

УДК 631.811

Розрахунковий метод визначення рівня забезпеченості рослин макроелементами живлення

А. О. Христенко

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

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 25.11.2022 Отримано після доопрацювання 24.07.2023 Затверджено до видання 25.07.2023 Доступно онлайн 02.08.2023	Метою статті є висвітлення результатів досліджень та обґрунтування можливості використання розрахункового методу визначення рівня забезпеченості рослин макроелементами живлення. Удосконалення інформаційно-методичного забезпечення сталого управління живленням сільськогосподарських культур в умовах військового стану набуває особливого значення — це дозволить значно ефективніше використовувати вельми обмежені ресурси добрив. Застосовувані матеріали і методи: результати багаторічних досліджень у стаціонарному польовому досліді; аналіз, узагальнення і статистична обробка даних фондових і сучасних літературних матеріалів (частково об'єднаних в електронній базі даних); аналіз та узагальнення даних агрохімічної служби країни. Досліджувані об'єкти: основні ґрунти України, в тому числі, чорнозем типовий (Haplic Chernozem) важкосуглинковий, теоретичне обґрунтування математичної формалізації та інтерпретації оцінки азотного, фосфатного і калійного стану ґрунтів України. Встановлено, що валовий вміст у ґрунті сполук азоту, фосфору і калію можна досить точно прогнозувати побудувавши математичну модель. Запропоновано відповідні рівняння регресії. На жаль, практична значущість таких моделей — невисока. Доведено також, що пряма спроба побудувати модель залежності вмісту рухомих сполук фосфору, чи калію від складу ґрунту, або його властивостей приречена на невдачу. Разом з тим, виявлені особливості азотних, фосфатних і калійних систем ґрунтів (як термодинамічних систем) дозволили теоретично обґрунтувати можливість математичної формалізації оцінки трофічного стану орних ґрунтів (рівня забезпеченості природним мінеральним азотом), а також, рухомими сполуками фосфору і калію в умовах їх екстенсивного, інтенсивного та постінтенсивного використання. Підтверджено, що всі, без винятку, хімічні методи аналізу (кислотні, лужні, сольові) мають властивість чітко відображати наявність фосфору, або калію, які надійшли у ґрунт у вигляді водорозчинних добрив. Оскільки величина фосфатного чи калійного рівня неудообрених чи малоудообрених орних ґрунтів є величиною постійною, проводити будь-яке додаткове їх обстеження, особливо у умовах війни, не є доцільним. Розроблено математичні моделі для екстраполяції та інтерполяції даних про вміст рухомих сполук азоту, фосфору і калію в орних ґрунтах, що формується під впливом природних або антропогенних чинників.

* E-mail: khrstenko53@gmail.com

Форма цитування: Христенко А.О. Розрахунковий метод визначення рівня забезпеченості рослин макроелементами живлення. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. 2023. Вип. 94. Харків: ННЦ "ІГА ім. О.Н. Соколовського". С. 15-21. <https://doi.org/10.31073/acss94-02>

1. Вступ

Реалізація завдання сталого управління живленням рослин викликає потребу в багаторазовому збільшенні обсягів одержуваної і оброблюваної інформації, що призводить до різкого збільшення трудових і фінансових витрат. Внаслідок цього зростає необхідність у розробці надійних математичних моделей функціонування трофічних систем ґрунтів, які дозволять оптимізувати цю задачу — моделювання як метод дослідження явищ і процесів, що ґрунтується на заміні конкретного об'єкта досліджень (оригінала) іншим, подібним до нього (моделлю) [1].

Співробітники ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського» розробили систему національних стандартів України для нормування хімічних методів визначення вмісту азоту, фосфору і калію в ґрунтах, що дозволило істотно підвищити точність ґрунтової діагностики живлення рослин. Система стандартів включає найбільш поширені у світі методи — визначення вмісту рухомого фосфору за Olsen, pH 8,5 (ДСТУ ISO 11261), а також рухомого калію — екстрагуванням $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, pH 7,0 (ДСТУ 7907). Саме ці методи було використано для складання загальноєвропейської бази даних «Land Use/Cover Area frame statistical Survey Soil» (LUCAS) та відповідних тематичних картосхем [2]. Гармонізація національного та європейського технічного законодавства є однією з умов прискорення вступу України до ЄС та розвитку економічного співробітництва в усіх галузях АПК [3].

Водночас, досвід використання ряду нормативних документів України показав наявність низки невирішених проблем та необхідність удосконалення існуючої нормативної бази. Проблеми з точністю діагностики трофічного стану ґрунтів стримують розвиток такого перспективного напрямку, як технології точного землеробства (precision farming) [4].

Традиційний спосіб визначення рівня забезпеченості рослин макроелементами їх ґрунтового живлення (відбір проб ґрунту, їх транспортування, зберігання, підготування та проведення хімічного аналізу), є досить коштовним, дуже трудомістким та потребує багато часу. Крім того, слід визнати, що за відсутності відповідної техніки — це дуже важка, а часом брудна, запилена та шкідлива для здоров'я робота. Використання розрахункового методу для визначення рівня забезпеченості рослин

макроелементами живлення, в принципі, дозволить уникнути більшості цих мінусів, оптимізувати завдання контролю та прогнозу стану родючості ґрунтів, а також значно ефективніше використовувати дуже обмежені ресурси добрив. В умовах воєнного стану ця розробка стає ще актуальнішою.

Побудова моделей — динамічних, імітаційних та інших, полегшує перевірку робочих гіпотез, сприяє упорядкуванню вихідних даних, допомагає кількісно оцінити різні процеси, дає прогноз різних довгострокових ефектів у системі «ґрунт – добриво – рослина» без проведення дослідів. Сама модель може бути представлена в різній формі: графічно — рисунок, або алгебраїчно — апроксимаційна формула [5]. Математичні моделі ділять на два класи залежно від оптимізаційного або імітаційного режиму їх використання. У першому випадку для заданої функції знаходять оптимальну стратегію, у другому — прогнозують наслідки від вибору різної стратегії при заданих значеннях вихідних змінних [6].

Великого поширення набули регресійні моделі, де зв'язок між показниками (відгуком і факторами) описується алгебраїчними рівняннями. Регресійні моделі застосовують для опису явно виражених просторових або тимчасових трендів агрохімічних показників. Це дозволяє охарактеризувати характер тренду (лінійний, нелінійний), крутість його, за відхиленням реальних даних вимірювань від тренду, більш чітко виявити окремі особливості просторового розташування показника [7].

Основною проблемою, що заважає отриманню точних моделей є недосконалість теоретичних уявлень про стан родючості ґрунтів відносно їх забезпеченості макроелементами живлення рослин. Так, наприклад, панівна концепція постійного «виснаження» і «незворотної деградації» екстенсивно використовуваних ґрунтів мирно співіснує з уявленнями про можливість самовільного підвищення вмісту елементів живлення у ґрунті в умовах їх різко негативного балансу [8, 9, 10].

В основу досліджень покладено концепцію, яка розглядає різні ґрунтові системи як відкриті поліморфні і полікомпонентні термодинамічні системи, які обмінюються з середовищем речовиною та енергією. Дисипативні структури утворюються та зберігаються завдяки обміну речовиною і енергією із зовнішнім середовищем, тобто функціонування є умовою їх збереження [11]. «Квазістаціонарний режим функціонування ґрунту» забезпечує підтримку стабільного, але невисокого природного рівня забезпеченості орних ґрунтів макроелементами живлення рослин в умовах коливання зовнішніх факторів [12].

Це єдина концепція, яка повністю відповідає історії і практиці землеробства, в тому числі, феномену високої ефективності азотних, фосфорних і калійних добрив на будь-яких типах орних ґрунтів із природним рівнем родючості.

Метою досліджень є обґрунтування можливості використання розрахункового методу визначення рівня забезпеченості рослин макроелементами живлення замість прямого польового обстеження.

2. Об'єкти і методи досліджень

Спосіб досліджень — аналіз, узагальнення і статистична обробка фондових матеріалів, а також сучасних даних відділу агрохімії ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського»; аналіз матеріалів електронної інформаційної бази даних, яка включає як експериментальні дані відділу агрохімії, так і літературні дані, що характеризують агрохімічні елементи родючості основних типів ґрунтів України.

Об'єктом сучасних прямих досліджень автора були дані з польового багаторічного стаціонарного дослідження, закладеного у 1969–1970 роках на чорноземі типовому важкосуглинковому, після розорювання 40-річного перелогу (ДП «ДГ «Граківське» ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського», Харківський район Харківської області). Впродовж 1969–1970 рр. внесенням високих доз мінеральних добрив (400; 800 та 1200 кг/га д. р.) було створено чотири рівні (природний, середній, підвищений та високий) азотних, фосфорних, калійних та азотно-фосфорно-калійних агрохімічних фонів. На кожному з цих фонів було закладено дрібноділянковий дослід. Середньорічна норма добрива (до теперішнього часу) на варіанті 111 становить $N_{50}P_{50}K_{50}$, на варіанті 222 — $N_{100}P_{100}K_{100}$. Крім того, на всіх фонах, крім контрольних, за кілька ротаций сівозміни було внесено 140 т/га (сумарно) напівперепрілого гною [13].

Агрохімічні аналізи виконували за методиками відповідно до чинних нормативних документів. Для аналізу й обробки масивів даних використано СУБД Access 98. Отримана інформація оброблялася за допомогою інтегрованої з Access 98 програмою Microsoft Excel 98 і статистичного пакету програми Statistica 10.0. Крім того, проведено аналіз та узагальнення матеріалів агрохімічної служби країни (нині — ДУ «Інститут охорони ґрунтів України») стосовно динаміки вмісту рухомих сполук фосфору і калію в ґрунтах.

3. Результати досліджень та їх обговорення

Доведено, що загальний вміст азоту, калію, валових і органічних фосфатів у ґрунтах, велика частина яких становлять термодинамічно стійкі форми, можна досить точно математично формалізувати, тобто, побудувати математичні моделі. Запропоновано відповідні рівняння регресії.

Так, наприклад, залежність між вмістом органічної речовини в ґрунтах і загальною кількістю азоту характеризується рівнянням:

$$N_{\text{заг.}} = 0,043 + 0,048C \quad r = 0,72, \quad (1)$$

де $N_{\text{заг.}}$ – загальний вміст азоту у ґрунті, %; C – загальний вміст гумусу, %.

Тобто, знаючи загальний вміст гумусу можна за допомогою рівняння 1 досить точно розрахувати загальний (валовий) вміст азоту в ґрунті. В таблиці 1 представлено дані вмісту азоту аналітичні і розраховані з використанням значень вмісту гумусу.

Таблиця 1

Значення загального вмісту азоту в орному шарі ґрунтів України – аналітичні та розраховані залежно від вмісту гумусу

Ґрунт	Вміст гумусу, %	Загальний вміст азоту ($N_{\text{заг.}}$), %	
		фактичний	розрахунковий
Дерново-підзолистий	0,7	0,08	0,08
Дерново-підзолистий	1,0	0,08	0,09
Ясно-сірий лісовий	2,1	0,17	0,14
Темно-сірий опідзолений	3,3	0,18	0,20
Чорнозем опідзолений	4,2	0,23	0,25
Чорнозем опідзолений	4,3	0,24	0,24
Чорнозем звичайний	4,4	0,24	0,25
Чорнозем звичайний	4,7	0,28	0,27
Чорнозем типовий	5,5	0,34	0,31
Чорнозем типовий	5,8	0,35	0,32

На жаль, зв'язок між загальними запасами азоту, фосфору і калію, з одного боку, і ефективністю добрив, з іншого, майже відсутній. Тому практична значущість таких моделей невелика. Більш доцільним є створення математичних моделей, які дозволяють розрахунковим шляхом досить точно визначати рівень забезпеченості рослин доступними сполуками елементів живлення, оскільки така інформація є найбільш актуальною і корисною для практики.

Проведеними дослідженнями підтверджено, що азотна система ґрунтів є більш динамічною порівняно з іншими трофічними системами ґрунтів. На відміну від таких абстрактних показників, як «рухомий фосфор», або «рухомий калій», мінеральний азот (насамперед, його нітратна складова) є сполукою, яка реально присутня в ґрунтового розчині, що допускає можливість певної динаміки величини азотного рівня ґрунтів під впливом ряду чинників.

Раніше проведений аналіз власних і літературних даних показав, що високий вміст у ґрунті мінерального азоту (нітратного й амонійного) відзначається практично в трьох випадках: після чорного пару, після розорювання пласта багаторічних бобових трав, а також за внесення підвищених норм органічних і азотних добрив. Причому підвищений або високий вміст азоту в ґрунтах, у такому разі, зберігається не більше 6–10 місяців. У переважній більшості інших випадків, незалежно від типу ґрунтів, забезпеченість рослин доступним азотом перебуває у межах дуже низьких чи низьких значень. Тому на всіх неоеккультурених ґрунтах Полісся та Лісостепу ефективність азотних добрив дуже висока. У зоні Степу, у зв'язку з нестачею вологи, ефективність азоту є дещо нижчою [4].

Низька природна насиченість більшості орних ґрунтів доступним рослинам азотом пояснюється недостатнім умістом у ґрунтах органічних речовин, які легко розкладаються, що зумовлено низьким рівнем застосування органічних добрив і майже повною відсутністю посівів багаторічних бобових трав.

Факт низької природної насиченості орних ґрунтів України мінеральним азотом повністю підтверджується даними тривалого стаціонарного польового дослідження, закладеного на чорноземі типовому важкосуглинковому. Вміст цієї форми азоту у ґрунті протягом усіх п'ятдесяти років досліджень перебував у межах або дуже низьких, або низьких значень забезпеченості. Незначна позитивна динаміка вмісту азоту пов'язана з впливом кліматичного чинника.

Статистичний аналіз даних, показав, що природний вміст нітратного азоту в чорноземі типовому протягом 48 років характеризується рівнянням регресії:

$$N-NO_3 = 6,47 - 0,02T \quad r = -0,08, \quad (2)$$

де $N-NO_3$ – вміст нітратного азоту, мг/кг ґрунту; T – роки досліджень.

Виявлені особливості азотної системи ґрунтів дозволяють достатньо однозначно інтерпретувати одержані дані і теоретично обґрунтувати можливість математичної формалізації оцінки азотного стану ґрунту по непарових попередниках (рівня забезпеченості їх мінеральним, або нітратним азотом) в умовах екстенсивного використання.

Доведено, що пряма спроба побудувати модель залежності вмісту рухомого фосфору, або калію від складу ґрунту, або його властивостей приречена на невдачу. Це пов'язано з тим фактом, що рухомого фосфору (калію), як такого, в ґрунті не існує. Незважаючи на це, можливість одержання адекватної математичної моделі, яка б дозволила розрахунковим шляхом визначати насиченість ґрунту рухомими сполуками фосфору або калію, таки є. Але реалізується ця можливість лише в тому випадку, якщо розглядати трофічні системи ґрунтів як термодинамічні системи. Підтверджено, що кількість реально доступних рослинам сполук фосфору і калію в екстенсивно використовуваній ріллі є величиною постійною (і по суті є константою), а рівень забезпеченості рослин цими елементами живлення відповідає межі низьких і середніх значень [4]. Тобто, відповідно до принципів хімічної термодинаміки фосфатна і калійна системи ґрунтів, як термодинамічні системи, відповідають такому рівню рівноваги, який найбільш імовірний в умовах поверхні планети (певних значень фізико-хімічних показників, характерних для поверхні Землі). При цьому, природний рівень забезпеченості орних ґрунтів фосфором і калієм стабільний не тільки в просторі, але і в часі. Так, наприклад, вміст рухомих сполук фосфору на контрольних варіантах досліді (чорнозем типовий важкосуглинковий) упродовж 50 років не змінювався і коливався в межах похибки експерименту — 40–50 мг/кг P_2O_5 . Вміст рухомого калію (визначений за методом Чирикова) за той самий час коливався в межах 65–85 мг/кг K_2O .

Раніше було доведено, що за систематичного внесення навіть невеликих норм фосфорних (P_{10-20}), або калійних (K_{20-30}) добрив, спостерігається поступове накопичення їх залишкових сполук у ґрунті. Але за таких норм внесення добрив факт підвищення можна статистично довести лише років через 30–70 [14].

Можливо, слід пояснити факт частого самоцититування автора статті. Це вимушений захід, оскільки, по-перше, довести факт стабільності трофічних систем орних ґрунтів можна лише спираючись на десятки років досліджень; по-друге, аналогічних публікацій практично немає. Остання знайдена робота, що безпосередньо стосується теми цієї статті, датується 1986 роком [15].

Отже, оскільки величина рівня фосфатної чи калійної забезпеченості рослин на неудообрених або малоудообрених орних ґрунтах є величиною постійною, немає особливого сенсу проводити якесь додаткове обстеження, тим більше в умовах війни.

Інша річ, якщо у ґрунт систематично вносять підвищені або високі ($P_{25}K_{35}$ і вище) норми добрив. Статистична обробка даних тривалого польового досліді показала, що у цьому випадку (особливо у перші 30 років) між вмістом фосфору у ґрунті та кількістю внесеного фосфору існує пряма залежність (Рис.1). Ця закономірність описується рівнянням:

$$P_{\text{чир}} = 44,517 + 0,0576N \quad r = 0,83 \quad (3)$$

де $P_{\text{чир}}$ – вміст P_2O_5 визначений за методом Чирикова, мг/кг ґрунту; N – сумарна норма внесених добрив, кг P_2O_5 на га.

Тобто, в середньому, внесення кожної наступної дози фосфорних добрив (100 кг P_2O_5 /га) підвищує вміст P_2O_5 в орному шарі цього ґрунту на 5,76 мг/кг.

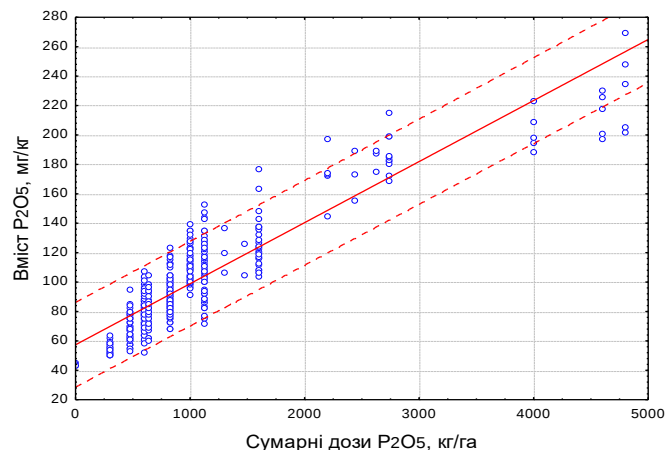


Рис.1. Динаміка вмісту рухомого фосфору, визначеного за методом Чирикова, в орному шарі чорнозему типового залежно від сумарної кількості внесених добрив.

З урахуванням похибки можна прогнозувати, що за таких норм внесення вміст P_2O_5 в цьому ґрунті у 2030 році становитиме 276–306 мг/кг, причому скоріше 276 мг, ніж 306 мг/кг. Справа в тому, що в умовах проведення тривалого експерименту (понад 40–50 років) можливим є поступове зниження інтенсивності накопичення поживних речовин добрив у ґрунті. Це пояснюється наростаючим впливом ентропійного чинника, а також фактору зменшення внутрішньої енергії речовини. Простіше кажучи — зі зростанням втрат і зниженням доступності рослинам фосфору (калію) добрив лінія тренду почне набувати слабовираженого криволінійного вигляду. Тобто починає виявлятися ще один фактор, а саме, фактор часу. Тому для, підвищення точності розрахунків доцільніше застосовувати квадратичну модель. А ще краще — збудувати нову лінійну модель на основі даних за останні 10–20 років.

Доведено, що всі, без винятку, хімічні методи (кислотні, лужні, сольові) мають властивість чітко відображати наявність фосфору або калію, які надійшли у ґрунт у вигляді водорозчинних добрив. В умовах тривалого стаціонарного дослідження на чорноземі типовому важкосуглинковому, коефіцієнт кореляції (r) між даними, здобутими різними хімічними методами (Чирикова, Мачигіна, Карпінського-Зам'ятіної), і кількістю внесених фосфорних добрив був однаково високим, відповідно — 0,83, 0,89 та 0,80. При цьому, оскільки всі три методи придатні для даного ґрунту, значення рівня забезпеченості фосфором повністю збігаються (Табл. 2).

Таблиця 2

Вміст фосфору в орному шарі чорнозему типового залежно від сумарної дози внесених фосфорних добрив

Сумарна доза P_2O_5 , кг/га	Вміст P_2O_5 (мг/кг ґрунту) та забезпеченість рослин		
	за Чириковим	за Мачигіним	за Карпінським-Зам'ятіною
0	44,5 (середня)	16,0 (середня)	0,23 (середня)
1000	102,1 (підвищена)	30,1 (підвищена)	1,03 (підвищена)
2000	159,7 (висока)	47,3 (висока)	1,83 (висока)
3000	217,3 (дуже висока)	61,1 (дуже висока)	2,63 (дуже висока)

Відомо, що якщо дослідження модельованого об'єкта виходять за межі значень аргументів регресійної моделі (екстраполяція), то точність відповідних розрахунків зазвичай падає [7].

Разом з тим, у багатьох випадках моделі дозволяють досить точно прогнозувати динаміку фосфатного стану ґрунтів на значний час. Так, наприклад, закономірність падіння фосфатного рівня чорнозему типового важкосуглинкового після припинення внесення фосфорних добрив описує рівняння, отримане ще в 2003 році на основі 20-річних даних:

$$P_{\text{чир}} = 185,72 - 6,24T + 0,07T^2 \quad r = 0,86, \quad (4)$$

де $P_{\text{чир}}$ — вміст P_2O_5 за методом Чирикова, мг/кг ґрунту; T — кількість років.

Внесення норми $P_{600} + P_{600}$ у 1969 і 1970 роках і додаткове разове внесення P_{600} у 1983 році дозволило підвищити вміст рухомого фосфору (P_2O_5) з 45 мг/кг ґрунту до 185, тобто, на 140 мг/кг. Після припинення внесення добрив (згідно з одержаною математичною моделлю) середньорічне падіння вмісту P_2O_5 на фосфатному фоні становило, в середньому, 4,8 мг/кг ґрунту (Рис. 2).

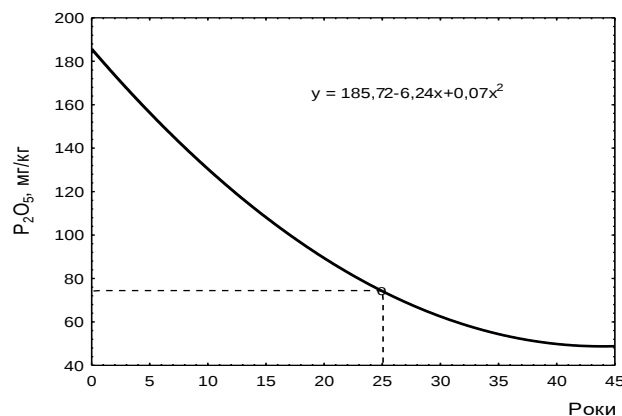


Рис.2. Динаміка зниження вмісту залишкових фосфатів добрив у орному шарі чорнозему типового після створення фосфатного фону (шляхом внесення разових доз $P_{1200} + P_{600}$)

Перевірка адекватності даної моделі, проведена через 5 років, показала, що вміст рухомого фосфору (всього 25 років), згідно з рівнянням регресії, повинен становити 74 мг P_2O_5 /100 кг ґрунту. Фактичне значення вмісту рухомого фосфору на цьому варіанті дослідження становило на той час (72–82 мг P_2O_5 /кг ґрунту). Зниження фосфатного рівня ґрунту зі 185 мг P_2O_5 /кг до рівня динамічної рівноваги (45–50 мг P_2O_5 /кг), відповідно моделі, очікувалося не раніше ніж через 37–40 років, тобто, не раніше 2020 року. Вміст P_2O_5 у цьому році мав би становити 50,7 мг/кг ґрунту. Фактичний вміст P_2O_5 в орному шарі ґрунту у 2020 році — 50,1 мг/кг. Тобто, ця модель повністю відповідає дійсності.

Інтенсивність накопичення в орному шарі чорнозему типового вмісту рухомого калію за систематичного внесення калійних добрив характеризується рівнянням:

$$K_{\text{чир}} = 86,0629 + 0,0206D \quad r = 0,81, \quad (5)$$

де $K_{\text{чир}}$ — вміст K_2O за методом Чирикова, мг/кг ґрунту; D — сумарна кількість (доза) внесених добрив, K_2O кг/га.

Згідно з моделлю, норматив витрат калійних добрив для зсуву вмісту K_2O на 1 мг/кг ґрунту за середньорічної норми внесення 100 кг K_2O /га становить — 2,06 мг/кг ґрунту (Рис. 3).

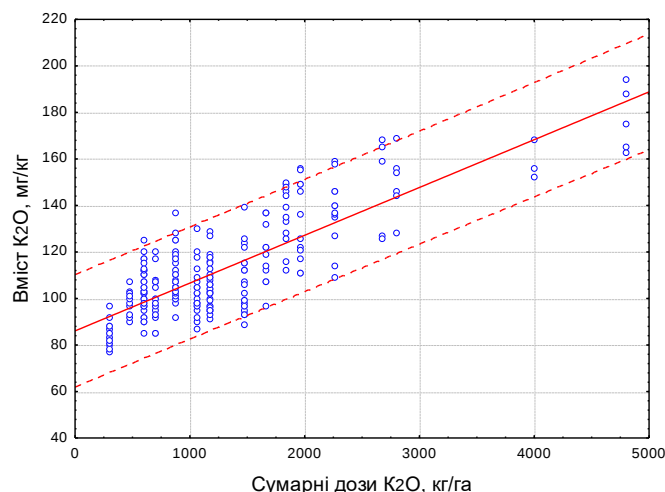


Рис. 3. Динаміка вмісту рухомого калію, визначеного за методом Чирикова, в орному шарі чорнозему типового залежно від сумарної кількості внесених добрив

Відповідно до моделі за таких норм внесення вміст K_2O в цьому ґрунті в 2030 році буде знаходитися в межах 180–210 мг/кг.

Вище вже обговорювалося значення двох факторів, що впливають на інтенсивність накопичення в ґрунті залишкових сполук добрив, особливо фосфору. Разом з тим існує поширена думка про наявність третього, а саме — фактору відмінностей у гранулометричному складі ґрунтів.

Попередні дані (результати вегетаційного дослідження) дозволяють висловити сумнів у правильності тези про те, що за більш важкого гранулометричного складу є більшими витрати фосфору або калію добрив для зсуву вмісту цих елементів живлення. Той факт, що одноразова витяжка будь-якого екстрагента, витягує із зразків супіщаних ґрунтів (за рівних доз P_2O_5) значно більше залишкових фосфатів добрив, ніж із ґрунтів суглинкового та глинистого гранулометричного складу, зовсім не свідчить про кращу забезпеченість рослин фосфором на легких ґрунтах. У цьому досліді збільшення надходження фосфору до рослин у легких ґрунтах перебувало у межах похибки експерименту [4].

Тому можна з високим ступенем імовірності припустити, що математичні моделі, дані для яких було отримано на важкосуглинковому ґрунті, можна успішно використовувати для більшості ґрунтів на лесових породах із вмістом фізичної глини 30–60 %.

Таким чином, виявлені особливості фосфатних і калійних систем ґрунтів дозволяють теоретично обґрунтувати можливість математичної формалізації оцінки трофічного стану ґрунтів (рівня насиченості їх рухомими сполуками) в умовах їх екстенсивного та інтенсивного використання. При цьому немає принципових відмінностей між завданнями визначення рівня родючості ґрунту конкретного поля і, скажімо, ґрунтів країни загалом. Проблема полягає лише у необхідності мати відповідну інформацію.

У даний час ведеться робота з уточнення математичних моделей, необхідних для прогнозування динаміки родючості ґрунтів щодо їх насиченості фосфором та калієм (екстраполяція даних), у розрізі природних зон України в цілому на основі матеріалів ДУ «Інститут охорони ґрунтів України».

Висновки

Загальний вміст азоту, калію, валових і органічних фосфатів у ґрунтах, велика частина яких перебуває у термодинамічно стійких формах, можна досить точно математично формалізувати, тобто побудувати математичну модель. Запропоновано відповідні рівняння регресії. На жаль, практично відсутній зв'язок між загальними (валовими) запасами поживних речовин і ефективністю відповідних добрив, тому практичне значення таких моделей невисоке.

Визначені особливості азотних, фосфатних і калійних систем ґрунтів дозволили теоретично обґрунтувати можливість математичної формалізації оцінки трофічного стану орних ґрунтів (рівня насиченості природним мінеральним азотом, а також, рухомими сполуками фосфору і калію) в умовах їх екстенсивного, інтенсивного та постінтенсивного використання.

Розроблено математичні моделі для екстраполяції та інтерполяції даних про вміст рухомих сполук азоту, фосфору і калію в орних ґрунтах під впливом природних або антропогенних чинників.

Список використаних джерел

1. The FAO AGROVOC Thesaurus. URL: https://agrovoc.fao.org/browse/agrovoc/en/page/c_4881
2. LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe: a review. / A. Orgiazzi, C. Ballabio, P. Pangos [et al.]. *European Journal of Soil Science*. 2018. 69: 140–153. <https://doi.org/10.1111/ejss.124>

3. 2014/295/EU: Council Decision of 17 March 2014 on the signing, on behalf of the European Union, and provisional application of the Association Agreement between the European Union and the European Atomic Energy Community and their Member States, of the one part, and Ukraine, of the other part, as regards the Preamble, Article 1, and Titles I, II and VII thereof. *Official Journal of European Union*. L 161. 29 may 2014. Vol. 57. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L:2014:161:TOC>
4. Христенко А.А. *Теоретические и практические аспекты оценки состояния и динамики азотных, фосфатных и калийных систем почв*. Харьков: ФЛП Бровин А.В., 2019. 180 с.
5. Лисовой Н.В. Математические модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур. *Современные проблемы опытного дела: материалы Междунар. науч.-практ. конференции*. СПб., 2000. С. 46–49.
6. Сычев В.Г. *Современное состояние плодородия почв и основные аспекты его регулирования*. Москва: РАН, 2019. 328 с. URL: <https://new.ras.ru/upload/iblock/6b8/jzi8iax93h454961hgg97hng8wqlqshsk.pdf>
7. Фрид А.С. Современное состояние моделирования в агрохимии. *Агрохимия*. 2004. № 1. С. 40–45.
8. Фосфатный режим чернозема типичного в зависимости от интенсивности его использования / В.Б. Азаров, П.Г. Акулов, В.Д. Соловichenko, Б.Ф. Азаров. *Агрохимия*. 2003. № 8. С. 13–25.
9. Влияние удобрений, способов основной обработки почвы и типа севооборота на динамику содержания обменного калия в черноземе типичном / В.Б. Азаров, П.Г. Акулов, В.Д. Соловichenko, Б.Ф. Азаров. *Агрохимия*. 2003. № 9. С. 5–13.
10. Шафран С.А. Динамика применения удобрений и плодородие почв. *Агрохимия*. 2004. №1. С. 9–17.
11. Гландорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций [пер. с англ.]. Москва: Мир, 1973. 284 с. URL: <https://ikfia.ysn.ru/wp-content/uploads/2018/01/GlensdorffPrigozhin1973ru.pdf>
12. Трофимов С.Я., Седов С.Н. Функционирование почв в биосфере: подходы к описанию и анализ. *Почвоведение*. 1997. № 6. С. 770–778.
13. Носко Б.С. Использование метода моделирования фонов при изучении агрохимических свойств почв. *Агрохимия*. 1981. №1. С. 122–127.
14. Христенко А.О. Теоретичні проблеми методології балансової оцінки кругообігу макроелементів живлення в системі «добрива-ґрунт-рослина». *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. 2020. Вип. 90. Харків: ННЦ "ІГА ім. О.Н. Соколовського". С. 47–56. <https://doi.org/10.31073/acss90-05>
15. Фрид А.С., Прохорова З.А. Изучение многолетней динамики подвижных фосфатов в дерново-подзолистой почве. *Агрохимия*. 1986. № 6. С. 22–28.

UDC 631.811

Calculation method for determining the level of supply of plants with macronutrients

A. O. Khrystenko

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

The purpose of the article is to highlight the results of research and substantiate the possibility of using the calculation method for determining the level of provision of plants with macronutrients. Improving the information and methodological support for sustainable management of crop nutrition in a state of war is of particular importance – this will allow much more efficient use of very limited fertilizer resources. Applied materials and methods: - results of many years of research in a stationary field experiment; analysis, generalization and statistical processing of data from stock and modern literary materials (partially combined in an electronic database); analysis and synthesis of data from the agrochemical service in the country. Investigated objects: the main soils of Ukraine, including typical chernozem (Haplic Chernozem), theoretical substantiation of mathematical formalization and interpretation of the assessment of the nitrogen, phosphate and potassium status of Ukrainian soils. It has been established that the total content of nitrogen, phosphorus and potassium compounds in the soil can be predicted quite accurately by building a mathematical model. The corresponding regression equations are proposed. Unfortunately, the practical significance of such models is low. It has been proved that a direct attempt to build a model of the dependence of the content of mobile compounds of phosphorus or potassium on the composition of the soil or its properties is doomed to failure. At the same time, the identified features of the nitrogen, phosphate, and potassium systems of soils (as thermodynamic systems) made it possible to theoretically substantiate the possibility of mathematical formalization of the assessment of the trophic state of arable soils (the level of provision with natural mineral nitrogen), as well as mobile compounds of phosphorus and potassium under their extensive conditions. intensive and post-intensive use. It has been confirmed that all, without exception, chemical methods of analysis (acidic, alkaline, and saline) have the ability to clearly reflect the presence of phosphorus or potassium, which entered the soil in the form of water-soluble fertilizers. Since the value of the phosphate or potassium level of unfertilized or poorly fertilized arable soils is a constant value, it is not advisable to conduct any additional examination of them, especially in war conditions. Mathematical models have been developed for extrapolation and interpolation of data on the content of mobile compounds of nitrogen, phosphorus and potassium in arable soils formed under the influence of natural or anthropogenic factors.

Keywords: soil, sustainable management, mathematical formalization, macronutrient, model, trophic state.

Citing: Khrystenko A. O. (2023). Calculation method for determining the level of supply of plants with macronutrients. *AgroChemistry and Soil Science*. 94, 15–21. [doi:10.31073/acss94-02](https://doi.org/10.31073/acss94-02) [in Ukrainian].