом вегетаційного періоду бути дефіцитним для рослин або стати токсичним (третього класу небезпеки) залежно від його надлишкових концентрацій, реакції середовища, факторів, виду рослин і типу ґрунту.

Вміст і поведінка марганцю залежать в першу чергу від типу ґрунту і його властивостей: кислотності, окисно-відновного потенціалу, вмісту органічної речовини. Водночас марганець постійна складова рослин і живих організмів, приймає участь в окисно-відновних реакціях, фотосинтезі та сприяє вибіркового поглинанню іонів із ґрунтового середовища, перешкоджає поглинанню Ca, Mg та є антагоністом Cu. [10].

Рухомість марганцю залежить від окисно-відновних умов середовища. Найбільш рухомий двохвалентний Mn, малорухомі сполуки Mn_2O_3 , MnO_2 і Mn_3O_4 . У відновному середовищі на кислих ґрунтах до pH 6 переважають сполуки Mn^{2+} у вигляді бікарбонатів, сульфатів, хлоридів, нітратів. Вони розчинні у воді. У нейтральних та лужних ґрунтах рухомий марганець Mn^{2+} переходить у нерозчинний малорухомий Mn^{+4} [11].

Найбільш доступний Mn у ґрунті в межах pH 4,5-7,5. У кислому середовищі за pH < 4,0 марганець може досягати токсичних для рослин концентрацій блокувати засвоєння Ca, Mg, Fe тощо. Вапнування може також призвести до тимчасового блокування та дефіциту марганцю, навіть при його достатньому вмісті в ґрунті.

Тому поведінка Mn у ґрунті є дуже складною та контролюється різними факторами навколишнього середовища, серед яких pH та окисно-відновний потенціал є найважливішими [12]. Також доступність Mn у ґрунті може бути обмежена через такі фактори, як вміст органічної речовини та баланс з іншими катіонами, головним чином Fe та Ca [13].

У дослідженнях генезису та формування родючості ясно-сірих лісових поверхнево оглеєних ґрунтів важливим напрямом є вивчення вмісту та поведінка сполук марганцю. Тому, для вирішення проблеми стійкості агроєкосистем і збереження родючості важливим є отримання об'єктивних результатів досліджень стану агроєкосистем за

різних агрозаходів та порівняння розвитку агрогенно-трансформованих та відносно природних ґрунтів [14].

Проведені дослідження в умовах стаціонарного досліду показали, що тривале антропогенне використання ясно-сірих лісових поверхнево оглеєних ґрунтів змінюючи фізичні, фізико-хімічних та агрохімічні властивості має значний вплив на вміст та динаміку сполук марганцю, однак рівень яких є менший ніж під первинному ґрунтоутворенні під перелогом і лісом.

Валовий вміст марганцю в ясно-сірому лісовому поверхнево оглеєному ґрунті під впливом тривалого внесення мінеральних добрив, гною і вапна змінювався незначно 79,3-94,4 мг/кг, тобто для даного типу ґрунту який відзначається генетично притаманною кислою реакцією ґрунтового середовища та оглеєністю гумусово-елювіального горизонту внаслідок поверхневою застою вод через щільний ілювіальний горизонт є характерне природне нагромадження валових сполук марганцю (рис. 2).

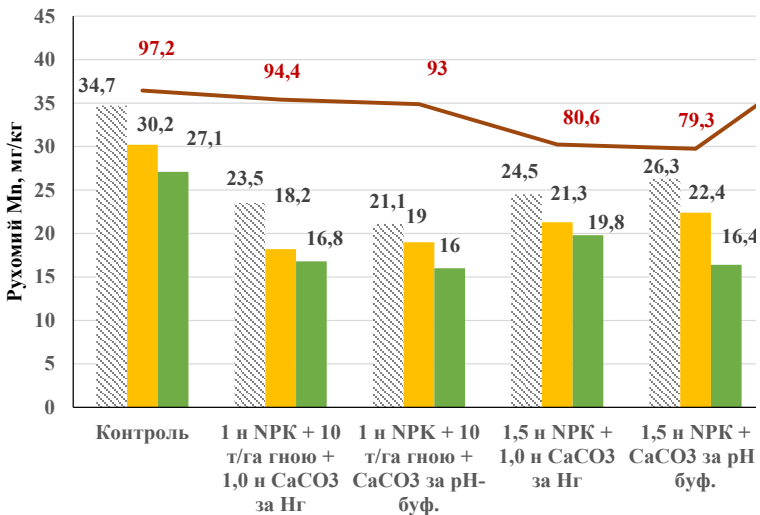


Рис. 2. Динаміка рухомих та валових сполук марганцю ясно-сірого лісового ґрунту залежно від тривалого антропогенного впливу, мґ/кг

П'ятдесяти п'яти річне використання ясно-сірого лісового поверхнево оглеєного ґрунту без добрив супроводжується зниженням показника pH_{KCl} до 4,2-3,98, зростанням гідролітичної кислотності до

4,38-4,81 мг-екв/100 г ґрунту та нагромадженням вмісту валових форм марганцю в першу чергу у верхніх шарах ґрунту – гумусово-елювіальному орному та підорному відповідно до 97,2 і 96,0 мг/кг ґрунту унаслідок його фіксації органічною речовиною. При тривалому односторонньому застосування протягом даного періоду лише мінеральної системи удобрення концентрація валових форм Мп перевищує контроль без добрив і становить у верхньому родючому гумусово-елювіальному орному та підорному шарах ґрунту відповідно 109,4 і 108,3 мг/кг, однак є значно нижчими за ГДК і свідчить про відсутність забруднення ґрунтів досліджуваним елементом.

При використанні органо-мінеральних систем удобрення з внесенням у сівозміні однієї норми мінеральних добрив, 10 т/га гною на фоні вапнування як однією нормою вапна за Нг, так і за рН-буферністю вміст валових сполук марганцю є достатньо високим і незначно відрізняється між собою у гумусово-елювіальному орному горизонті та становить відповідно 94,4 і 93,0 мг/кг ґрунту при pH_{KCl} 4,88 і 5,39.

Щодо сезонної зміни, то найбільшим накопиченням марганцю в ґрунтах характеризувався весняний період, що було пов'язано насамперед із максимальною вологістю ґрунту, внаслідок чого розвиваються анаеробні відновні процеси, внесенням у сівозміні мінеральних добрив, а також із завершенням процесів мінералізації рослинних залишків.

Найвищий (дуже високий) вміст рухомих сполук Мп відзначено весною у гумусово-елювіальному орному горизонті 0-20 см варіанту тривалого інтенсивного мінерального удобрення (pH_{KCl} рівне 4,35) та контролю без добрив (pH_{KCl} рівне 4,3) відповідно 39,0 і 34,7 мг/кг. У підорному шарі 20-35 см вміст марганцю знижується до 30,4 і 29,3 мг/кг та відповідно до 27,2 і 26,0 мг/кг в елювіальному-слабогумусованому горизонті. Однак концентрація рухомих сполук марганцю, так само як і валових, в даному випадку не перевищують гранично допустимих норм. Але, це свідчить про те, що інтенсивне мінеральне удобрення ясно-сірого лісового ґрунту з низьким вмістом гумусу, так і використання його без добрив, супроводжуючись подальшим підкисленням, є екологічно небезпечним.

Внесення високих доз мінеральних добрив на фоні вапнування як за гідролітичною кислотністю, так і за кислотно-основною буферністю в умовах ясно-сірого лісового ґрунту, підвищуючи pH_{KCl} до 5,12-5,20, знижує вміст сполук рухомого марганцю протягом весняного періоду у гумусово-елювіальному орному та підорному горизонтах відповідно до 24,5-26,3 та 19,5-21,2 мг/кг ґрунту.

У літні місяці внаслідок підвищених температур та меншої вологості ґрунту рухомі сполуки марганцю окислюються, внаслідок чого розчинність їх знижується. Тому кількість рухомого марганцю є нижчою відносно весняного періоду. Однак також чітко прослідковується його залежність від систем удобрення та кислотності ґрунту. При тривалому застосуванні мінеральної системи удобрення та на контрольному варіанті вміст сполук марганцю і надалі залишається дуже високим й становить відповідно 35,2 і 30,2 мг/кг ґрунту.

Найнижчі концентрації рухомих сполук марганцю були характерні для осіннього періоду, коли винос мінеральних речовин рослинами різко скорочується у зв'язку зі зниженням процесу фотосинтезу та формування врожаю, а значна частина елемента із ґрунту відчужується з основною та побічною продукцією сільськогосподарських культур.

Дослідження міграції сполук марганцю за ґрунтовим профілем ясно-сірого лісового ґрунту показало, що його розподіл за генетичними горизонтами досить неоднорідний. П'ятдесяти п'яти річне використання ясно-сірого лісового ґрунту без добрив супроводжується зростанням вмісту сполук валових форм Мп першу чергу у верхніх шарах ґрунту – гумусово-елювіальному орному та підорному відповідно до 96,5 і 81,4 мг/кг. Щодо міграції валового марганцю за горизонтами ясно-сірого лісового ґрунту, то дослідженнями встановлено, що в елювіально слабогумусованому, елювіально-ілювіальному та ілювіальному горизонтах вміст його сполук знижується до 59,5-73,2 мг/кг, а в ілювіальному перехідному та ґрунтотвірній породі зростає до 76,8-79,5 мг/кг.

У варіанті тривалого застосування протягом більше 55 років лише мінеральної системи удобрення концентрація валових форм Мп перевищує контроль без добрив і становить у верхньому родючому гумусово-елювіальному орному та підорному шарах ґрунту відповідно 117,3 і 110,5 мг/кг, однак є значно нижчими за ГДК (1500 мг/кг). З глибиною кількість валових сполук марганцю за даною системи удобрення знижується в елювіально слабогумусованому, ілювіальному сильноелювійованому та ілювіальному горизонтах до 72,9-82,8 мг/кг, та знову зростає в ілювіальному перехідному та ґрунтотвірній породі до 90,5-97,4 мг/кг ґрунту.

Таким чином, при тривалому односторонньому застосуванні лише мінеральної системи удобрення спостерігається тенденція до підвищення концентрацій валових і рухомих форм Мп в орному шарі ґрунту відповідно, однак є значно нижчими за ГДК, що свідчить про відсутність забруднення ґрунтів досліджуванім елементом.

ТРАНСФОРМАЦІЯ СПОЛУК ЗАЛІЗА В ҐРУНТІ ЗАЛЕЖНО ВІД ТРИВАЛОГО АНТРОПОГЕННОГО ВПЛИВУ

Одним із найбільш поширених і важливих компонентів ґрунту є залізо завдяки тому, що воно може суттєво впливати на процеси ґрунтотворення, а також приймати в них активну участь. Разом з тим залізо необхідний елемент життєдіяльності рослин. Як надлишок, так і недостатня кількість заліза ведуть до специфічних захворювань рослин. Як елемент зі змінною валентністю його рухомість істотно змінюється при зміні окисно-відновних умов та кислотності [15].

Завдяки своїй здатності отримувати та втрачати електрони, залізо працює як кофактор для багатьох ферментів окислювально-відновних реакцій (фотосинтезу, дихання, синтез гормонів, синтез ДНК тощо). Ця функція робить залізо важливою поживною речовиною, а його дефіцит викликає хлороз заліза, що серйозно стримує нормальний розвиток рослин. Незважаючи на те, що Fe в достатній кількості міститься у мінеральних добре аерованих ґрунтах, однак більша частина його недоступна для поглинання рослинами через низьку біологічну активність та погану розчинність його основних оксидів/гідроксидів, особливо на нейтральних та лужних ґрунтах [16].

Низька біодоступність Fe в орних ґрунтах може знизити врожайність сільськогосподарських культур і вплинути на поживну цінність рослин. Як правило, у ґрунті залізо міститься у формі Fe^{3+} (тривалентного заліза) і Fe^{2+} (двовалентного заліза), їх кількість в значній мірі залежить від фізико-хімічних властивостей ґрунту. Хімічно організми розробили специфічні механізми поглинання заліза з оксидів Fe реакціями протонування, хелатування та відновлення.

Найважливіша особливість заліза з точки зору хімії – здатність змінювати валентність. Його наявність в ґрунті у вигляді Fe^{2+} чи Fe^{3+} залежить від окисно-відновного режиму та pH_{KCl} ґрунту [17]. Тому за співвідношенням вмісту окисного і закисного заліза в ґрунті можна судити не тільки про перебіг окисно-відновних процесів, але й про забезпеченість рослин доступним мікроелементом Fe^{2+} .

Особливої уваги заслуговують дослідження співвідношення окисних і відновних форм заліза в умовах зміни клімату. Часто навіть короткотривале перезволоження обумовлює активізацію процесів відновлення заліза, внаслідок чого порушується співвідношення окислених і відновлених форм, які суттєво розрізняються за своїми функціональними особливостями у ґрунтоутворенні. Власне циклічне перемикання заліза в ґрунті між його відновленим і окисленим

станами визначає доступність заліза для рослин як мікроелемента необхідного для їхнього росту [18].

За зниження концентрації закисних сполук заліза відбувається поліпшення мікроелементного режиму, зокрема Cu, Zn, Mo як антагоністів Fe^{2+} . Разом з тим за даними ряду досліджень у перезволожених ґрунтах зростає концентрація Fe^{2+} . За таких умов залізо може поступати в рослини, але з негативними наслідками для них.

Кислі умови ($\text{pH} < 5,0$) і низькі значення Eh ($< 0,4$ В) у ґрунтах мають тенденцію до підвищення концентрації іонів двовалентного заліза (Fe^{2+}), тоді як нейтральні та лужні значення pH за високих значень Eh ($> 0,6$ В) призводять до переважання гідроксидів заліза в ґрунтовому середовищі. Розчинність Fe^{3+} (окисне) зменшується зі збільшенням pH, тоді як Fe^{2+} (закисне) легко окислюється в аерованих ґрунтах, що може спричинити дефіцит Fe у рослин [19].

Відомо, що залізо поглинається рослинами в його розчинній формі у вигляді двовалентного заліза (Fe^{2+}). Однак, Fe^{2+} може бути токсичним у високих концентраціях. Токсичність заліза є загальною проблемою особливо в районах, схильних до перезволоження ґрунту, яке може бути спричинене неправильним зрошенням, високим рівнем ґрунтових вод після рясних опадів (переважно на ущільнених ґрунтах із поганим природним дренажем), а також у низинних ґрунтах, що призводить до експоненціального збільшення доступності заліза, особливо в кислих ґрунтах [20].

Динаміка заліза в ризосфері знаходиться під контролем комбінованих ефектів властивостей ґрунту, поглинання та діяльності рослин і мікроорганізмів, а також взаємодії між ними. А власне значення поглинання Fe рослинами суттєво залежать від удобрення, періоду та взаємодії між ними удобрення та період збору врожаю [21].

Проведені дослідження показали, що у складі рухомого заліза у ясно-сірому лісовому поверхнево оглеєному ґрунті переважає його окисна форма Fe^{3+} , закисного заліза значно менше. Водночас найбільша кількість рухомих сполук спостерігається у гумусово-елювіальному орному шарі ґрунту 0-20 см. Ця закономірність спостерігається у всіх варіантах досліді протягом вегетаційного періоду (Рис. 3).

Найвищий вміст рухомих сполук заліза 207,2 мг/кг ґрунту, з них 46,6 мг/кг становлять сполуки Fe^{2+} , зосереджено у варіанті контролю без добрив. Очевидно це зумовлено високою кислотністю (pH_{KCl} становить 4,30) ґрунтового розчину, що за умов нестачі кальцію та

магнію (вміст Ca 1,8-2,0 мг-екв/100 г ґрунту та Mg 0,42-0,52 мг-екв/100 г ґрунту) сприяє підвищенню рухомості заліза.

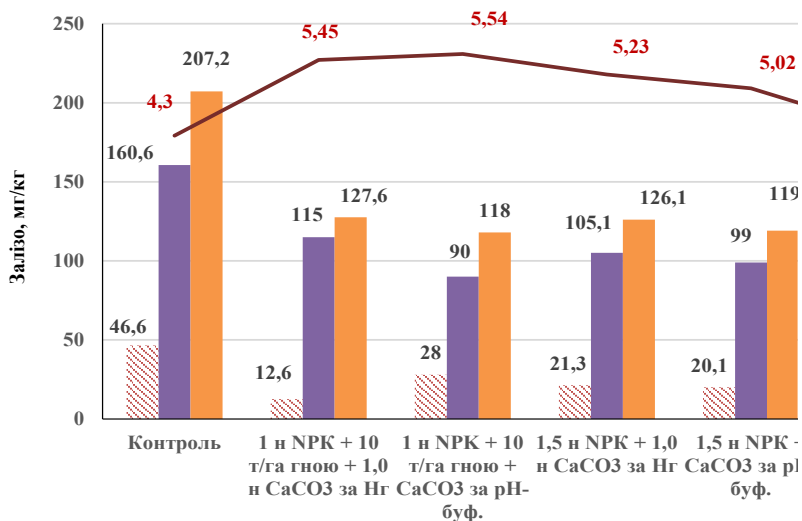


Рис. 3. Динаміка рухомих сполук заліза ясно-сірого лісового ґрунту залежно від тривалого антропогенного впливу, мг/кг

Адже відомо, що рівень рН ґрунту є найважливішим параметром, що впливає на хімічний склад розчину металів і поверхні ґрунту та є основною змінною, яка власне визначає адсорбцію катіонів та аніонів. Загалом, висока кислотність призводить до підвищеної рухливості багатьох металів та інтенсивного їх поглинання рослинами.

За мінеральної системи удобрення при pH_{KCl} 4,35 загальний вміст рухомого заліза становить 146,2 мг/кг. З них 128,1 мг/кг становлять рухомі сполуки тривалентного заліза. У варіанті мінеральної системи удобрення вміст рухомих сполук заліза нижчий за контроль без добрив, незважаючи на значну кількість заліза, що поступає із мінеральними добривами (із суперфосфатом додатково вноситься 5550 мг/кг заліза). Однак, як показали попередні дослідження у цьому досліді за тривалого і систематичного застосування мінеральних добрив зростає вміст недоступних (нерозчинних) для рослин алюмо- і залізофосфатів порівняно із контрольним варіантом у 1,9 і 2,5 разів, що становило відповідно 553 і 562 мг/кг ґрунту.

Відомо, що покращення родючості ґрунту та управління кислотністю завдяки поєднанню органічних і неорганічних добрив

дозволяють ефективно використовувати застосовувані ресурси та підвищити продуктивність сільського господарства. Також біодоступність заліза залежить від його розчинності та ступеня окислення, на які сильно впливає комплексоутворення з природною органічною речовиною

Дослідження взаємозв'язку між доступністю мікроелементів і деякими властивостями ґрунту показало, що рН і органічна речовина є найважливішими властивостями, які контролюють доступність мікроелементів. Тривале використання орґано-мінеральної системи удобрення і вапнування 1,0 н CaCO_3 за Нг знижує вміст рухомих сполук Fe до 127,6 мг/кг, з них вміст сполук Fe^{2+} становить 12,6 мг/кг при рН_{KCl} 5,45. За ідентичної системи удобрення і вапнування за рН-буферністю вміст сполук Fe^{2+} становить 28,0 при загальному вмісті рухомих сполук заліза 118,0 мг/кг і рН_{KCl} 5,54.

За внесення півтори норми NPK і 1,0 н CaCO_3 за Нг у сівозміні загальний вміст сполук Fe^{2+} і Fe^{3+} становить 126,1 мг/кг ґрунту (рН_{KCl} 5,23), з них рухомі сполуки двовалентного заліза становлять 21,3 мг/кг ґрунту. За ідентичної системи удобрення та вапнування дозою вапна за моделлю рН-буферності вміст рухомих сполук двохвалентного заліза становить 20,1 при загальному вмісті Fe^{2+} і Fe^{3+} 119,1 мг/кг ґрунту при рН_{KCl} 5,02.

Відомо, що високі концентрації двовалентного заліза в ґрунтовому розчині спостерігаються за швидкого зниження Eh, якщо значення показника Eh зростає вище +350 мВ при рН 5 утворюються оксиди і гідроксиди заліза. Саме тому розчинність Fe в основному контролюється утворенням (гідр)оксидів Fe в окисних умовах і їх розчиненням у відновних умовах. На ґрунтах з високою вологістю ґрунту створюються оптимальні умови для анаеробних процесів та кругообіг Fe^{2+} - Fe^{3+} . Часто безкисневі умови, що виникають, стимулюють використання заліза як акцептора електронів розкладання вуглецю, а отже, зростання кількості Fe^{+2} як відновника і зниження сполук Fe^{+3} [18].

За період спостереження у варіантах орґано-мінеральної системи удобрення і вапнування вміст сполук Fe^{2+} та Fe^{3+} є найвищим у літні місяці, що свідчить про добру забезпеченість рослин рухомими сполуками заліза. Однак, ця кількість Fe^{2+} 14,5-18,6 мг/кг ґрунту та 54,1-55,4 мг/кг ґрунту Fe^{3+} знаходиться у межах оптимального рівня.

Адже відомо, що надмірне накопичення заліза може порушити баланс поживних речовин у рослинах, що призводить до дефіциту інших основних поживних речовин, таких як цинк, мідь і марганець.

Дефіцит поживних речовин може ще більше посилити токсичність Fe, що призведе до зниження росту рослин.

Слід зазначити, що в Україні при створенні умов для отримання максимального врожаю як в умовах присадибних ділянок та польових сільськогосподарських угідь використовують переважно мінеральні добрива і незначну кількість органічних добрив. Тобто ці особливості використання ґрунтів тією чи іншою мірою можуть відображатися на рівні накопичення в них важких металів і мікроелементів і це потрібно також враховувати.

Таким чином, в умовах ясно-сірого лісового поверхнево оглеєного ґрунту валовий вміст сполук заліза та вміст його рухомих форм знаходиться у межах оптимального рівня і лише за тривалого використання даного ґрунту без добрив, або за умов тривалого мінерального удобрення, що сприятиме зростанню кислотності ґрунтового розчину та створення відновних умов у періоди перезволоження, залізо може перетворитися у токсикант, що погіршить умови мікроелементного живлення.

ОПТИМІЗАЦІЯ ОКИСНО-ВІДНОВНИХ УМОВ І ЇХ РОЛЬ У ПІДТРИМАННІ РОДЮЧОСТІ КИСЛИХ ҐРУНТІВ

Високочутливим індикатором якості ґрунту, який визначає процес саморегулювання та дає можливість швидко в польових умовах моніторити кризові ситуації, зумовлені порушенням кисневого режиму ґрунту, спрогнозувати напрям біотичних процесів, тобто реально здійснити експрес-оцінку динамічної якості ґрунту слугуватиме окисно-відновний потенціал (ОВП).

Водночас ОВП ґрунту є мірою напруженості окисно-відновних процесів, а його рівень відображає переважання процесів окиснення чи відновлення, що протікають у ґрунті.

На напруженість окисно-відновних процесів істотно впливає реакція середовища, з якою тісно пов'язані мікробіологічна діяльність і розчинність деяких компонентів, що беруть участь в окисно-відновних реакціях. Існує загальна закономірність: чим вищий показник рН ґрунту, тим менше у ньому міститься відновних форм сполук різних елементів. Підкислення ґрунту, навпаки, викликає зворотню реакцію – нагромадження закисних сполук.

Окисно-відновні процеси контролюють хімічні види, біодоступність, токсичність, концентрацію і рухливість багатьох основних і мікроелементів, включаючи заліза у ґрунтовому розчині, яке є найпоширенішим членом окислювально-відновних чутливих

елементів у ґрунті. У зв'язку з окисно-відновними реакціями рН ґрунту також змінюється. Саме тому, на розчинність і реакційну здатність оксидів заліза впливало кілька факторів, а саме рН, окисно-відновний потенціал ґрунту (Eh) і умови навколишнього середовища. Власне зміни рН і Eh ґрунту впливають на стабільність і розчинність металевих мінералів.

Дослідженнями проведеними у стаціонарному досліді встановлено, що у полі пшениці озимої після конюшини лучної, найнижчі значення окисно-відновного потенціалу у фазі весняного кушіння у варіантах абсолютного контролю та мінеральної системи удобрення у горизонті 20-35 см і становлять відповідно 278 і 289 мВ. У гумусово-елювіальному горизонті 0-20 см при вологості 14,2-14,5% Eh становить 300-316 мВ, що характерно для слабовідновних процесів.

Відомо, що за зниження ОВП до значень 300 і нижче мВ починається процес відновлення сполук Fe^{3+} . Особливо сприятливі умови для утворення розчинних сполук двох валентного заліза створюються при значеннях $\text{Eh} < 150\ldots 200$ мВ. і кислої реакції ґрунтового розчину [16]. У наших дослідженнях рН становить відповідно 4,20 і 4,15, однак значення окисно-відновного потенціалу вищі. Відтак створюються помірно та слабовідновні умови.

У безкисневих умовах іони Fe^{3+} перетворюються на Fe^{2+} . На відновлення іонів Fe^{3+} значною мірою впливає процес мікробної життєдіяльності та органічна речовина як донор електронів.

У варіанті орґано-мінеральної системи удобрення і вапнування 1,0 н CaCO_3 за Нг на час спостережень окисно-відновний потенціал становить 405 мВ у орному (0-20 см) та підорному (20-35 см) гумусово-елювіальному шарах ґрунту, що характерно для слабоокисних процесів. За ідентичної системи удобрення на фоні вапнування дозою CaCO_3 за рН-буферністю Eh у вказаних горизонтах становить відповідно 398-342 мВ, що згідно шкали Хтріана характеризує слабовідновні процеси.

Очевидно, розвиток сезонних відновних процесів у верхніх горизонтах слабо структурованих ґрунтів пов'язаний із розвитком явищ сезонного поверхневого надлишкового зволоження весною або ранньо-літнім періодом, що свідчить про значний вплив вологості ґрунту на ОВП. Попередні дослідження окисно-відновних процесів у ясно-сірих лісових поверхнево оглеєних ґрунтах у IX ротації на контролі свідчать про розвиток у профілі ґрунту слабоокисних процесів. У варіанті систематичного мінерального удобрення помітне зниження окисно-відновного потенціалу у напрямі процесів відновлення.

У динаміці зміни величини ОВП за сезонами року і по варіантах досліді спостерігаються деякі підвищення величини Eh у літні місяці за зниження вологості до 8,0-8,8% зі збереженням закономірностей по системах удобрення і вапнування. Влітку ОВП характеризуються як слабовідновні у варіанті контролю і мінеральної системи удобрення. За орґано-мінеральної та мінеральної системи удобрення на фоні вапнування інтенсивність окисно-відновних процесів зростає до 453-458 мВ, що дозволяє віднести їх до слабоокисних.

Зниження величини ОВП восени пов'язане як із затуханням мікробіологічних процесів, так і суттєвим впливом зливових дощів у кінці серпня, що і сприяло зростанню вологості по всіх варіантах досліді.

Саме тому розуміння окисно-відновних процесів у ґрунті значно покращує здатність характеризувати пов'язаний біоґеохімічний цикл у ґрунтах і допомагає в управлінні здоров'ям ґрунту. Однак ключовою проблемою для використання окисно-відновного фактора як індикатора є те, що він швидко змінюється залежно від умов вологості та кисню [22].

У динаміці зміни величини ОВП за сезонами року по варіантах досліді спостерігаються найнижчі значення у варіантах контролю та мінеральної системи удобрення, що становлять відповідно 300-316 мВ при pH_{KCl} 4,30-4,35 у гумусово-елювіальному орному горизонті 0-20 см та 278-289 (pH_{KCl} 4,20-4,15) у гумусово-елювіальному підорному горизонті 20-35 см, що характеризує ці процеси як помірно відновні.

Відомо, що зниження окисно-відновного потенціалу призводить до надлишкової акумуляції у ґрунті токсичних для рослин сполук Fe^{2+} , Mn^{2+} , Al^{3+} , які сприяють ще більшому підкисленню ґрунтів та негативно впливають на живлення рослин, що в кінцевому випадку різко знижує врожаї вирощуваних культур сівозміни.

Максимальні значення показника Eh у літній період по всіх варіантах досліді зберігаються згідно вказаних вище змін зі змістом варіантів. Водночас цей період співпадає з найвищою мікробіологічною активністю, інтенсивним періодом росту і розвитку рослин та формуванням величини врожаю. При цьому характер окисно-відновних процесів у варіантах орґано-мінеральної та мінеральної систем удобрення на фоні вапнування як за Нг так і за pH -буферністю слабо окисний і становить 453-458 мВ за pH_{KCl} 5,4-4,9.

Восени після збору врожаю пшениці озимої разом із затуханням мікробіологічних процесів показник ОВП знижується за всіма варіантами досліді, однак в найбільшій мірі у варіантах контролю та

мінеральної системи удобрення. Характер окисно-відновних процесів за варіантами дослідів помірно та слабо відновний.

Окисно-відновні процеси за період спостережень за варіантами дослідів характеризуються як слабовідновні та слабоокисні. На контролі без добрив та за мінеральної системи удобрення Eh у шарі ґрунту 0-20 см становить 346-357 мВ, за органо-мінеральної системи удобрення і вапнування ОВП рівний 413-416 мВ. У літній період ОВП у варіантах органо-мінеральної та мінеральної систем удобрення на фоні вапнування становить 453-458 мВ, що характеризує слабоокислювальні процеси. Восени ОВП знижується за всіма варіантами дослідів, однак в найбільшій мірі на контролі та за мінеральної систем удобрення.

Дослідженнями встановлено, що в ясно-сірих лісових поверхнево оглеєних ґрунтах за використання їх в системі землеробства переважають процеси окиснення. Однак, за умов перезволоження можливий розвиток відновних процесів за використання даних ґрунтів без добрив чи самої мінеральної системи удобрення, що часто спостерігається в ґрунтах з невисокою агрегатністю, низьким вмістом гумусу та високою кислотністю ґрунтового розчину.

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ, ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ РОДЮЧІСТЮ КИСЛИХ ҐРУНТІВ

Останніми роками спостерігається тенденція до збільшення обсягів унесення вапнякових меліорантів на кислих ґрунтах. Проте сам підхід до їх окультурювання та підвищення родючості потребує істотних змін як в методологічному, так і технологічних напрямках.

У розв'язанні проблеми агроєкології кислих ґрунтів на сучасному етапі слід наголосити на потребі суттєвого зменшення матеріально-енергетичних витрат, ніж це передбачено застарілими технологічними заходами, не допускаючи еколого-економічної шкоди у вирощуванні сільськогосподарських культур [23].

Технологія корінної меліорації, за якої доза CaCO_3 обчислюється за гідролітичною кислотністю, можлива лише на сильно забруднених ґрунтах, а також за наявності в господарстві ґрунтів із сильно- та дуже сильно кислою реакцією. Також слід звернути увагу не тільки на вихідний рівень кислотності, а й на здатність ґрунту протидіяти вторинному підкисленню, тобто на його рН-буферність. Стійкість до підкислення є важливою екологічною характеристикою ґрунту, і саме ця стійкість визначає ймовірність виникнення небезпечних явищ на

кислих ґрунтах: надмірне накопичення NO_3 та його вимивання, емісія CO_2 з ґрунту, надмірна мінералізація органічної речовини.

Традиційна технологія хімічної меліорації кислих ґрунтів, за якої доза CaCO_3 розраховується за гідролітичною кислотністю передбачає внесення вапняних меліорантів (4–7 т вапна на 4–5 років) у розкид по поверхні ґрунту з наступним заорюванням. Зазвичай таке внесення здійснювали у два і більше проходів сільськогосподарської техніки, що робило цей агрозахід економічно не вигідним. Суцільна хімічна меліорація всього орного шару призводила до значних втрат кальцію, які сягали щорічно 500 кг/га і відповідно до забруднення довкілля. Крім цього передбачалося щорічно вносити на 1 га сізовмісної площі 14–16 т органічних добрив та $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{120}$ за діючою речовиною на всю орну масу ґрунту.

Таким чином, дана технологія відтворення родючості кислих ґрунтів призводить до низькоефективного використання дефіцитних і коштовних удобрювальних ресурсів, можливого забруднення та значних енергетичних і матеріальних витрат.

Крім цього, цей метод не враховує повністю основних властивостей ґрунтів, що значно впливають на потребу їх у вапнуванні (вміст гумусу, гранулометричний склад, вміст обмінних основ). У розроблених раніше рекомендаціях пропонувалося вносити на слабокислих ґрунтах 3–4 т вапна на 1 га і на середньокислих – 5–6 т/га. Така традиційна технологія хімічної меліорації кислих ґрунтів, яку застосовували ізольовано від загальної системи відтворення їх родючості, є нерентабельною і енерговитратною.

Водночас шведськими та німецькими вченими встановлено, що високі норми внесення вапна на сильноокислих ґрунтах і різке зрушення рН сприяють розвитку нітрифікаційних процесів, посиленню вторинного підкислення, підвищенню непродуктивних газоподібних втрат азоту, додатковій мінералізації гумусу. Тому в сучасних умовах потрібні принципово нові підходи до вирішення проблеми меліорації кислих ґрунтів з обов'язковим переходом на ресурсозберігальні технології.

Розрахунок витрат меліорантів за рН-буферністю позбавлений багатьох недоліків. Основними факторами, які впливають на рН-буферність ґрунту і відповідно підвищують його стійкість до негативного впливу антропогенних навантажень, є стан вбирного комплексу, зокрема, насиченість ґрунту обмінним кальцієм і магнієм. Значний вплив на встановлення кислотно-лужної рівноваги має домінуючий в складі кислого ґрунту алюміній.

Метод встановлення доз вапна за рН-буферністю дозволяє врахувати особливості щодо реакції ґрунту всіх сільськогосподарських культур, які вирощують у сівозміні, відповідно до їх вимог стосовно актуальної кислотності. рН-буферність ґрунту може бути визначена за методикою, поданою ННЦ “Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського” (1999 р.).

Зазначений метод базується на вимірюванні зміни рН ґрунто-вої суспензії внаслідок додавання серії зростаючих доз кислоти та лугу. Одержана крива рН-буферності є основою для нормативного прогнозування потреб хімічної меліорації. Буферність ґрунту розглядається відносно субстрату порівняння, наприклад, кварцового піску [24]. Графіки залежності для кварцового піску і ясно-сірого опідзоленого ґрунту подано на рис 4.

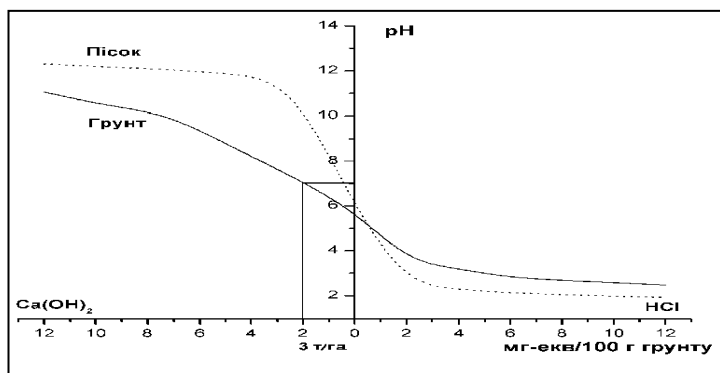


Рис. 4. Крива рН-буферності ясно-сірого лісового ґрунту та оптимальна норма вапна

В умовах кислих ґрунтів криву рН-буферності (лужне крило) можна використовувати для розрахунку норм витрат вапнякових матеріалів для нейтралізації надлишкової кислотності, тобто, якщо взяти за основу оптимальне значення рН (водне) для кожної конкретної культури, то за допомогою графіка кривих рН-буферності встановлюємо кількість Ca(OH)_2 , яка потрібна для досягнення заданого рН в умовах даного типу ґрунту (табл. 1).

Так, наприклад, за таблицею відносної стійкості культурних рослин до низьких значень рН знаходимо, що для кукурудзи верхня межа оптимуму рН становить 7,0. Тоді згідно з кривою рН-буферності ясно-сірого лісового ґрунту для доведення рН даного типу ґрунту до

цього значення потрібна кількість $\text{Ca}(\text{OH})_2$ становить 2 мг-екв на 100 г ґрунту, що становить у фізичній вазі 3 т CaCO_3 на 1 га.

1. Оптимальна реакція ґрунтового розчину для сільськогосподарських рослин

Стійкість		Стійкість	
Культура	pH _{водне}	Культура	pH _{водне}
<u>Дуже сильна</u>		Кукурудза	6,0–7,0
Рис	4,0–6,0	Горох	6,0–7,0
Люпин	4,5–6,0	Пшениця яра	6,0–7,5
Бруква	4,8–5,5	Турнепс	6,0–7,5
Серадела	4,8–6,0	Буряк кормовий	6,2–7,5
<u>Сильна</u>		Помідори	6,3–6,7
Картопля	5,0–5,5	Пшениця озима	6,3–7,5
Тимофіївка	5,0–7,5	Огірки	6,4–7,0
Овес	5,0–7,7	Цибуля	6,4–7,9
Льон	5,5–6,5	<u>Слабка</u>	
Морква	5,5–7,0	Соя	6,5–7,1
Жито озиме	5,5–7,5	Капуста	6,5–7,4
Просо	5,5–7,5	Мак	6,8–7,2
Вика	5,7–6,4	Ячмінь	6,8–7,5
<u>Середня</u>		Райграс	6,8–7,5
Соняшник	6,0–6,8	Буряк цукровий	7,0–7,5
Цикорій	6,0–6,5	Люцерна	7,0–8,0
Конюшина	6,0–7,0	Коноплі	7,1–7,4

Для спрощення розрахунків є розроблена матрична таблиця, з допомогою якої $\text{Ca}(\text{OH})_2$, що простежується з кривої pH-буферності, легко перевести у норматив витрат CaCO_3 у тонни на 1 гектар за звичайною (існуючою) і ресурсозберігаючою технологіями меліорації, що в даному випадку відповідає 3,0 і 0,2 т (табл. 2).

Для перерахунку потреби CaCO_3 на 1 га ріллі потрібно визначитися, який спосіб внесення вапна передбачається: розкидний під оранку або культивуацію чи локальний за технологією локального окультурення. За матричною таблицею визначаємо, що за звичайною технологією хімічної меліорації внесене вапно перемішується приблизно з 3000 т ґрунту на кожному гектарі, для досягнення межі оптимального значення pH при вирощуванні кукурудзи потреба у вапні становить 3000 кг/га.

2. Матрична таблиця розрахунків норм внесення CaCO_3 на основі графічної моделі рН-буферності ґрунтів за різних технологій їх окультурення

Показники, об'єкт	Одиниці виміру	Параметри навантажень												
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0	3,0	
Добавки гідроксиду кальцію (Ca(OH) ₂), шкала навантажень (вісь абсцис)	мг-екв на 100 г ґрунту	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0	3,0	
Добавка карбонату кальцію (CaCO ₃)	кг CaCO ₃ на 1 т ґрунту	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	1,0	1,5	
Звичайна технологія окультурення, суцільна оранка – перемішування меліоранту з 3000 т ґрунту	кг CaCO ₃ на 1 га	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500	3000	4500	
Звичайна технологія окультурення, культивация – перемішування меліоранту з 1500 т ґрунту	кг CaCO ₃ на 1 га	75	150	225	300	375	450	525	600	675	750	1500	2250	
Технологія локального окультурення – перемішування меліоранту з 200 т ґрунту	кг CaCO ₃ на 1 га	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200	300	

Якщо меліорант вноситься не в орний шар (0–25 см), а, наприклад, під культивування (0–12 см), то нормативи його зменшуються відповідно вдвічі, а це становитиме 1500 кг/га.

Таким чином, використовуючи криву рН-буферної здатності ясно-сірого лісового ґрунту для встановлення норми вапна на зрушення актуальної кислотності, маємо можливість розрахувати оптимальну межу вапнякового навантаження на ґрунт, не завдаючи шкоди ґрунтовому розчину, природному розвитку ґрунтових процесів та довкіллю. Це сприятиме підвищенню продуктивності кислих ґрунтів та покращанню їх агрофізичних властивостей.

За “компенсуючою” або підтримувальною меліорацією внесенням відносно високих доз вапна рН ґрунту нейтралізують до заданого рівня. Другий етап передбачає проведення безпосередньо заходів із підтримувального вапнування, при цьому дози вапна у порівнянні з традиційною технологією зменшуються у декілька разів. При щорічному внесенні невисоких доз вапна відбувається стабілізація рН ґрунту на досягнутому рівні. Цю технологію доцільно застосовувати як з метою запобігання вторинного підкислення, викликаного внесенням мінеральних добрив, так і з метою заощадження коштів (табл. 3).

4. Дози CaCO_3 в залежності від $\text{pH}_{(\text{KCl})}$ та гранулометричного складу ґрунту (чисельник – традиційна технологія, знаменник – “підтримуюча”)

Ґрунт	pH_{KCl}					
	4,5	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4
Супіщаний	$\frac{3,5}{0,7}$	$\frac{3,0}{0,6}$	$\frac{2,5}{0,5}$	$\frac{2,5}{0,5}$	$\frac{1,5}{0,3}$	$\frac{1,5}{0,3}$
Легкосуглинковий	$\frac{4,5}{0,9}$	$\frac{4,0}{0,8}$	$\frac{3,5}{0,7}$	$\frac{3,0}{0,6}$	$\frac{2,5}{0,5}$	$\frac{2,5}{0,5}$
Середньосуглинковий	$\frac{5,5}{1,1}$	$\frac{5,0}{1,0}$	$\frac{4,5}{0,9}$	$\frac{4,0}{0,8}$	$\frac{3,5}{0,7}$	$\frac{3,0}{0,6}$
Важкосуглинковий	$\frac{6,5}{1,3}$	$\frac{6,0}{1,2}$	$\frac{5,5}{1,1}$	$\frac{5,0}{1,0}$	$\frac{4,5}{0,9}$	$\frac{4,0}{0,8}$

Важливим ланцюгом ресурсозбереження є **фітомеліорація**. Вона базується на включенні і розташуванні у сівозміні рослин, що толерантні до підвищеної кислотності ґрунтового розчину. До культур, що вирощуються на кислих ґрунтах належать люпин, серадела, картопля, овес, льон, морква, жито озиме, просо та інші культури, що

за своїми фізіологічними особливостями адаптовані до підвищеної кислотності ґрунтового розчину.

На сірих лісових ґрунтах та чорноземах опідзолених з близьким заляганням лесів у систему чергування культур обов'язково включають такі фітомеліоранти як конюшина, люцерна, люпин, які здатні поліпшувати кислотно-лужну рівновагу за рахунок “перекачування” кальцію з нижніх шарів ґрунту у верхні.

Під впливом вирощування адаптивних до ґрунтового середовища культур в поєднанні з “компенсуючою” хімічною меліорацією, системою удобрення та структурою сівозмін, поступово покращуються фізико-хімічні властивості ґрунту та зростає продуктивність землеробства.

Базуючись на світовому та вітчизняному досвіді, в ННЦ “Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського” розроблено ресурсо- та енергозберігаючу технологію локальної меліорації кислих ґрунтів, або технологію “комфортних ґрунтових осередків” [25].

Згідно з цією технологією меліорується, або окультурюється, не вся орна маса ґрунту, а тільки її невелика частка на межі орного і підорного шарів. Саме тут створюються локальні висококомфортні для розвитку кореневої системи стрічки (осередки) діаметром 7–10 см з міжстрічковою відстанню 35 см. Формування високородючих ґрунтових стрічок здійснюється за допомогою спеціально заготовленого органо-мінерального комплексного добрива (ОМКД), яке має високі адсорбційно-десорбційні і буферні характеристики. Воно komponується з добре гуміфікованих органічних матеріалів (перегною, торфу, сапропелю, вермикомпосту тощо), до яких вносять мінеральні добрива (аміачну селітру, сульфат амонію, вуглеамонійні солі (ВАС), суперфосфат, фосфоритне борошно, калімагnezію і т. ін.) та меліоруючі добавки (вапно, лесову породу, дефека́т, гіпс, фосфогіпс тощо). При створенні ОМКД враховують агрохімічні та агрофізичні властивості конкретного ґрунту та особливості вирощування сільськогосподарських культур. У невеликому об'ємі оброблюваного ґрунту створюють найсприятливіші умови для розвитку рослин.

Локальне внесення ОМКД належить до основного внесення, а локально меліорований ґрунт є фоном, на тлі якого здійснюються всі інші технологічні операції. Технологія локальної меліорації не виключає при тому припосівного внесення добрив під час сівби або садіння певної культури, що сприяє поліпшенню живлення рослин у початковий період їх росту та розвитку.

Проведені дослідження на дерново-підзолистих супіщаних ґрунтах Полісся показали високу ефективність технології локальної меліорації, екологічні та економічні переваги якої перед традиційною технологією є надто високими. При цьому вимивання кальцію, елементів живлення рослин та органіки з лізіметричними водами зменшувалося на 35–45% в порівнянні з традиційною технологією.

ПРОДУКТИВНІСТЬ СІВОЗМІНИ ЗАЛЕЖНО ВІД ТРИВАЛОГО ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ СИСТЕМ УДОБРЕННЯ ТА ВАПНУВАННЯ

Урожайність сільськогосподарських культур, як і продуктивність сівозміни у цілому, є інтегральним показником ефективної родючості ґрунту, їх рівень визначається станом ґрунту та складним поєднанням цілого комплексу ґрунтових, біологічних і погодних факторів [26].

Систематичне удобрення та періодичне вапнування, покращуючи поживний режим, фізико-хімічні властивості, зумовлені в першу чергу зниженням кислотності ґрунтового розчину, дають можливість отримувати в умовах ясно-сірих лісових поверхнево оглеєних ґрунтів високі та стабільні врожаї сільськогосподарських культур.

Сівозміна кукурудза на силос – ячмінь ярий – конюшина лучна – пшениця озима є типовою і однією з найбільш поширених у Лісостепу західному. Підвищення її продуктивності має важливе значення для забезпечення господарств кормами і зерном.

Як показали дослідження, найвищу продуктивність сівозміни 7,23 т/га зернових одиниць (з.о.) отримано при застосуванні органо-мінеральної системи удобрення з внесенням на гектар сівозмінної площі 10 т гною та мінеральних добрив в дозі $N_{65}P_{68}K_{68}$ на фоні вапнування дозою вапна розрахованою за рН-буферністю. Дана система удобрення але на фоні вапнування 1,0 нормою $CaCO_3$ за Нг, формувала продуктивність гектара сівозмінної площі на рівні 6,85 т/га з.о. (рис. 5).

Рівень природної родючості забезпечував 2,42 т/га з.о. При односторонньому тривалому застосуванні лише мінеральної системи удобрення продуктивність гектара сівозмінної площі становила 4,12 т/га з.о. За внесення високих доз НРК на фоні вапнування 1,5 н $CaCO_3$ за Нг продуктивність зростає до 6,29 т/га з.о. При даній системі удобрення та вапнування за рН-буферністю на початку ротації продуктивність сівозміни зростала до 6,55 т/га з.о. за рахунок зменшення кислотності.

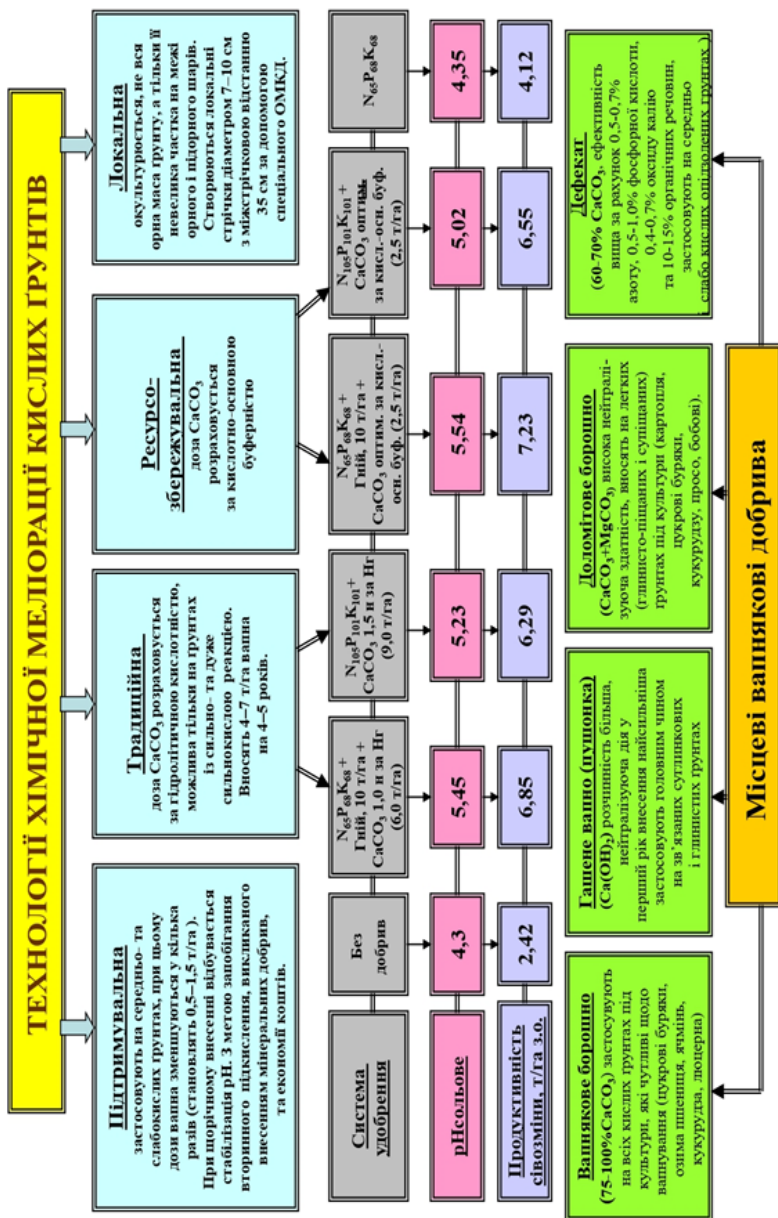


Рис 5. Технології хімічної меліорації кислих ґрунтів

Отже, систематичне сумісне застосування повної дози мінеральних добрив – $N_{65}P_{68}K_{68}$, 10 т/га сівозмінної площі гною на фоні вапнування дозою розрахованою за рН-буферністю формує найвищий рівень продуктивності ясно-сірого лісового поверхнево оглеєного ґрунту.

ЕКОНОМІЧНА ТА ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТРИВАЛОГО ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ СИСТЕМ УДОБРЕННЯ ТА ВАПНУВАННЯ

Важливим критерієм оцінки кожного агрономічного заходу є його економічна та енергетична ефективність. Економічна ефективність дає можливість враховувати реальні витрати та прибутки і на цій основі розробити найбільш економічно вигідні технології вирощування і удобрення сільськогосподарських культур. Енергетична оцінка дає можливість вибрати найбільш енергозберігаючу систему управління родючістю землі, вона доповнює економічну грошову оцінку та направлена на більш ефективне використання засобів, що виділяються сільському господарству.

Проведені на кінець ротації розрахунки економічних показників та коефіцієнта енергетичної ефективності, показали, що найвищі показники економічної ефективності – умовно-чистий дохід, рівень рентабельності витрат та приріст додаткового врожаю було отримано за органо-мінеральної системи удобрення на фоні вапнування. .

Так, при сумісному застосуванні у сівозміні повної дози мінеральних добрив ($N_{65}P_{68}K_{68}$), 10 т/га гною і 1,0 н вапна за Нг, вартість додаткової продукції становила 26476 грн./га, при сумі витрат 18586 грн./га, що забезпечувало одержання 7890 грн./га умовно чистого доходу і рівень рентабельності 42,5%. При даній системі удобрення коефіцієнт енергетичної ефективності був достатньо високим і становив 2,03 %.

За даної системи удобрення і внесення вапна за кислотно-основною буферністю вартість додаткової продукції становила 28154 грн при сумі витрат 17424, що забезпечило 10730 грн/га умовно чистого доходу. Коефіцієнт енергетичної ефективності при даній системі удобрення і вапнування зростає до 2,37, рівень рентабельності становить 61,6%.

При односторонньому довготривалому застосуванні лише мінеральної системи удобрення на ясно-сірому лісовому поверхнево оглеєному ґрунті вартість приросту врожаю незначно перевищує суму затрат, а тому дана система удобрення є економічно недоцільною.

Внесення у сівозміні 10 т/га сівозмінної площі гною порівняно з вапнуванням знижували рівень рентабельності до 54,8%. При цьому витрати на внесення гною втричі вищі. При сумісному застосуванні органічних добрив і вапна було отримано вищий умовно чистий дохід, але вартість приросту врожаю була не дуже високою, що забезпечило рентабельність на рівні 25,1%.

Таким чином, на ясно-сірому лісовому поверхнево оглеєному ґрунті орґано-мінеральна система удобрення на фоні вапнування нормою вапна розрахованою за кислотно-основною буферністю є найбільш економічно та енергетично ефективним агрозаходом, який забезпечує найвищі показники умовно чистого доходу, окупності однієї гривні затрат, рівня рентабельності та коефіцієнта енергетичної ефективності.

Саме тому, для забезпечення сталого сільського господарства, відтворення та збереження родючості кислих ясно-сірих лісових поверхнево оглеєних ґрунтів першочергове значення має підтримка функціональної стійкості їх шляхом застосування у короткоротаційній сівозміні орґано-мінеральної системи удобрення з внесенням на гектар сівозмінної площі однієї норми мінеральних добрив ($N_{65}P_{68}K_{68}$), 10 т гною на фоні вапнування оптимальною дозою $CaCO_3$ (2,5 т/га) розрахованої за показником рН-буферності яка дозволяє ґрунтовим системам продовжувати надавати життєво важливі екосистемні послуги, незважаючи на зростаючі загрози, пов'язані зі зміною клімату та інтенсифікацією використання земель.

ЛІТЕРАТУРА

1. Цапко Ю. Л., Десятник К. О., Огородня А. І. Збалансоване використання та меліорація кислих ґрунтів. Харків : Бровін О. В., 2018. 251 с.
2. Трускавецький Р. С., Цапко Ю. Л. Основи управління родючістю ґрунтів. Харків : ФОП Бровін О.В., 2016. 388 с.
3. Ткаченко М. А., Борис Н. Є. (2021) Оптимізація живлення сільськогосподарських культур за фізико-хімічної деградації кислих ґрунтів. Вісник аграрної науки. №1 (814). С. 15–22. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202101-02>
4. Мазур Г. А. Відтворення і регулювання родючості легких ґрунтів / Г. А. Мазур. – К. : Аграрна наука. – 2008. – 305 с.
5. Martins, A.P., Denardin, L.G.D.O., Tiecher, T., Borin, J.B.M., Schaidhauer, W., Anghinoni, I., Carvalho, P.C.D.F. & Kumar, S. 2020. Nine-year impact of grazing management on soil acidity and aluminum speciation and fractionation in a long-term no-till integrated crop-livestock system in the subtropics. Geoderma 359, 113986. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113986>
6. Кирильчук А. А., Бонішко О. С. Хімія ґрунтів: основи теорії і практикум: навч. Посібник. Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2011. 354 с.
7. Ткаченко М. А., Кондратюк І. М., Борис Н. Є. Хімічна меліорація кислих ґрунтів. Вінниця : ТОВ «ТВОРИ», 2019. 318 с.
8. Schroder, J. L., Zhang, H., Girma, K., Raun, W. R., Penn, C. J., & Payton, M. E. (2011). Soil acidification from long-term use of nitrogen fertilizers on winter wheat. Soil Science Society of America Journal 75. 957–964. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0187>
9. Томашівський З. М., Коник Г. С., Качмар О. Й., Оліфір Ю. М. Підвищення родючості кислих ґрунтів. Монографія. 2-ге вид., допов. Львів : СПОЛОМ, 2021. 220 с.
10. Faria J.M.S., Teixeira D.M., Pinto A.P., Brito I., Barrulas P., Carvalho M. Aluminium, Iron and Silicon Subcellular Redistribution in Wheat Induced by Manganese Toxicity. Appl. Sci. 2021, 11, 8745. <https://doi.org/10.3390/app11188745>
11. Rengel Z. Manganese uptake and transport in cell. Metal ions in biological systems. 2000, 37. 57-87.
12. Kabata-Pendias A., Mukherjee A.B.. Trace Elements from Soil to Human. 2007, 550 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-32714-1>
13. Khoshru B., Mitra D., Nosratabad A., Reyhanitabar A., Mandal L., Farda B., Djebaili R. Pellegrini M., Guerra B.E., Senapati A., Panneerselvam P., Das Mohapatra P. Enhancing Manganese Availability for

Plants through Microbial Potential: A Sustainable Approach for Improving Soil Health and Food Security. *Bacteria*. 2023, 2(3). 129–141. <https://doi.org/10.3390/bacteria2030010>

14. Volungevicius J., Amaleviciute K., Feiziene D., Feiza V., Slepeliene A., Liaudanskienė I., Versulienė A. & Vaisvalavicius R. The effects of agrogenic transformation on soil profile morphology, organic carbon and physico-chemical properties in Retisols of Western Lithuania, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2018. 64:13, 1910-1923, DOI: 10.1080/03650340.2018.1467006

15. Tripathi D.K., Singh S., Gaur S., Singh S., Yadav V., Liu S., Singh V.P., Sharma S., Srivastava P., Prasad S.M., Dubey N.K., Chauhan D.K. and Sahi S. Acquisition and Homeostasis of Iron in Higher Plants and Their Probable Role in Abiotic Stress Tolerance. *Front. Environ. Sci.* 2018. 5:86. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00086>

16. Colombo C., Di Iorio E., Qingsong L., Zhaoxia J., Vidal B. 2018. Iron Oxide Nanoparticles in Soils: Environmental and Agronomic Importance. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18, 761-761. <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.15294>

17. Slimani I., Zhu-Barker X., Lazicki P., Horwath W. 2023. Reviews and syntheses: Iron – a driver of nitrogen bioavailability in soils? *Biogeosciences*, 20(18), 3873-3894. <https://doi.org/10.5194/bg-20-3873-2023>

18. Calabrese S. and Porporato A. 2019. Impact of ecohydrological fluctuations on iron-redox cycling. *Soil Biology and Biochemistry*, 133, 188-195, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.03.013>

19. Kaya C., Ashraf M., Alyemeni M.N., Ahmad P. 2020. Nitrate reductase rather than nitric oxide synthase activity is involved in 24-epibrassinolide-induced nitric oxide synthesis to improve tolerance to iron deficiency in strawberry (*Fragaria × annassa*) by up-regulating the ascorbate-glutathione cycle. *Plant Physiology and Biochemistry*, 151, 486-499. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.002>

20. Lapaz A.M., Camargos L.S., Yoshida C.H.P., Firmino A.C., Monteiro de Figueiredo P.A., Aguilar J.V., Nicolai A.B., Wesller da Silva de Paiva, Cruz V.H., Tomaz R.S. 2020. Response of soybean to soil waterlogging associated with iron excess in the reproductive stage. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26, 1635-1648. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00845-8>

21. Ay A., Demirkaya S., Kızılkaya R., Gülser C. 2022. The effects of two Fe-EDDHA chelated fertilizers on dry matter production and Fe uptake of tomato seedlings and Fe forms of a calcareous soil. *Eurasian Journal of Soil Science*, 11(3), 259-265. <https://doi.org/10.18393/ejss.1085194>

22. Zhang Z., and Furman A. 2021. Soil redox dynamics under dynamic hydrologic regimes - A review. Science of The Total Environment, 763, 143026, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143026>

23. Трускавецький Р. С. Ресурсозберігаючі технології хімічної меліорації ґрунтів в умовах земельної реформи / Р. С. Трускавецький, С. А. Балюк, Ю. Л. Цапко та ін. – К. : НБВ, 2000. – 70 с.

24. Трускавецький Р. С. Сучасні фізико-хімічні методи дослідження ґрунтів / Р. С. Трускавецький, Ю. Л. Цапко, Н. Ф. Чешко та ін. – Х., 1999. – 35 с.

25. Трускавецький Р. С. Технології ефективного використання вапняних матеріалів на кислих і вторинно підкислених ґрунтах / Р. С. Трускавецький, Ю. Л. Цапко. – Х., 2004. – 35 с.

26. Ткаченко М. А. Продуктивність типових сівозмін Лісостепу залежно від інтенсивності агрохімічного навантаження / М. А. Ткаченко, Д. В. Літвінов // Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків. – 2014. – Випуск 22. – С. 100–106.

Для нотаток

Науково-методичне видання

**НАУКОВІ ОСНОВИ
ЕВОЛЮЦІЙНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ
ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ТА
ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО
УПРАВЛІННЯ РОДЮЧІСТЮ КИСЛИХ ЯСНО-СІРИХ
ЛІСОВИХ ПОВЕРХНЕВО ОГЛЕЄНИХ ҐРУНТІВ**

(науково-методичні рекомендації)

Підписано до друку 28.10.2025.
Формат 30х42/4. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Друк офсетний. Умовн. друк. арк. 2.3.
Тираж 50 прим.

Друкарня Інституту сільського господарства
Карпатського регіону НААН
81115, Львівська обл., Львівський р-н, с. Оброшине