

УДК 631.4/18:631.48:631.18
© 2015

*Крамарьов С. М., доктор сільськогосподарських наук,
Крамарьов О. С., магістр*

ДУ Інститут сільського господарства степової зони НААН України

Христенко А. О., кандидат сільськогосподарських наук

ННЦ Інститут ґрунтознавства і агрохімії ім. О. Н. Соколовського НААН України

Токмакова Л. М., кандидат сільськогосподарських наук

ДУ Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН України

Жученко С. І., кандидат сільськогосподарських наук,

Сироватко В. А., кандидат біологічних наук,

Цьова Ю. А., аспірант

(науковий керівник – доктор сільськогосподарських наук, професор П. В. Писаренко)

Полтавська державна аграрна академія

Сироватко К. В., інженер

Дніпропетровська філія ДУ Інституту охорони ґрунтів

ЗМІНА ВМІСТУ РУХОМОГО ФОСФОРУ В ГЕНЕТИЧНИХ ГОРИЗОНТАХ ЧОРНОЗЕМУ ЗВИЧАЙНОГО

Рецензент – доктор сільськогосподарських наук, професор П. В. Писаренко

Чорноземи звичайні на лесових породах важкого гранулометричного складу Північного Степу України містять підвищену кількість апатитоподібних сполук. Внаслідок цього використання будь-яких кислотних методів, у тому числі ГОСТ 26204-91 (метод Чирикова) призводить до істотного штучного завищення оцінки фосфатного стану ґрунтів (на 40–80 мг Р₂О₅/кг ґрунту). Для діагностики фосфатного стану даних ґрунтів, згідно з вимогами нормативних документів України, слід використовувати наступні стандарти: ДСТУ 4114 (метод Мачігіна), ДСТУ 4727 (метод Карпінського-Зам'ятіної) і ДСТУ ISO 11263 (метод Olsen). Для отримання високих урожайів із високою якістю на чорноземах звичайних Північного Степу України необхідно вносити не менше фосфорних добрив, ніж на інших ґрунтах країни виходячи з даних ґрунтової діагностики.

Ключові слова: *вміст рухомого фосфору, чорнозем звичайний, сільськогосподарська продукція, поживний режим.*

Постановка проблеми. Поряд з азотом, другим за важливістю елементом мінерального живлення, який в більшості випадків лімітує подальший ріст врожайності зерна всіх без виключення сільськогосподарських культур, є фосфор [3]. «Про це повинен пам'ятати кожен хлібороб», – неодноразово наголошував у своїх наукових працях академік В. Д. Панніков (В. Д. Панніков, 2003). Адже від рівня його засвоєння та метаболізму залежать визначально важливі етапи онто-

генезу рослин та формування продуктивності агроценозів майже всіх зернових культур.

Заради справедливості слід відмітити, що на основі багаторічних польових, а також вегетаційних дослідів, Д. М. Прянішніков ще в 1924 році створив першу ґрунтово-агрохімічну карту колишнього СРСР, на якій він відносив Чорноземну зону, в тому числі і наші степові ґрунти до районів, які терміново потребують внесення фосфорних добрив. Він писав, що в чорноземах є «великий запас азоту, поки що вистачає калію: потрібно додати лише один елемент – фосфор, щоб відновити чорнозем, виснажений тривалою культурою без добрив, яка розпочалася з часів хрещення Русі, або й ще раніше» (Д. М. Прянішніков, 1924).

Це пов'язано з тим, що в більшості типів ґрунтів фосфор знаходиться в слаботорозчинній мінеральній та недоступній рослинам органічній формі, а майже всі сільськогосподарські культури, лише за виключенням тих їх видів (гречка, люпин, горох та інші), у яких співвідношення СаО/Р₂О₅ більше 1,3, здатні поглинати Р₂О₅ із Са₃(РО₄)₂, розчиняючи фосфати своїми екссудатами або вивільняючи фосфор за рахунок інтенсивного поглинання з ґрунтового розчину катіонів кальцію, а ярі та озимі зернові колосові культури поглинають лише рухому його форму, оскільки вищезазване співвідношення значно менше цього показника (Чириков, 1950). Ярі та

озимі зернові культури (пшениця, жито, тритикале, ячмінь, кукурудза) слабо засвоюють важкорозчинні сполуки фосфору з ґрунту, тому вони добре реагують на внесення легкорозчинних форм фосфорних добрив, оскільки енергійно вбирають фосфор і менше кальцій. За таких умов наявний надлишок катіонів кальцію хімічно зв'язує рухомий фосфор в слаборозчинні фосфати [3]. Тому в умовах Степу серед елементів живлення, що знаходяться в дефіциті, на першому місці стоїть фосфор, а потім вже азот, цинк і т. д. [4]. Частка фосфорних добрив у прирості врожаю зернових культур в цій зоні висока і становить 30–60, азотних значно менше – 15–40 і для калійних становить лише 0–20 %. Серед усіх форм фосфору найбільший вплив на врожай має рухома форма. Безумовно, особливо важлива роль рухомих форм фосфору проявляється на початку росту та розвитку рослин і особливо сильно відчувається на стадії проростків, тому його обов'язково вносять у ґрунт завчасно (Лихочвор В. В., 2008). Старші ж рослини слабше реагують на нестачу цього елемента живлення. Цей елемент зменшує негативну дію надлишкового азотного удобрення, оптимізує використання мінерального азоту й підвищує ефективність азотних добрив.

Проте поряд з цим, оптимальне забезпечення ґрунту рухомими формами цього елемента живлення є також важливим і впродовж усього онтогенезу. Однак в більшості типів ґрунтів рухомі форми цього важливого елемента мінерального живлення рослин знаходиться в мінімумі і стримують подальший ріст продуктивності сільськогосподарських культур [8]. Тут доречним буде відмітити, що в Україні площа ріллі з низьким і середнім умістом рухомого фосфору досягає 17812 гектарів, або 57 % загальної площі (Металіди, 1999; Носко, 1997). Саме через низьку забезпеченість ґрунтів доступним для рослин фосфором окупність фосфорних добрив досить висока – у середньому 1 кг P_2O_5 забезпечує приріст 4–5 кг зерна. Внаслідок зниження вмісту фосфору в ґрунті вже у найближчі роки в Україні зменшення продуктивності сівозмін сягне 2,2 зернової одиниці (Медведев, 2000).

Парадокс проблеми фосфорного живлення рослин полягає в тому, що валові запаси фосфору в більшості ґрунтів в основному значні, однак на 40 % площ орних земель світу продуктивність зернових культур лімітується нестачею рухомих форм фосфору (Гуляев, 2004; Нікітішен, 2002; Ма, 2000; Rengel, 2005). Це пояснюється тим, що в складі валових запасів фосфору в метровому шарі ґрунтів домінуюче положення займають

слаборозчинні форми, а вміст рухомих форм, навпаки, незначний і не завжди відповідає потребам рослин (Носко, 1990). Тому ефективна родючість більшості ґрунтів в основному обмежується недостатньою забезпеченістю їх рухомими формами фосфору [10].

Крім того, на відміну від інших елементів органічної речовини ґрунту (С, Н, О, N), які надходять у ґрунт переважно із атмосфери, основним первинним джерелом фосфору є ґрунтоутворююча материнська порода (Маккелві, 1977), яка не завжди в змозі забезпечити в достатній кількості ґрунтовий розчин рухомими формами фосфору. Це також пов'язано ще й з тим, що фосфор за своїми хімічними властивостями має складну природу взаємодії з компонентами ґрунту.

Ця обставина значною мірою ускладнює отримання об'єктивної оцінки забезпеченості ґрунту цим елементом мінерального живлення рослин. Тому для уникнення його дефіциту, дуже важливим є своєчасне отримання інформації про вміст у ґрунті рухомих форм фосфору і підтримування оптимального рівня доступного для рослин його форм упродовж усього онтогенезу, внесенням фосфоровмісних добрив [3]. Точне визначення показників рухомих сполук фосфору в ґрунті дає змогу ефективніше використовувати природні ресурси та прогнозувати ефективність фосфорних добрив [11]. Недостовірні інформація про фосфатний стан ґрунтів, навпаки, призводить до вкрай неефективного використання добрив [17].

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми. Застосування методів визначення вмісту фосфору без урахування конкретних особливостей ґрунтів, а також недостатнє відпрацювання методичних аспектів діагностики живлення рослин призводить до викривлення оцінки стану родючості ґрунтів цілих регіонів [2, 18]. Це пов'язано з тим, що більшість методів базується на використанні в якості екстрагентів розчинів сильних кислот, що свідчить про їх належність до так званих жорстких методів (Стахів, 2007; Христенко, 2003, 2008). Використання цих методів на досить кислих ґрунтах призводить до істотного заниження даних за рахунок сильного повторного поглинання P_2O_5 під час проведення аналізу, а в ґрунтах, що мають підвищений уміст апатитоподібних сполук, навпаки, до істотного їх завищення. Навіть вкрай слабка лужність ґрунтів викликає часткову нейтралізацію кислоти і знову ж заниження результатів, які отримують (Носко, 1999). Головним критерієм під час вибору мето-

ду для вилучення рухомих сполук фосфору з ґрунту є оцінка його здатності правильно відображати реакцію рослин на внесення фосфорних добрив [14].

З вищевикладеного стає зрозумілим, що рухомий (доступний) фосфор, відіграє особливо важливе значення в мінеральному живленні рослин і методично правильне визначення його вмісту в ґрунтовому розчині має надзвичайно важливе значення під час проведення розрахунків оптимальних доз внесення фосфорних добрив. Тому його завжди не вистачає в ґрунтовому розчині, оскільки він становить незначний відсоток від наявних у ґрунті його валових форм [6].

Щоб чітко уявити собі це, потрібно провести порівняння вмісту в ґрунті валових і рухомих форм фосфору. Проведене співставлення показало, що в чорноземах звичайних вміст валових форм фосфору (0,11–0,12 %) становить 1100–1200 мг/кг ґрунту. Вміст же рухомих його форм, визначених за методом Чирикова, які переходять у слабокислотні витяжки 0,5N оцтової кислоти й частково беруть безпосередню участь у фосфатному живленні рослин (98–167 мг/кг ґрунту), містяться в ґрунті в незначній кількості й становлять усього лише 8,2–13,9 % від валового вмісту фосфору. Тому рухомі форми фосфору перебувають у першому мінімумі серед інших макроелементів в даних ґрунтах [15–17].

У науковій літературі [11–15] поряд з терміном рухомий для виділення з усієї сукупності фосфоровмісних мінеральних сполук доступні для рослин форми часто використовують й інші терміни, які є синонімами – «засвоюваний, лабільний» фосфор. Однак нечіткість цієї низки термінів заважає одержувати об'єктивну оцінку поживного режиму конкретного ґрунту. Поняття «рухомий» фосфор, калій та інші помилково асоціюється з концентрацією конкретного елемента живлення рослин у ґрунтовому розчині, залежною від властивостей ґрунтів та інших чинників [13, 14]. Рухомість – це скоріше міра доступності елемента рослинам. Вміст рухомих форм поживних речовин в екстенсивно використовуваній ріллі – величина постійна для кожного з елементів [16]. Значення даних констант визначається фізико-хімічними умовами, характерними для поверхні планети. Ілюзія різної природної забезпеченості різних типів орних ґрунтів і строкатості конкретного поля відносно рухомих форм елементів живлення рослин зумовлена недосконалістю нормативних і методичних аспектів діагностики живлення рослин (Христенко, 2009).

Відповідно до класичного визначення Д. М. Прянішнікова (1935) «засвоюваний фосфор не є певною хімічною сполукою й не перебуває в готовому вигляді в ґрунті». Утім про те, що не все так просто, свідчить назва єдиного міжнародного стандарту, що встановлює метод визначення рухомого фосфору в ґрунтах – ISO 11236 (спектрометричний метод визначення фосфору в розчині гідрокарбонату натрію). В ньому акцент зроблено не на те, що визначаємо, а як визначаємо й за допомогою чого (Христенко, 2008).

Слід відмітити, що через безперервний процес поглинання цього поживного елемента рослинами, концентрація доступного фосфору завжди низька (Holford, 1997). Як відомо, рослини здатні поглинати фосфор із ґрунтового розчину навіть у випадку невеликих його концентраціях, таких як 0,01–0,02 мг/л P_2O_5 (Соколов А. В., 1950). До того ж у чорноземах звичайних вміст розчинних у воді фосфатів може відновлюватись за вегетаційний період більш ніж 100 разів (Носко Б. С., 2004). У зв'язку з цим для нормального росту і розвитку рослин важливою є не стільки висока його концентрація в ґрунтовому розчині, як здатність ґрунту поповнювати запаси рухомого фосфору і таким чином ліквідувати його дефіцит, що й спостерігається в польових умовах під час мінерального живлення рослин [8, 9, 11].

У даному випадку доступність фосфору в ґрунті для рослин залежить від його мобілізації та іммобілізації, які пов'язані з процесами розчинення чи осадження, сорбції і десорбції, мінералізації та біологічного закріплення його сполук (Антіпіна, 1991). Основним джерелом поповнення ґрунтового розчину рухомими формами фосфору є валові його запаси, які зосереджені в материнській породі та в фосфоровмісних органічних сполуках ґрунту [9]. Але поряд з ними суттєву роль відіграють і водорозчинні сполуки фосфору, які надходять у ґрунт з мінеральними добривами [14].

Як уже відмічалось вище, в ґрунті валові запаси фосфору відносно високі. Так, в орному шарі чорноземів звичайних вміст валових форм фосфору становить 0,11–0,12 %, а його валові запаси порівняно з азотом та калієм невеликі та варіюють у межах 5,4–5,5 т/га, а в метровому – 17,5–18,0 т/га (Б. С. Носко, 2004), що значно нижче, ніж вміст у цих ґрунтах валових форм калію. Основна кількість валового фосфору міститься у верхньому (0–25 см) шарі ґрунту, що пов'язано з діяльністю рослин, активним поглинанням його ґрунтом і внесенням добрив. Унаслідок процесів біологічного переносу в гумусовому горизонті

кількість його завжди більша, ніж у нижче розташованих та материнській породі. Валові запаси, як уже про це велась розмова вище, представлені органічними і мінеральними формами [7].

Органічні фосфати (нуклеїнові кислоти, фосфатиди, цукрофосфати та інше), частка яких становить 10–50 % від загального вмісту фосфору, недоступні для рослин і беруть участь у живленні тільки після їх гідролізу і відокремлення фосфору [8]. Тобто головним чином фосфорорганічні сполуки ґрунту засвоюються рослинами лише після їх мінералізації. Але частка вивільненого мікроорганізмами органічного фосфору, який бере безпосередню участь у мінеральному живленні рослин незначна [6]. Це пов'язано з тим, що під час мікробіологічного розкладання фосфатовмісних органічних сполук, фосфор частково зв'язується мікрофлорою ґрунту, а потім, після розмноження цих мікроорганізмів, цей пул фосфору знову переходить до нових їх колоній. І лише чотири його відсотки із загальної кількості звільняється і переходить в мінеральну форму після їх відмирання (В. В. Швартау, В. І. Гуляєв, 2009). Тому основну роль в мінеральному живленні рослин займають мінеральні форми фосфору [11].

В чорноземах звичайних вміст мінеральних форм фосфору переважає над органічними [6]. Тому основну роль у фосфорному живленні рослин відіграють мінеральні форми фосфору [4]. К. Є. Гінзбург (1981) відмічає, що в ґрунтах виявлено наявність 205 фосфоровмісних мінералів, які всі є солями ортофосфорної кислоти. В основному мінеральні сполуки фосфору представлені дуже багатьма формами, які є переважно важкорозчинними, в основному малорухливими формами і слабо доступними рослинам фосфатами [8]. Мінеральні фосфати у ґрунті складаються з багатьох солей, які утворилися з ортофосфорної кислоти і є різними за хімічним складом та ступенем доступності для рослин [9].

Фосфор входить до складу мінералів: фторапатиту $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$, гідроксил апатиту $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$, тавівіаніту $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ [9]. Серед них домінуюче положення займають різновидності мінералу апатиту, головним чином, фторапатитом. У лесовій материнській породі чорноземів звичайних фосфор міститься у вигляді фторапатиту $\text{Ca}_5(\text{F}(\text{PO}_4)_3$ і кальцій гідроксилапатиту $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ [14]. У процесі руйнування цих первинних фосфоровмісних мінералів утворюються вторинні мінеральні сполуки фосфору, які містять у своєму складі різні солі ортофосфорної кислоти (А. В. Соколов, 1950). Мі-

неральні форми фосфору в ґрунті представлені солями ортофосфорної кислоти, в яких фосфатний аніон хімічно зв'язаний з катіонами Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Al^{3+} , Mn^{2+} та інші, значна частина яких знаходиться в поглинутому стані на поверхні ґрунтових колоїдів [10]. Характерною особливістю фосфатних ґрунтових сполук є низька їх розчинність і слабка дисоціація на іони [4].

Фосфатні іони добре фіксуються твердою фазою ґрунту і їх міграція в чорноземах звичайних дуже обмежена [12]. Інтенсивне хімічне поглинання характерне для солей ортофосфорної кислоти, обумовлює слабку рухомість сполук фосфору. Швидкість їх дифузії в ґрунті незначна і варіює в межах від 10^{-12} до 10^{-15} м²/сек., що уповільнює засвоєння фосфору рослинами, внаслідок чого прикоренева зона рослин швидко виснажується на цей елемент мінерального живлення рослин (В. В. Швартау, 2009). В зв'язку з цим виникає великий розрив між валовим вмістом фосфору в ґрунті і його доступною кількістю для рослин [9].

Засвоєння рослинами фосфатних аніонів із важкорозчинних сполук проходить лише з ґрунтового розчину – це основне положення фізіології рослин [8]. Засвоєння рослинами фосфору із важкорозчинних фосфоровмісних сполук проходить поступово й фізіологи пояснюють це тим, що кореневі волоски своїми кислими виділеннями (ексудатами) переводять в розчин апатити та фосфорити не в повній мірі. У зв'язку з цим, проблема фосфору в сучасному землеробстві є досить гострою і тому ми зобов'язані до цього елемента мінерального живлення відноситись з особливою увагою й турботою і постійно вести пошуки шляхів найбільш раціонального його використання в агроценозах зернових культур [6]. Основним джерелом мінерального фосфору для рослин в чорноземах звичайних є одно- та двохвалентні аніони ортофосфорної кислоти. Серед наявних у цих ґрунтах фосфорних сполук рослини найбільш легко засвоюють добре розчинені в воді солі одновалентних катіонів K_2HPO_4 і KH_2PO_4 , а також двозаміщені солі кальцію ортофосфорної кислоти CaHPO_4 [5].

Коренева система більш пристосована до поглинання аніона H_2PO_4^- і дещо гірше вона засвоює HPO_4^{2-} , тобто рослини краще засвоюють розчинні в воді дигідрофосфати, ніж гідрофосфати, розчиненні в слабких кислотах, що пов'язано з додатковими витратами енергії [11]. До того ж аніон H_2PO_4^- легше адсорбується коренями, ніж HPO_4^{2-} , значення якого зростає за високих показників рН, оскільки в розчині з рН вище 7,2 цей

аніон стає домінуючим іоном. Більшість проведених досліджень показали, що швидкість поглинання фосфору є найвищою в діапазоні рН від 5,0 до 6,6, коли в ґрунтовому розчині переважає аніон H_2PO_4^- (Furihata et. al., 1990).

Аніони PO_4^{3-} не мають практичного значення для рослин. Це пов'язано з низькою розчинністю карбонатів кальцію та магнію – $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, яка є мінімальною і становить 0,33 мг Р в 1 л [12]. У разі висихання частина дигідро- і гідрофосфат-іонів переходить в фосфати кальцію та магнію і рівновага порушується, а під час зволоження ґрунту, навпаки, відбувається перехід в розчин додаткової кількості фосфат-іонів і рівновага відновлюється. Слід відмітити, що в чорноземах звичайних фіксація аніонів фосфору в основному проходить в результаті їх хімічного зв'язування катіонами кальцію, магнію та алюмінію [10].

За даними агрохімічного обстеження ґрунтів вміст фосфору в них на 1966–1970 рр. у середньому в Україні становив 7,1 мг/100 г ґрунту. Слід відмітити, що за вмістом фосфору ґрунтовий покрив відзначається більшою строкатістю порівняно з азотом. Це зумовлено, насамперед, властивостями лесових ґрунтоутворюючих порід та регіональними особливостями ґрунтоутворення, а також рівнем інтенсивності землеробства [14].

За період 1966–1990 рр. обсяги застосування фосфорних добрив постійно зростали. Загальний баланс фосфору в 1971–1975 рр. був позитивним (+3,9 кг/га P_2O_5), у наступні періоди (1976–1980 рр.) +10,1 кг/га; 1981–1985 рр. – +15 кг/га; 1986–1990 рр. – +20,6 кг/га P_2O_5 . За даними агрохімічного обстеження (1991–1995 рр.) площі орних земель з підвищеним і високим вмістом фосфору зростали, а з низьким та середнім вмістом залишалися, порівняно з першим туром обстеження (1966–1970 рр.) на рівні 30 %. Середньозважений вміст рухомого фосфору в Степу зріс з 6,7 до 9,3 мг на 100 г ґрунту [8].

Починаючи з 1991 року, рівень внесення фосфорних добрив різко зменшується і в 1997 році дорівнював 4,1 кг/га P_2O_5 . Дефіцит мінерального фосфору щорічно становить 15–20 кг/га, що зумовлює зниження вмісту фосфору у ґрунті на 0,4–0,5 мг/100 г ґрунту. Це поступово погіршує фосфатний режим чорноземів звичайних. Найнижчу кількість фосфорних добрив було внесено в 2000 році – всього лише 2 кг/га P_2O_5 . В 2001 та 2002 роках також було внесено невелику кількість цих добрив – 3 кг/га P_2O_5 [6].

Поступове нарощування кількості внесених

фосфорних добрив розпочалося з 2004 року – 4 кг/га, аналогічну кількість було внесено в 2005 році. В 2006 році їх уже було внесено 7 кг/га P_2O_5 , в 2007 р. – 10 кг/га P_2O_5 . З 2008 року знову почала спостерігатись тенденція до зменшення обсягів їх внесення, спочатку до 9 кг/га, а потім, в 2009 та 2010 роках – до 7 кг/га P_2O_5 . Таке тривале внесення невеликих обсягів фосфорних добрив викликало поступове погіршення фосфатного режиму цих ґрунтів. Згідно з розробленим прогнозом, за повного припинення застосування фосфорних добрив вміст фосфору в ґрунтах знизиться на 3,0–3,2 мг/100 г ґрунту, а за таких умов господарювання ґрунти повністю втратять ту кількість фосфору, яка ними була накопичена за роки інтенсивної хімізації [12].

Слід відмітити, що в великих обсягах фосфорні добрива вносять в ґрунт лише економічно розвинуті країни, такі як Японія, США, Великобританія, Німеччина, Франція, Данія, Італія, Китай, які постійно нарощують обсяги їх внесення. Причому в Німеччині навіть виникає проблема зафосфачування ґрунтів. Тому на думку окремих авторів, у разі збереження цієї тенденції й надалі, запаси фосфору на Земній кулі можуть бути вичерпані вже через 60–80 років (Hammond et al., 2003) і глобальний пік використання запасів фосфатної сировини за прогнозами деяких дослідників (Jasinski, 2006) буде припадати на 2040 рік [5]. У більшості ж країн світу, зокрема і в Україні, дози внесення цих добрив невисокі й внесення фосфору з ґрунту отриманими врожайми сільськогосподарських культур переважає його надходження з туками. У зв'язку з тим, щоб прослідкувати за змінами, які відбулися з рухомими формами фосфору та порівняти ступінь їх рухомості в чорноземах звичайних на ріллі по відношенню до цілини й виникла необхідність в проведенні досліджень.

Мета дослідження: встановити залежності зміни вмісту рухомого фосфору в генетичних горизонтах чорнозему звичайного.

Завдання дослідження:

1. Визначити природу штучного завищення оцінки фосфатного стану ґрунту.
2. Уточнити існуючі методики діагностики фосфатного стану ґрунту.
3. Встановити динаміку формування основної джерела розчинних фосфатів у ґрунті.

Методика проведення досліджень. Виконання науково-дослідної роботи проводили на Ерастівській дослідній станції ДУ Інституту сільського господарства степової зони НААН України, де ґрунти – чорноземи звичайні мало-

гумусні важкосуглинкові на лесі. В орному шарі ґрунту гумусу міститься 3,8–4,1 % (метод Тюрина), валового азоту 0,22–0,23, фосфору 0,12–0,13, калію 2,0–2,1 %. Рівень нітратного азоту після 7-денного компостування змінювався від 31 до 52 мг/кг ґрунту. Рухомого фосфору (за Чириковим) 110–112 мг/кг, рухомого калію 105–130 мг/кг. Реакція ґрунтового розчину нейтральна ($\text{pH}_{\text{водн.}} = 7,0$) [13].

Для визначення змін, які відбулися з рухомими формами фосфору в чорноземах звичайних під впливом тривалого їх використання в сільськогосподарському виробництві, було зроблено два ґрунтових розрізи глибиною 2 м, шириною 3 м і довжиною 6 м кожний: перший на цілині ділянці поблизу села Байківка П'ятихатського району Дніпропетровської області, а другий – на ріллі на відстані 300 м від першого. Розпочинаючи з верхньої частини розрізів через кожні 5 см по всій глибині відбирали зразки ґрунту для визначення вмісту в них рухомих форм фосфору, вміст якого визначали за кислотним методом Чирикова (ГОСТ 26204-91) і сольовим методом Карпінського-Зам'яїної (ДСТУ 4727:2007) [1, 2]. Визначення оптичної густини розчинів проводили на фотоелектро-колориметрі КФК-2. Мікробіологічні дослідження зразків ґрунту проведені за загальноприйнятими методиками. Аналізи виконували в трьохкратному аналітичному повторенні.

Результати досліджень. Рілля, яка становить 53,8 % території України, належить до найбільш нестійких ландшафтів, а недотримання чергування сільськогосподарських культур під час їх вирощування, порушення сівозмін, засилля монокультури та різке зменшення обсягів внесення мінеральних і органічних добрив посилюють агрохімічну нестабільність агроландшафтів. Недотримання науково-обґрунтованих зональних систем землеробства, порушення екологічно допустимого співвідношення посівів сільськогосподарських культур призводять до дефіциту в ґрунті рухомих форм поживних речовин, збільшують площі деградованих земель і породжують екологічні проблеми [4].

Під час роздержавлення та перерозподілу земель порушилися сівозміни. Згідно з показниками Держкомстату України посівні площі основних сільськогосподарських культур в Україні за 1990–2010 роки зменшилися більш ніж на 7,1 млн га і становлять 24,6 млн га. Водночас посіви зернових і зернобобових культур залишаються на рівні 15 млн га (61 %), проте посіви

соняшнику невпинно збільшуються і становлять 4,57 млн га, або 19 % загальної площі посівів. Площа посівів ріпаку щорічно змінюється, але сягає 1,2–1,7 млн га (5–7 %), а посіви кормових культур зменшилися на 9,4 млн га і на їхню частку припадає лише 10,5 %.

В Україні провідними науковими установами для кожного природно-сільськогосподарського регіону прийняті нормативи оптимального співвідношення культур у сівозмінах, а також терміни повернення окремих культур у сівозміні. Тільки у степових регіонах насичення соняшнику у сівозміні допускається 10–15 %, а ріпаку 5–12 %. Зіставлення фактичних і нормативних показників співвідношення культур свідчить про масове недотримання сільськогосподарськими підприємствами науково обґрунтованих сівозмін або, навіть, їх відсутність. Посіви ж кон'юктурних культур призводять до виснаження ґрунтів, утворення малопродуктивних земель і, в кінцевому підсумку, до їхньої деградації. Площа таких земель щороку збільшується і вже зараз налічує понад 1,4 млн га. Усе це свідчить про неефективне використання земель і відсутність надійної охорони останніх у сільськогосподарських підприємствах [3].

У даній статті наведені зміни, які відбулися з рухомими формами фосфору в чорноземах звичайних на ріллі по відношенню до цілини. Об'єктивно оцінити стан та встановити напрям трансформації сучасних еволюційних змін фосфорного режиму чорнозему звичайного дає змогу порівняння цілинних та орних земель за вмістом рухомих форм фосфору, визначених за різними методами в зразках ґрунту відібраних через кожні 5 см на всю глибину ґрунтових профілів на цілині та ріллі.

Джерелом надходження фосфору на цілині є відмерлі частини рослин, а на ріллі – добрива та пожнивно-кореневі залишки. Проблема загострюється ще й безповоротністю втрат фосфору, обумовленою виносом цього елемента з ґрунту рослинами, оскільки накопичення його переважає в зерні, а не у вегетативній масі, яка після збирання врожаю в процесі мікробіологічного розкладу поповнює запаси недоступних для рослин елементів. На ріллі основна маса фосфору вилучається з ґрунту разом з зерном, яке щорічно вивозиться з полів.

У зерні зосереджена основна кількість фосфору (0,65–0,85 %), яка майже в три-чотири рази перевищує його вміст в листостебловій масі (0,20–0,28 %) (табл. 1).

СІЛЬСЬКЕ ГОСПОДАРСТВО. РОСЛИННИЦТВО

1. Порівняльна оцінка вмісту валового фосфору в основній та побічній продукції основних сільськогосподарських культур

Сільськогосподарська культура	Середній вміст фосфору в сухій речовині в (%)	
	зерні	листочкової масі
пшениця озима	0,85	0,20
жито озиме	0,86	0,25
кукурудза	0,57	0,30
ячмінь ярий	0,85	0,20
овес	0,85	0,35
просо	0,65	0,18
сорго	0,67	0,35
горох	1,0	0,35
соя	1,04	0,31
соняшник	1,39	0,65
ріпак	1,8	0,25

Тому залишена на полі вся листостеблова маса не в змозі в повній мірі компенсувати винесеного з врожаєм зерна фосфору. Для того, щоб у ґрунті не виникав від'ємний баланс фосфору, в нього потрібно повертати цей важливий елемент мінерального живлення разом з фосфоровмісними добривами. Тому забезпечення ґрунту фосфором у даний час може здійснюватись в основному лише за рахунок внесення фосфорних добрив.

За останні 25 років кількість внесеного фосфору на 1 га посівної площі знизилась із 40 кг діючої речовини до 3–4, азоту – з 60 до 5–15, калію – з 35 до 1–2 кг діючої речовини. В останні десятиліття виробництво фосфорних добрив в Україні різко скоротилося (Щегров, 2001), зокрема у 2005 році знизилося на 22,9 %, що і призвело до різкого падіння рівня застосування мінеральних фосфорних добрив. Така ситуація пов'язана з їхньою високою вартістю, зумовленою зростанням цін на енергоносії і обмеженістю джерел власної фосфатної сировини для їхнього виробництва.

Одним зі шляхів вирішення проблеми фосфорного живлення є широке використання фосфоритів місцевих родовищ. Україна має значну кількість родовищ фосфоритів (Волинська, Ізюмсько-Донецька групи родовищ та інші), поклади яких приурочені до відкладів нижнього кембрію, верхньої крейди та палеогену. В західному Поліссі вже розвідано родовища зернистих та жовтових фосфоритів у складі агроруди, поклади якої залягають від 10 до 20 м, іноді ближче до поверхні [17]. Але через невисоку концентрацію в них P_2O_5 ці фосфорити не переробляються на суперфосфат та інші водороз-

чинні фосфорні добрива і тому для виробництва фосфорних добрив в основному використовується імпортована сировина, що обумовлює високу їх вартість.

У більшості ж випадків українські фосфорити містять у своєму складі до 5 % P_2O_5 або 12–15 % фосфоритнокальцієвих мінералів та фосфатизованих їх порід і тому потребують проведення додаткового їх збагачення після проведення якого буде суттєво зростати вартість фосфорних добрив. У зв'язку з цим ці фосфорити використовують лише на кислих ґрунтах Полісся та Карпат і на слабокислих ґрунтах лісостепової зони: у кислому середовищі слабодисоційні фосфати легко розчиняються [15].

На ґрунтах з нейтральною реакцією ґрунтового розчину фосфати практично не засвоюються корінням рослин і їх там практично не застосовують. На цих ґрунтах слід надати перевагу водорозчинним тукам.

Враховуючи порушення паритету цін на сільськогосподарську продукцію й добрива, обсяги внесення фосфорних добрив в нашій державі невисокі. В основному їх вносять під час сівби в невеликій дозі P_{10} . Зважаючи на невисоку природну забезпеченість більшості ґрунтів рухомими сполуками фосфору, спостерігається різке падіння ефективної родючості ґрунтів, погіршується режим фосфорного живлення рослин, що в результаті призводить до зниження врожайності сільськогосподарських культур.

Порівняльний аналіз вмісту рухомого фосфору в цих двох ґрунтових профілях переконливо показав їх накопичення в верхніх шарах ґрунту в порівнянні з розташованими глибше. Це, перш за все, пов'язано з біологічною акумуляцією фосфо-

СІЛЬСЬКЕ ГОСПОДАРСТВО. РОСЛИННИЦТВО

ру кореневими системами рослин. Така біологічна акумуляція проходить у результаті діяльності коренів рослин, які за рахунок своїх ексудатів розчиняють фосфати кальцію і магнію, переводячи їх в гідро- та дигідрофосфати і нагромаджують цей елемент мінерального живлення в поверхневих горизонтах ґрунту.

Аніон PO_4^{3-} в ґрунті міститься в органічних комплексах (нуклеопротейди, фосфатиди) і в різних співвідношеннях з катіонами Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} . Ці фосфати в різній мірі доступні кореням рослин. Зміни вмісту загального фосфору у ґрунті на цілиних та орних ділянках притаманні лише верхньому (0–10 см) шару – 0,164 і 0,148 %. Починаючи з шару ґрунту 10–20 см та глибше по профілю, його запаси знаходились на одному рівні. Тому в своїх дослідженнях основна наша увага зосереджена на рухомих формах фосфору, які в більшості випадках є лімітуючим фактором для росту, розвитку рослин та формування урожайності сільськогосподарських культур.

Мобілізація фосфору з важкорозчинних природних сполук відбувається переважно під дією продуктів метаболізму мікроорганізмів. Особливого значення набувають бактерії, що мають потенційну здатність перетворювати важкорозчин-

ні фосфати ґрунту у доступну для рослин форму. Важливе місце серед них посідають ґрунтові бактерії *Rhizobium radiobacter*, які окрім фосфатмобілізуючої активності здатні ще й до асоціативної азотфіксації (Муромцев Г. С. та ін., 1985; Павлов В. Ф., 1987; Чумаков М. І., 1992; Панюта О. А., Белавя В. Н., Токмакова Л. Н., 2011).

Відомо, що одним із чинників розчинення важкорозчинних мінеральних фосфатів є підкислення ґрунтового розчину, а гідроліз орґанофосфатів, за впливу бактерій, пов'язаний з дією специфічних ферментів – фосфатаз. Вченими (Токмакова Л. М. та Трепач А. О., 2012) встановлено, що бактерії *R. radiobacter* активними продуцентами ацетатної, масляної та інших органічних кислот, під впливом яких проходить переведення в ґрунтовий розчин слабкорозчинних фосфатів кальцію та магнію.

Встановлено, що фосфатозна активність бактерій становить від 0,17 P_2O_5 кмоль/мл/год. (*R. Radiobacter* 5005) до 2,35 P_2O_5 кмоль/мл/год. (*R. Radiobacter* 5006).

Проведені нами дослідження показали, що найвищою чисельністю фосфатмобілізуючих бактерій характеризується верхній гумусовий горизонт цілині (табл. 2).

2. Чисельність фосфатмобілізуючих бактерій у зразках ґрунту відібраних у ґрунтовому розрізі на цілині та ріллі чорнозему звичайного (околиця с. Байківка Пятихатського району Дніпропетровської області)

Шари ґрунту, см	Фосфатмобілізувальні бактерії, млн/г	
	що розчиняють	
	мінеральні фосфати	орґанофосфати
Рілля		
0–5	1,5 ± 0,1	5,4 ± 0,4
5–10	1,3 ± 0,1	2,3 ± 0,1
10–15	1,3 ± 0,1	2,7 ± 0,2
15–25	2,2 ± 0,2	2,4 ± 0,2
25–35	1,2 ± 0,1	4,5 ± 0,3
35–45	1,4 ± 0,1	1,0 ± 0,0
45–65	0,6 ± 0,1	1,0 ± 0,1
Цілина		
0–5	6,8 ± 0,3	9,8 ± 0,6
5–10	2,5 ± 0,2	4,7 ± 0,4
10–15	2,2 ± 0,1	2,2 ± 0,2
15–25	1,5 ± 0,1	2,0 ± 0,1
25–35	1,2 ± 0,1	2,5 ± 0,3
35–45	0,8 ± 0,1	1,2 ± 0,1
45–65	1,2 ± 0,2	0,9 ± 0,0

СІЛЬСЬКЕ ГОСПОДАРСТВО. РОСЛИННИЦТВО

3. Вміст рухомого фосфору в різних ценозах чорнозему звичайного за даними кислотного та сольового методів

Шари ґрунту, см	Вміст рухомого фосфору за Чириковим (мг P ₂ O ₅ /кг ґрунту)		Вміст рухомого фосфору за Карпінським-Зам'ятіною (мг P ₂ O ₅ /л)	
	рілля	цілина	рілля	цілина
0-5	167	163	0,19	0,14
6-10	167	112	0,18	0,13
11-15	169	92	0,18	0,10
16-20	168	96	0,17	0,09
21-25	172	88	0,14	0,09
26-30	164	83	0,19	0,08
31-35	137	80	0,15	0,04
36-40	112	78	0,11	0,04
41-45	92	77	0,11	0,09
46-50	94	75	0,11	0,09
51-55	107	64	0,10	0,06
56-60	54	79	0,10	0,12
61-65	53	88	0,08	0,10
66-70	59	53	0,07	0,09
71-75	53	58	0,11	0,07
76-80	62	39	0,10	0,07
81-85	56	41	0,10	0,11
86-90	54	36	0,10	0,10
91-95	50	35	0,12	0,08
96-100	51	34	0,12	0,07
101-105	50	34	0,11	0,11
106-110	50	35	0,10	0,11
111-115	50	38	0,13	0,11
116-120	48	38	0,12	0,12
121-125	48	39	0,12	0,12
126-130	48	39	0,11	0,11
131-135	49	39	0,11	0,10
136-140	51	40	0,12	0,10
141-145	52	40	0,12	0,11
146-150	49	41	0,13	0,10
151-155	50	40	0,12	0,10
156-160	53	40	0,12	0,10
161-165	57	40	0,11	0,08
166-170	62	42	0,13	0,08
171-175	73	42	0,13	0,07
176-180	77	44	0,12	0,06
181-185	69	45	0,12	0,06
186-190	73	48	0,13	0,10
191-195	74	52	0,13	0,10
196-200	78	55	0,13	0,09

СІЛЬСЬКЕ ГОСПОДАРСТВО. РОСЛИННИЦТВО

4. Фосфатний стан орного шару неудобрених чорноземів звичайних важкого гранулометричного складу Північного Степу України

Вміст P ₂ O ₅ за:						
Р вал., мг/кг	Чириковим, мг/кг	Карпінським- Зам'ятіною, мг/л	Chang, Jackson			
			Р пухкий, мг/кг	Al-P, мг/кг	Fe-P, мг/кг	Ca-P мг/кг
1060	107	0,06	4,7	55	78	245
1230	89	0,03	5,0	37	8	250
1330	103	0,05	2,3	42	49	170
1370	115	0,06	3,0	64	12	276
-	126	0,05	5,2	31	72	304
1430	91	0,05	5,5	30	73	358
1550	113	0,06	6,0	62	106	367
-	106	0,04	2,8	50	68	221

4. Вплив компостування на вміст P₂O₅ у зразках ґрунту, відібраних на цілині та староорній ділянці поля (мг/100 г ґрунту; середнє з трьох повторень)

Шари ґрунту, см	Методи визначення P ₂ O ₅ , мг/100 г ґрунту							
	Чирикова				Карпінського-Зам'ятіної			
	до ком- пос- туван- ня	після 10-денного компос- тування	після 20-денного компос- тування	після 30-денного компос- тування	до ком- пос- туван- ня	після 10-денного компос- тування	після 20-денного компос- тування	після 30- денного компос- тування
цілинна ділянка поля								
0-5	16,3	22,3	22,6	22,0	0,14	0,52	0,40	0,33
6-10	11,2	19,0	22,3	21,7	0,13	0,50	0,29	0,34
11-15	9,2	14,4	20,7	19,2	0,10	0,50	0,26	0,30
16-20	9,6	17,0	19,7	18,8	0,09	0,46	0,23	0,27
21-25	8,8	17,7	19,2	18,4	0,09	0,48	0,24	0,24
26-30	8,3	18,0	18,6	18,0	0,08	0,38	0,22	0,24
староорна ділянка поля								
0-5	16,7	22,9	25,9	27,7	0,19	0,58	0,32	0,35
6-10	16,7	18,3	26,7	28,9	0,18	0,56	0,31	0,34
11-15	16,9	22,6	26,2	27,9	0,18	0,50	0,31	0,32
16-20	16,8	22,9	25,9	27,7	0,17	0,62	0,30	0,29
21-25	17,2	23,6	25,5	27,4	0,14	0,54	0,29	0,26
26-30	16,4	24,7	25,3	26,2	0,19	0,52	0,31	0,25

Поряд з цим слід відзначити, що за внесення в ґрунт високих доз азотних добрив відбувається підкислення ґрунтового розчину та зростає ступінь рухомості фосфатів. Вивчення фосфатного стану чорнозему звичайного показало наступне: згідно з даними нормативного документа колишнього СРСР (метод Чирикова), верхні горизонти, як агро- так і біогеоценозу характеризуються високою забезпеченістю фосфором – відповідно 167 і 163 мг P₂O₅/кг ґрунту (табл. 2).

Аналіз ґрунтів, проведений за національним

стандартом України (метод Карпінського-Зам'ятіної) показав, що дана оцінка родючості ґрунтів є хибною і ці ценози характеризуються лише середньою забезпеченістю фосфором. Це пояснюють добре відомі емпіричні дані про високу ефективність фосфорних добрив на чорноземних ґрунтах.

Розбіжність в оцінці фосфатного стану пояснюється наступним: раніше проведеними дослідженнями було встановлено, що чорноземи важко-суглинкового і глинистого гранулометричного

складу на лесових породах містять підвищену або високу кількість апатитоподібних сполук фосфору – понад 200 мг P_2O_5 / кг (фракція Са-Р, метод Chang, Jackson) (табл. 3).

Фосфор, що міститься в цих мінералах, рослинам безпосередньо не доступний, але частково екстрагується розчинами сильних кислот, у тому числі 0,5 н оцтовою кислотою (метод Чирикова), саме це і призводить до істотного завищення оцінки фосфатного стану ґрунтів.

Використання стандарту України показує, що реальний природний вміст рухомого фосфору в цих ґрунтах відповідає, так званому, рівню динамічної рівноваги, тобто 0,04–0,06 мг/л (табл. 4). Згідно з вимогами нормативних документів України, вміст рухомого фосфору в ґрунтах зони Степу слід визначати одним з трьох методів: Карпінського-Зам'ятіної, Мачигіна (ДСТУ 4114) або Olsen (ДСТУ ISO 11263). Вміст рухомого фосфору у досліджуваних ценозах чорнозему звичайного дещо вище рівня динамічної рівноваги фосфатних систем ґрунтів – 0,17–0,19 мг P_2O_5 /л у ріллі і 0,13–0,14 мг P_2O_5 /л в шарі 10 см цілини (табл. 2). Для ріллі дане підвищення пояснюється наявністю залишкових фосфатів добрив. Тобто цей ґрунт є малодобреним.

Що стосується цілини, то можна відмити наступне: завдяки комплексу біохімічних, хімічних, фізико-хімічних і інших процесів, характерних для верхнього гумусового горизонту цілинних і перелогових ґрунтів їх фосфатні системи характеризуються підвищеною кількістю вільної енергії. Безумовно, основним джерелом цієї енергії, що компенсує виробіток ентропії під час біологічних і хімічних процесів, є органічна речовина. Дані сполуки нейтралізують позитивні заряди на поверхні глинистих мінералів, зв'язують активні катіони заліза, алюмінію і блокують фіксацію аніонів фосфорної кислоти.

Тому цей горизонт даних біогеоценозів характеризується, як правило, підвищеною, або високою забезпеченістю фосфором.

Фосфатний стан нижніх горизонтів обох ценозів практично однаковий і відповідає рівню динамічної рівноваги. Наявність більш високого вмісту рухомого фосфору в окремих шарах ґрунту (0,10–0,12 мг P_2O_5 /л) створюється за рахунок наявності карбонатів кальцію. Внаслідок появи цих сполук нейтральне значення сольової витяжки (рН–5,8) зсувається в лужну сторону, що підвищує її екстрагуючу здатність.

Вміст рухомих форм фосфору в ґрунті залежить від багатьох факторів у тому числі і від рівня його зволоження, що пов'язано з різною ак-

тивністю біоти. Так, у разі підсихання ґрунту вміст рухомих форм фосфору зменшується, а після зволоження спостерігається тенденція до його зростання. Ця закономірність досить часто спостерігається в посушливі роки, коли під час висихання ґрунту, доступність фосфору знижується через швидке формування нерозчинних комплексів аніонів (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$) із катіонами (СаО, Fe, Al та інші) (Abel et. al., 2002; Bolland, Gilkes, 1998) та за рахунок включення його в органічні сполуки мікроорганізмами (Marschner et. al., 2005, 2004).

Тому коефіцієнт використання фосфору із мінеральних добрив навіть за достатнього його внесення становить лише 10–20 %, тоді, як азоту – до 50 %, калію – до 70 % (Vance, 2001). Низька температура ґрунту (<10 °С) спричинює нестачу фосфору для рослин навіть за високого їх вмісту в валовій формі.

За низької температури підвищується в'язкість ґрунтового розчину і знижується інтенсивність його поглинання з ґрунтового розчину кореневою системою рослин. Підвищення температури в ґрунтовому розчині на 1–2 °С призводить до збільшення вмісту фосфору в ґрунтовому розчині на 2 %. За нестачі вологи засвоєння фосфору з ґрунту уповільнюється.

Для того, щоб простежити за нагромадженням рухомого фосфору, нами були створені сприятливі умови щодо зволоження 60 % від повної вологемкості і сприятливий температурний режим 28,5 °С.

За таких умов проводилось компостування в термостаті ґрунтових зразків, відібраних з різних генетичних горизонтів.

У цих зразках через 10, 20 та 30 діб проводилось визначення рухомих форм фосфору за методом Чирикова, а ступінь їх рухомості визначалась за методом Карпінського-Зам'ятіної. Виконані дослідження показали, що найбільш інтенсивно відбувалось накопичення рухомих форм фосфору в перші 10 діб, в меншій мірі – через 20 діб, а після 30-ти діб компостування спостерігалась тенденція до зменшення вмісту в ґрунті вищеназваних форм фосфору (табл. 4).

Для більш інформаційного аналізу процесів трансформування показників фосфорного балансу у чорноземах на ріллі необхідно залучити такий інтенсивний показник, як фосфатний потенціал. Фосфатний потенціал можливо виразити з розчинності монокальційфосфату у рівноважному розчині гетерогенної системи: тверда фаза – ґрунтовий розчин.

Додаток розчинності монокальційфосфату має

вираз:

$$DP(Ca(H_2PO_4)_2) = a_{Ca^{2+}} \cdot a_{H_2PO_4^-}^2, \quad (1)$$

де $a_{Ca^{2+}}, a_{H_2PO_4^-}$ – концентрація (активність)

іонів кальцію та залишку ортофосфорної кислоти. Рівняння (1) після знаходження квадратного кореня та логарифмування має вигляд:

$$\lg \sqrt{DP_{Ca(H_2PO_4)_2}} = 0,5 \cdot \lg a_{Ca^{2+}} + \lg a_{H_2PO_4^-} \quad (2)$$

Якщо прийняти $-\lg a_{Ca^{2+}} = pCa$, $-\lg a_{H_2PO_4^-} = pH_2PO_4$, то праву частину рівняння (2) можливо виразити як:

$$0,5 pCa + pH_2PO_4 \quad (3)$$

Сума (3) має назву фосфатного потенціалу, тобто виражає здатність до розчинення монокальційфосфату $Ca(H_2PO_4)_2$.

Застосовуючи рівняння (3), можливо порівняти значення експериментально здобутих показників pH_2PO_4 реальних ґрунтових розчинів з показниками фосфатного потенціалу.

Якщо значення pH_2PO_4 знайдених показників будуть більше відповідного показника фосфатного потенціалу, то динамічна рівновага $H_2PO_4^-$ у ґрунтовому розчині формується більш важкорозчинною сполукою ортофосфорної кислоти, ніж монокальційфосфат.

Для розрахунків значень pH_2PO_4 у ґрунтовому розчині розроблена відповідна схема, яка основана на побудові регресійної залежності pH_2PO_4 від значень, сформованих рН у ґрунтовій витяжці 0,01 МСаСl₂.

Для побудови діаграм розчинності залучили низку достатньо апробованих регресійних рівнянь (по Ліндсею і Морено):

$$\text{Гідроксилапатит } pH_2PO_4 = 2,33 \text{ рН} - 8,25$$

$$\text{Варієцит } pH_2PO_4 = 10,7 - \text{рН} \quad (4)$$

$$\text{Октокальційфосфат } pH_2PO_4 = 1,67 \text{ рН} - 6,24$$

$$\text{Штрентгіт } pH_2PO_4 = 10,9 - \text{рН}$$

$$\text{Фторапатит } pH_2PO_4 = 2\text{рН} - 4,12$$

$$\text{Дикальційфосфат } pH_2PO_4 = \text{рН} - 2,54$$

Прикладом принципів, які покладено в основу формування рівнянь (4), можуть бути розрахунки щодо дикальційфосфату. Для цього необхідно залучити поняття додатку розчинності:

$$DP(CaHPO_4 \cdot 2H_2O) = a_{Ca^{2+}} \cdot a_{HPO_4^-} \cdot a_{H_2O}^2 \quad (5)$$

Молекулярна маса цієї сполуки становить 172, в тому числі Са – 24 %, HPO_4 – 56 %, H_2O – 21 %.

У 100 мл розчинника повністю розчиняється

20 мг дикальційфосфату, що відповідає молярному складу: Са – $4,65 \cdot 10^{-3}$ моль; HPO_4 – $1,12 \cdot 10^{-2}$ моль; H_2O – $4,19 \cdot 10^{-3}$ моль.

Значення в цілому додатка у рівнянні (5) становить $2,17 \cdot 10^{-7}$. Значення

$$p(CaHPO_4 \cdot 2H_2O) = -\lg(2,17 \cdot 10^{-7}) = 6,66$$

З іншого боку,

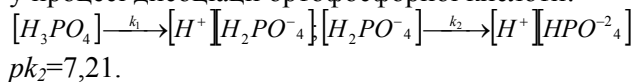
$$p(CaHPO_4) = pCa + p(HPO_4) = 6,66. \quad \text{Залучивши константу рівноваги:}$$

Залучивши константу рівноваги:

$$k_2 = \frac{[H^+][HPO_4^{-2}]}{[H_2PO_4^-]} \quad (7),$$

отримуємо $p(HPO_4) = p(HPO_4) - \text{рН} + \text{pk}_2$, де

k_2 – це друга за рахунком константа рівноваги у процесі дисоціації ортофосфорної кислоти:



$\text{pk}_2 = 7,21$.

$pCa^{2+} = 2$ для 0,01 МСаСl₂.

Залучивши вираз pPO_4 з (7) до (6) з урахуванням pk_2 , отримаємо рівняння:

$$pH_2PO_4 = \text{рН} - 2,54. \quad (8)$$

У наших дослідженнях була застосована відповідна схема:

– 4 г ґрунтової наважки заливали 100 мл 0,01 М розчину СаСl₂,

– за допомогою НСl формували шість значень рН у кожній з витяжок відповідного горизонту 0–30,0 см, 50–70 см,

– після 1 години екстрагування на ротаторі визначали вміст фосфору у фільтраті у перерахунку на Р₂О₅ та H_2PO_4 ,

– згідно з рівнянням (3) розраховували значення $pH_2PO_4 = -\lg a_{H_2PO_4^-}$ і будували графічний вираз залежності ($P(H_2PO_4) = f(\text{рН})$). Регресійну формулу співвідносили з переліком (4). На рисунках 1–4 наведені результати графічних побудов.

Таким чином, дослідження, проведені з використанням сучасних методів ґрунтової діагностики показали, що реальна природна забезпеченість фосфором чорноземів звичайних Північного Степу України є невисокою, що лімітує отримання високих урожаїв сільськогосподарських культур.

Внаслідок цього дані ґрунти так само потребують внесення фосфорних добрив, як і інші ґрунти України.

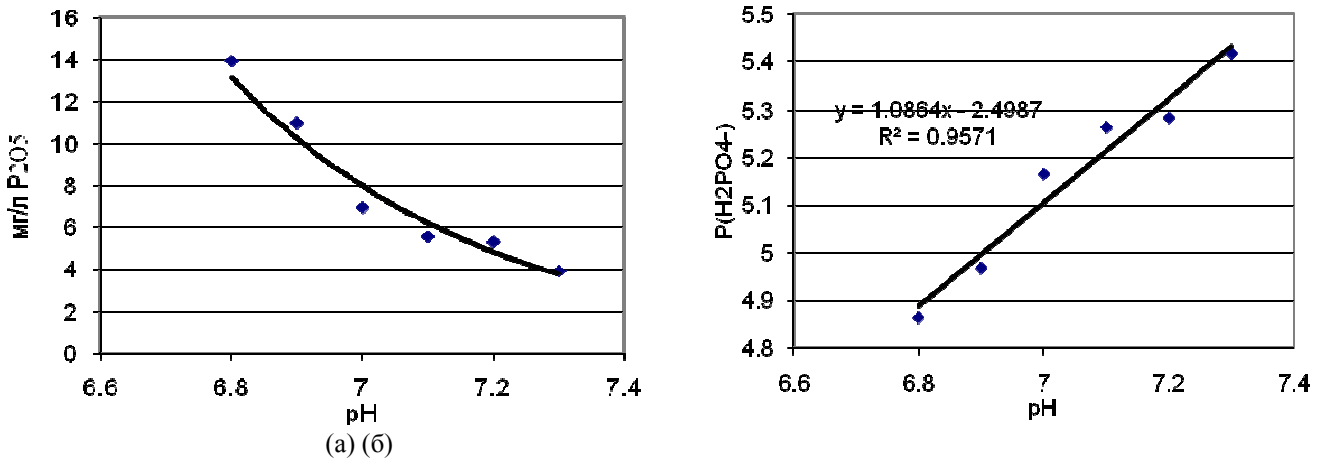


Рис. 1. Концентраційні залежності вмісту фосфатів у шарі ґрунту 0–30 см у рівноважному ґрунтовому розчині чорноземів звичайних на ріллі:

а – залежність вмісту P_2O_5 від значень рН;
б – залежність значень $P(H_2PO_4^-)$ відповідних витяжок від рН

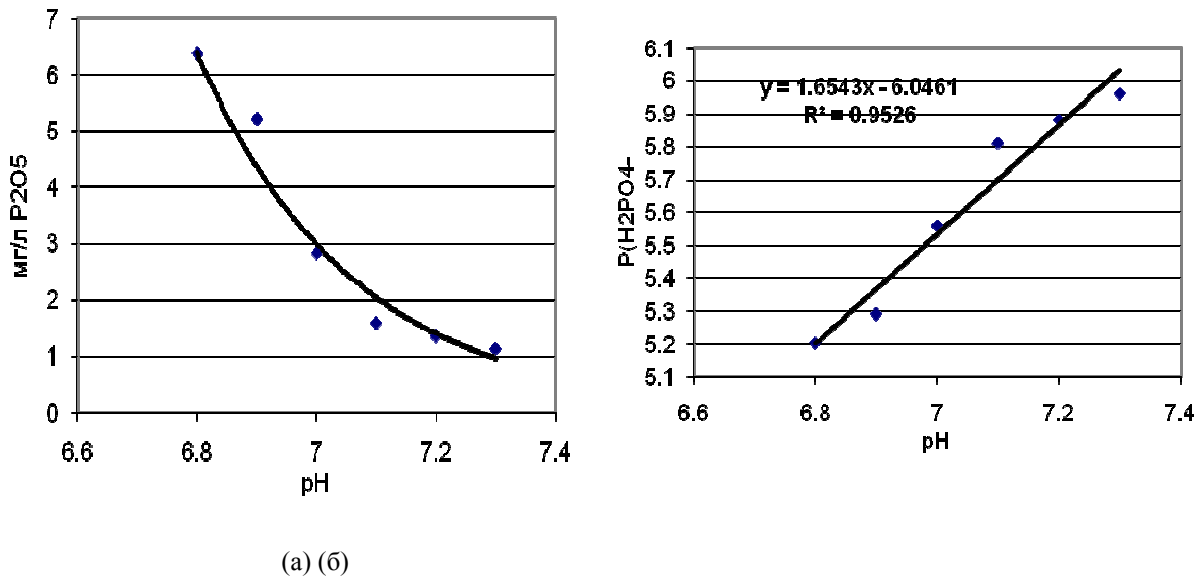
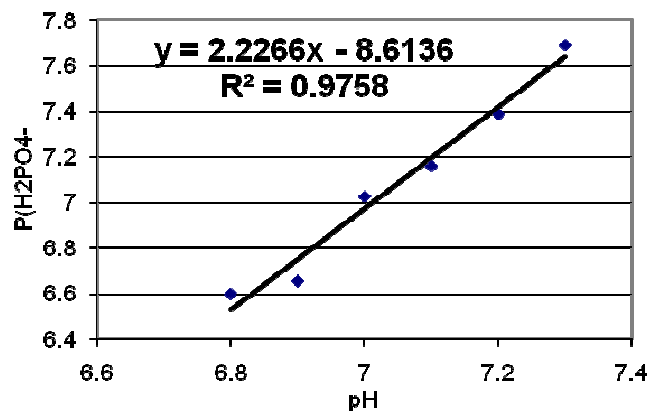
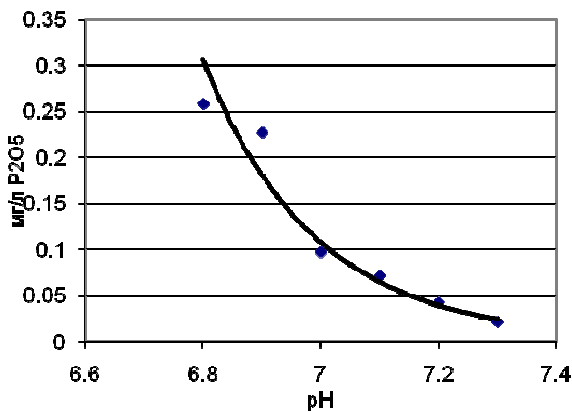


Рис. 2. Концентраційні залежності вмісту фосфатів у шарі ґрунту 0–30 см у рівноважному ґрунтовому розчині чорноземів звичайних на цілині:

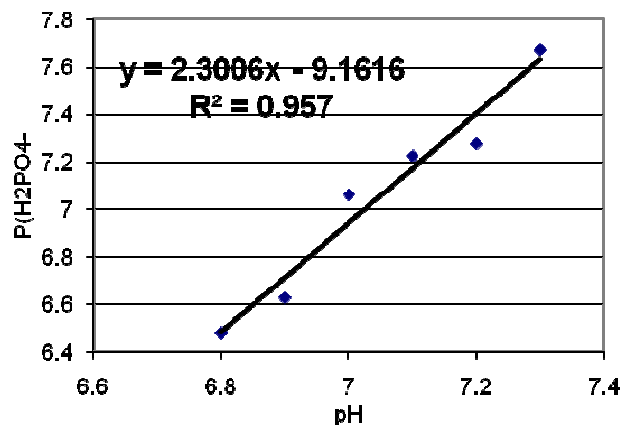
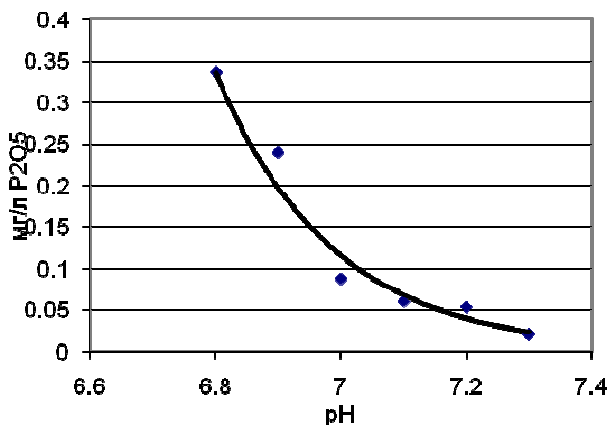
а – залежність вмісту P_2O_5 від значень рН;
б – залежність значень $P(H_2PO_4^-)$ відповідних витяжок від рН.



(а) (б)

Рис. 3. Концентраційні залежності вмісту фосфатів у шарі ґрунту 50–70 см у рівноважному ґрунтовому розчині чорноземів звичайних на ріллі:

а – залежність вмісту P₂O₅ від значень рН;
б – залежність значень рН₂РO₄ відповідних витяжок від рН.



(а) (б)

Рис. 4. Концентраційні залежності вмісту фосфатів у рівноважному ґрунтовому розчині в шарі ґрунту 50–70 см чорноземів звичайних на цілині:

а – залежність вмісту P₂O₅ від значень рН;
б – залежність значень рН₂РO₄ відповідних витяжок від рН.

Точна інформація про трофічний стан ґрунтів, перш за все щодо макроелементів живлення рослин та динаміку їх родючості дає змогу без істотних додаткових витрат більш ефективно використовувати добрива, підвищувати врожаї сільськогосподарських культур і якість одержуваної продукції.

Висновки:

1. Чорноземи звичайні на лесових породах

важкого гранулометричного складу Північного Степу України містять підвищену кількість апатитоподібних сполук. Внаслідок цього використання будь-яких кислотних методів, у тому числі ГОСТ 26204-91 (метод Чирикова) призводить до істотного штучного завищення оцінки фосфатного стану ґрунтів (на 40–80 мг P₂O₅/кг ґрунту).

2. Для діагностики фосфатного стану даних ґрунтів, згідно з вимогами нормативних докуме-

нтів України, слід використовувати наступні стандарти: ДСТУ 4114 (метод Мачігіна), ДСТУ 4727 (метод Карпінського-Зам'ятіної) і ДСТУ ISO 11263 (метод Olsen).

3. Реальна природна забезпеченість орного шару чорноземів звичайних фосфором відповідає межі низької і середньої забезпеченості цим елементом живлення рослин, що підтверджується відомими емпіричними даними про високу ефективність фосфорних добрив на цих ґрунтах.

4. Підвищеною або високою забезпеченістю фосфором характеризується лише орний шар ґрунтів, що містить залишкові фосфати добрив, а також верхній гумусовий горизонт цілинних ґрунтів. Тому для отримання високих урожаїв із високою якістю на чорноземах звичайних Північного Степу України необхідно вносити не менше фосфорних добрив, ніж на інших ґрунтах країни виходячи з даних ґрунтової діагностики.

5. Рівноважна концентрація розчинних фосфатів у ґрунтовому розчині шару 0–30 см довгоораних чорноземів формується переважно за ра-

хунок дикальційфосфату CaHPO_4 , що пов'язано з залишками фосфорних добрив, тобто монокальційфосфат $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, який первинно потрапляє у ґрунт, з часом переходить до менш розчинної форми дикальційфосфату, але розчинність цієї сполуки більш висока у порівнянні з іншими сполуками кальцію з ортофосфорною кислотою, окрім монокальційфосфату.

6. Рівноважна концентрація розчинних фосфатів у ґрунтовому розчині шару 0–30 см цілинних чорноземів формується переважно за рахунок октокальційфосфату – також досить розчинної сполуки, але менш розчинної за дикальційфосфат.

7. Формування рівноважного розчину фосфатів у горизонті 50–70 см довгоораних та цілинних чорноземів формується за рахунок гідроксилапатиту $[\text{C}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2]$. Таким чином, за тривалий час сільськогосподарського використання чорноземів не відбулося значного трансформування основного джерела розчинних фосфатів у підпахотному горизонті.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Якість ґрунту. Визначення рухомих сполук фосфору за методом Карпінського-Зам'ятіної в модифікації ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського : ДСТУ 4727-2007. – К. : Держспоживстандарт України, 2008. – 10 с. – (Національний стандарт України).

2. Ґрунти. Визначення рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Чирікова : ДСТУ 4115–2002. – К. : Національний стандарт України, 2002. – 5 с.

3. Эффективность использования фосфорных удобрений в агроценозах зерновых культур / [Крамарев С. М., Красненков С. В., Токмакова Л. Н. и др.] : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. [«Наукові доповіді. Фосфор і калій у землеробстві. Проблеми мікробіологічної мобілізації»]. – Чернігів : КП «Друкарня». №13. – 2004. – С. 56–65.

4. *Медведєв В. В.* Проблема фосфору в Україні та шляхи її розв'язання / В. В. Медведєв // Вісник аграрної науки. – 2000. – №7. – С. 82–84.

5. *Металіди В. С.* Сировинна база фосфатів України / В. С. Металіди, І. В. Щепель // Мінеральні ресурси України. – 1999. – №2. – С. 267–269.

6. *Носко Б. С.* Фосфатний режим ґрунтів і ефективність добрив / Б. С. Носко. – К. : Урожай, 1990. – 153 с.

7. Післядія добрив на фосфатний режим чорноземів України / [Носко Б. С., Бабинін В. І., Бурлакова Л. М. та ін.] // Вісник аграрної науки. – 2008. – №12. – С. 17–22.

8. *Носко Б. С.* Влияние состава и свойств почв

на результаты определения содержания подвижного фосфора химическими методами / Б. С. Носко, А. А. Христенко // Агротехника. – 1996. – №4. – С. 87–94.

9. *Носко Б. С.* Фосфорити як джерело живлення сільськогосподарських культур / Б. С. Носко, А. О. Христенко, В. І. Бабинін // Використання нетрадиційних сировинних ресурсів у сільському господарстві : [зб. наукових статей і доповідей]. – Луцьк : Надстир'я, 1997. – С. 18–20.

10. *Носко Б. С.* Проблема фосфору в землеробстві України / Б. С. Носко, А. О. Христенко, В. П. Максимова // Вісник аграрної науки. – 1999. – №5. – С. 13–16.

11. *Христенко А. О.* Діагностика вмісту рухомих сполук фосфору в ґрунтах / А. О. Христенко // Вісник аграрної науки. – 1998. – №4. – С. 21–25.

12. *Христенко А. А.* Проблема изучения фосфатного состояния почв / А. А. Христенко // Агротехника. – 2001. – №6. – С. 89–95.

13. *Христенко А. О.* Розробка стандарту України на методи визначення рухомих сполук фосфору і калію в ґрунтах / А. О. Христенко // Вісник аграрної науки. – 2003. – №6. – С. 9–13.

14. *Христенко А. О.* Вплив складу і властивостей ґрунтів на результати визначення вмісту рухомого фосфору за методом Мачігіна / А. О. Христенко, Н. П. Копоть, Л. М. Бурлакова // Агротехніка і ґрунтознавство. – 2001. – №61. – С. 84–92.

15. *Христенко А. О.* Оцінка фосфатного стану ґрунтів на основі Міжнародного стандарту /

СІЛЬСЬКЕ ГОСПОДАРСТВО. РОСЛИННИЦТВО

А. О. Христенко, М. Є. Лазебна // Вісник аграрної науки. – 2008. – №10. – С. 16–19.

16. Христенко А. О. Рухомість «рухомих» елементів живлення рослин у ґрунті // Вісник аграрної науки. – 2009. – №8. – С. 16–20.

17. Перспективні шляхи виробництва фосфорних добрив в Україні / [Щегров Л. М., Антрап-

цева Н. М., Кухарь В. П. та ін.] // Вісник аграрної науки. – 2001. – №9. – С. 13–15.

18. Sequential phosphorus extraction of a ³²P-labeled Oxisol under contrasting agricultural systems / [Buehler S., Oberson A., Rao I. M. et al.] // Soil Sci. Soc. Am. J. – 2002. – V. 66 – P. 868–877