

ГРУНТОВЕ ЖИВЛЕННЯ РОСЛИН SOIL NUTRITION of PLANTS

УДК 631.811

Теоретичні проблеми методології балансового оцінювання кругообігу макроелементів живлення в системі «добриво–ґрунт–рослина»

А.О. Христенко

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

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
<p>Отримано 22.06.2020 Отримано після доопрацювання 10.09.2020 Затверджено до публікації 15.09.2020 Доступно онлайн 05.11.2020</p> <hr/> <p><i>Ключові слова:</i></p> <p>баланс макроелементів; відтворення родючості; ґрунт; математичне моделювання; теоретичні аспекти</p>	<p>Стратегія діяльності, спрямованої на досягнення бездефіцитного балансу поживних речовин у землеробстві, потребує коригування з науковим обґрунтуванням і визначенням економічної доцільності. Метою досліджень є удосконалення теоретичних аспектів агрохімічної балансової оцінки кругообігу макроелементів живлення в системі «добриво–ґрунт–рослина». Завданням було виявити нові закономірності формування балансу азоту, фосфору й калію і розробити базові моделі економічно обґрунтованого рівня балансу елементів живлення. Застосовувані матеріали й 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 (об'єкт прямих досліджень – чорнозем типовий важкосуглинковий); моделі економічно обґрунтованого рівня балансу елементів живлення в системі «добриво–ґрунт–рослина». Виявлено, що за систематичного внесення добрив (навіть в умовах від'ємного балансу поживних речовин) вміст рухомих сполук азоту, фосфору та калію в ґрунтах має тенденцію до підвищення. Це спонукало автора висловити припущення, що уявлення про суттєве погіршення трофічного стану ґрунтів в умовах від'ємного балансу поживних речовин є недостатньо теоретично обґрунтованим і дещо перебільшеним. У зв'язку з цим автор рекомендує з певною осторогою підходити до інтерпретації результатів розрахунків балансу. Розроблено математичні моделі та розраховано нормативи динаміки вмісту фосфору в ґрунтах України залежно від норми добрив і тривалості їх внесення. Встановлено й теоретично обґрунтовано, що за систематичного внесення навіть невеликих норм добрив, просте відтворення родючості ґрунтів досягається автоматично. Запропоновано базову модель економічно обґрунтованого рівня балансу елементів живлення для розширеного відтворення родючості ґрунтів. Параметри моделі можуть змінюватися залежно від кліматичних умов, ціни на добрива, набору культур, що вирощуються і рівня культури землеробства.</p>

E-mail: Khristenko53@gmail.com

Форма цитування: Христенко А.О. Теоретичні проблеми методології балансового оцінювання кругообігу макроелементів живлення в системі «добриво–ґрунт–рослина». *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. Вип. 90. Харків: ННЦ «ІГА ім. О.Н. Соколовського». 2020. С. 47-56. DOI: <https://doi.org/10.31073/acss90-05>

1. Вступ

Важливим напрямом вирішення продовольчої проблеми багатьох країн світу, особливо тих що розвиваються, є збільшення обсягів застосування добрив [1]. При цьому виникає низка нових проблем: зростає антропогенне навантаження на навколишнє природне середовище, зростають витрати на придбання і внесення добрив внаслідок постійного зростання цін на сировину та енергоресурси.

Прийнято вважати, що балансова агрохімічна оцінка кругообігу елементів живлення в системі «ґрунт–рослина» дозволяє чітко розуміти ступінь інтенсифікації сільськогосподарського виробництва, є основою для планування і прогнозування масштабів застосування добрив, дає змогу регулювати рівень родючості ґрунтів, а також запобігати їх забрудненню. Результати оцінювання балансу також дають змогу створити оптимальний набір і співвідношення культур, формувати структуру посівних площ, планувати внесення оптимальних доз та співвідношень мінеральних добрив, активно коригувати біологічний кругообіг елементів живлення в системі «ґрунт–рослина» [2].

Баланс елементів живлення (в агрохімічному розумінні) залежить від двох основних статей – надходження поживних речовин у ґрунт з удобрювальними засобами та їх вилучення із ґрунту рослинами на побудову врожаю. Залежно від того, який із процесів домінує, змінюється відповідно й рівень родючості ґрунту [3].

В Україні у 2014 р. на гектар ріллі внесено лише 54 кг азотних, 14 – фосфорних і 14 кг д.р. калійних добрив. В результаті агрохімічний баланс основних елементів живлення у

системі «ґрунт-рослина» був від'ємним – азоту -24 кг/га, а фосфору і калію, відповідно, -13 та -15 кг/га. Найбільш несприятливим виявився стан забезпеченості рослин фосфором, оскільки дефіцит цього елемента спостерігається у ґрунтах усіх ґрунтово-кліматичних зон на території України [4].

Вважається, що якщо втрати не будуть компенсуватися добривами, меліорантами чи іншими джерелами надходжень, і баланс елементів буде від'ємним, ґрунт виснажується, втрачає рухомі поживні речовини, що знижує його ефективну родючість і врожайність сільськогосподарських культур [5]. За додатного агрохімічного балансу, коли кількість елементів живлення, що надійшли в ґрунт з добривами перевищує їх винос з урожаєм, створюються передумови зростання родючості ґрунту [6].

І хоча такі ствердження є традиційними і сприймаються як аксіома, добре відомі численні факти підвищення вмісту рухомих сполук поживних речовин у ґрунті навіть в умовах застосування низьких доз добрив, які, апіорі, не можуть забезпечити додатного балансу.

Так, наприклад, за даними Б.С. Носка [7], за внесення азотних і органічних добрив, навіть за констатованого від'ємного балансу азоту, вміст і запаси мінерального азоту в орному і підорному шарах чорнозему типового важкосуглинкового дещо підвищувалися. На думку вченого, значна роль тут належить «екстра-азоту», який утворюється під впливом взаємодії азоту добрив з азотом ґрунту. У польовому стаціонарному досліді (на фоні 140 т/га гною, сумарно, внесеного за кілька ротаций сівозміни) за виявленого дефіцитного балансу фосфору констатовано тенденцію до збільшення вмісту в ґрунті його рухомих форм. На цьому агрофоні на 25 % зростає ступінь рухомості фосфатів та майже на 30 % – уміст неміцно зв'язаних фосфатів. Це пояснюється активною мінералізацією органічних фосфатів та високою буферністю фосфатної системи, що забезпечує певну рівновагу в системі «ґрунтовий розчин – тверда фаза ґрунту» [8]. Незважаючи на від'ємний баланс калію на всіх фонах із запасним внесенням після завершення четвертої ротации сівозміни польового досліді, в орному шарі ґрунту накопичується так званий «залишковий» калій добрив. За міркуванням дослідника [9], саме калійні добрива сприяють підвищенню рухомості ґрунтових ресурсів калію і тільки цим можна пояснити накопичення у ґрунті рухомих сполук калію за загальним від'ємним балансу цього елемента.

На підставі узагальнення даних восьми основних тривалих польових дослідів, виконаних Всеросійським науково-дослідним інститутом добрив і агроґрунтознавства (ВІУА), вчені приходять до висновку, що за систематичного внесення калійних добрив відбувається накопичення калію в ґрунтах, навіть за констатованого від'ємного балансу [10]. У ґрунтах Раменської дослідної станції НІУІФ, у тривалому досліді виявлено від'ємний баланс калію і, разом з тим, збільшення вмісту обмінного калію в ґрунті. Ймовірно причиною такого явища вважають не стільки посилене використання важкорозчинного ґрунтового калію з орного шару, скільки засвоєння калію з усього кореневмісного шару, в якому помітити зміни дуже складно [10].

За даними зарубіжних дослідників [11, 12], практично у всіх типах ґрунтів калійні добрива, незалежно від дози, підвищують вміст рухомого калію і не тільки в орному шарі. Згідно з сучасними публікаціями [13], в агроєкосистемах із беззмінним вирощуванням сільськогосподарських культур (пшениця озима) як без внесення добрив, так і на удобрених ділянках (незважаючи на від'ємний баланс калію), запаси обмінного калію в шарі ґрунту 0–40 см мають тенденцію до збільшення. Дослідники пов'язують цей факт з невисоким виносом калію врожайми культури, вирощуваної беззмінно.

Взагалі, як показує короткий аналіз публікацій, пояснити можна будь-який результат досліджень, навіть незважаючи на те, що панівна теорія, з часів Ю. Лібиха, однозначно стверджує: в умовах від'ємного балансу поживних речовин можливо тільки постійне виснаження і незворотна деградація родючості ґрунту.

Як буде показано далі, можливість накопичення фосфору і калію в ґрунті в умовах від'ємного балансу поживних речовин (за внесення помірних норм добрив) підтверджується і даними польових дослідів у наукових установах, і результатами періодичних обстежень, виконаних агрохімічною службою країни (ДУ «Інститут охорони ґрунтів України»). Отже, в результатах агрохімічної балансової оцінки спостерігається явне протиріччя між домінуючою теорією і практикою землеробства.

Мета досліджень – розкриття теоретичних аспектів агрохімічної балансової оцінки кругообігу макроелементів живлення в системі «добрива-ґрунт-рослина», виявлення нових закономірностей формування балансу азоту, фосфору і калію та пропозиції щодо моделювання економічно обґрунтованого рівня балансу для простого й розширеного відтворення родючості основних типів ґрунтів.

2. Об'єкти і методи досліджень

Спосіб досліджень – аналіз, узагальнення і статистична обробка фондових матеріалів (в тому числі даних, напрацьованих академіком Б. С. Носком та його учнями), а також сучасних даних відділу агрохімії ННЦ ІГА; аналіз матеріалів електронної інформаційної бази даних, яка включає як експериментальні дані відділу агрохімії, так і літературні дані, що характеризують агрохімічні складові родючості основних типів ґрунтів України.

Крім того, було проведено аналіз та узагальнення матеріалів агрохімічної служби країни (нині – ДУ «Інститут охорони ґрунтів України») щодо динаміки вмісту рухомих сполук фосфору й калію в ґрунтах у розрізі адміністративних областей і країни в цілому за результатами I–V турів обстеження (1966–1990 рр.). Цей період вибрано саме тому, що матеріали дозволили виявити закономірності динаміки вмісту поживних речовин у ґрунтах в умовах постійного збільшення норм внесення добрив. Наприклад, внесення P_2O_5 тільки з мінеральними добривами було збільшено за той період в середньому по країні з 14 до 41 кг/га [14]. Для порівняння: за останні 20 років внесення P_2O_5 з добривами збільшилось з 2 до 13 кг/га.

Об'єкт сучасних прямих досліджень автора – 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. дворазовим 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) у варіанті 111 становить N50P50K50, у варіанті 222 – N100P100K100. Крім того, на всіх фонах, крім контрольних, за кілька ротацій сівозміни було внесено 140 т/га напівперепрілого гною (сумарно).

Більш детально схему і методику ведення цього дослідження описано в роботі Б.С. Носка [15]. Агрохімічні аналізи виконували за методиками відповідно до чинних нормативних документів або наведених у відповідних методичних посібниках.

Для накопичення, аналізу й обробки масивів даних використано СУБД Access 98 із застосуванням програм мовою Visual Basic for Applications (VBA). Дані оброблено за допомогою інтегрованої з Access 98 програмою Microsoft Excel 98 і статистичного пакету програми Statistica 10.0.

3. Результати досліджень та їх обговорення

3.1. Динаміка вмісту мінерального азоту (нітратного й амонійного) в ґрунті

Раніше проведеними дослідженнями [16] було виявлено, що природна забезпеченість орних ґрунтів України мінеральним азотом (по непарових попередниках) характеризується зазвичай дуже низькими, низькими і, зрідка, середніми (за національними критеріями [17]) значеннями. Це пояснюється недостатнім умістом у ґрунтах органічної речовини, що легко розкладається. Але й такої кількості зазвичай виявляється цілком достатньо для того щоб підтримувати невисокий, але стабільний рівень забезпеченості рослин доступним азотом.

За результатами досліджень, проведених в умовах стаціонарного польового дослідження, було виявлено, що в перші роки після розорювання 40-річного перелогу у варіантах, де добрива не вносили, вміст нітратного азоту в ґрунті був найвищим (Рис. 1), потім поступово зменшувався і через 15–20 років стабілізувався на нижчому рівні. Деякі відмінності пояснюються погодними умовами конкретного року.

Запаси мінерального азоту в контрольних варіантах дослідження в шарі ґрунту 0-60 см після шостої ротації сівозміни становили 38 кг/га (природний вміст). За цей час внесення у ґрунт органічного добрива, порівняно з абсолютним контролем, незважаючи на від'ємний баланс азоту (-170 кг/га), підвищило запаси мінерального азоту (до 70 кг/га) у шарі ґрунту 0-60 см. Внесення у ґрунт азоту в нормі N1800 в запас обумовило від'ємний баланс азоту (-460 кг/га), але сприяло підвищенню запасів мінерального азоту до 56 кг/га [7].

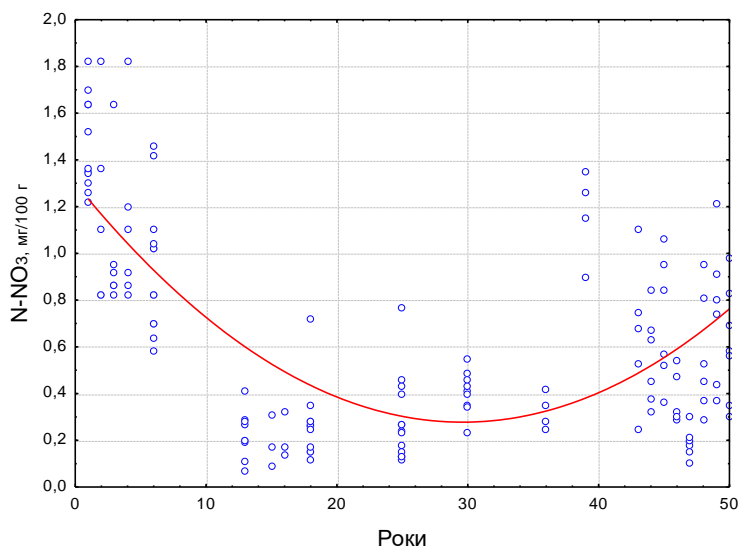


Рис.1. Динаміка вмісту нітратного азоту у чорноземі типовому протягом 50 років спостережень (стаціонарний дослід; шар ґрунту 0-60 см; неудобрювані ділянки)

Це підвищення запасів азоту у ґрунті було незначним: згідно з чинними градаціями, всі ці агрохімічні фони слабо забезпечують рослини найбільш доступними ґрунтовими сполуками азоту (менше 70 кг/га). Але факт залишається фактом: за внесення мінеральних і органічних добрив, навіть в умовах різко від'ємного балансу азоту, вміст мінерального азоту в орному і підорному шарах чорнозему типового важкосуглинкового не тільки не знижується, а й має тенденцію до підвищення.

3.2. Динаміка вмісту рухомих сполук фосфору в ґрунті

Що стосується фосфору, то за 6 ротацій зерно-бурякової сівозміни на абсолютному контролі того самого польового дослідження від'ємний баланс фосфору (P_2O_5) досягнув -734 кг/га, але це не вплинуло на вміст рухомих форм фосфатів (P_2O_5), параметри якого в орному шарі були такими: близько 45 мг/кг ґрунту за методом Чирикова, близько 18 мг/кг за методом Олсена і близько 16 мг/кг за методом Мачигіна.

При цьому, валовий вміст фосфору знизився з 0,111 % до 0,107 % P_2O_5 . У варіанті де було за три строки внесено з гноєм 280 кг/га P_2O_5 , незважаючи на від'ємний баланс (-646 кг/га), відбулося зростання вмісту рухомого фосфору (P_2O_5) в ґрунті: до 60 мг/кг за методом Чирикова і до 22 мг/кг за методом Олсена (за матеріалами Б.С. Носка [8]).

Інтенсивність процесів трансформації фосфатного фонду чорнозему типового істотно зростає за додатного балансу фосфору. Згідно з розрахунком, середнє підвищення вмісту P_2O_5 , за норми добрив P50, становило 0,25, а за норми P100 – 0,37 мг/100 г ґрунту за рік (Рис. 2).

Аналіз даних агрохімічного обстеження ґрунтів України також показав, що за систематичного внесення добрив, навіть в умовах від'ємного балансу фосфору, спостерігається поступове підвищення фосфатного рівня ґрунтів. Так, наприклад, у зоні Степу, незважаючи на загальний від'ємний баланс фосфору (у 1966-1970 рр. -10,1 та у 1971-1975 рр. -2,0 кг P_2O_5 /га), середньозважений вміст P_2O_5 у ґрунті в межах орного шару підвищився за період 1966-1975 рр. з 6,7 до 7,4 мг/100 г ґрунту. На основі статистичної обробки матеріалів агрохімічного обстеження ґрунтів України державною агрохімічною службою (5 турів) щодо динаміки вмісту рухомих сполук фосфору в ґрунтах, і з використанням статистичних даних про кількість внесених органічних і фосфорних добрив за цей період (25 років) [14], розроблено таку математичну модель залежності вмісту у ґрунті фосфору від норми і тривалості удобрення :

$$P = 6,61 + 0,0198N + 0,0173T - 0,0008N^2 + 0,0039NT - 0,0006T^2, \quad r = 0,70 \quad (1)$$

де P – середньозважений вміст у ґрунті P_2O_5 , мг/100 г (Україна в цілому); N – норма внесення добрив (P_2O_5), кг/га; T – тривалість систематичного застосування фосфорних добрив (роки).

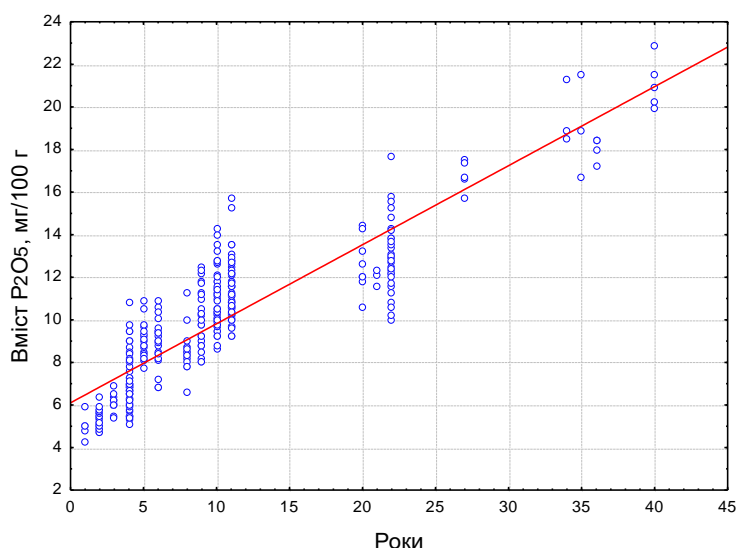


Рис. 2. Динаміка вмісту рухомих сполук фосфору (за методом Чирикова) у чорноземі типовому (стаціонарний дослід; шар ґрунту 0-30 см; середньорічна норма добрив -100 кг/га P_2O_5)

За даними моделі розраховали прогнольні нормативи середньозваженого вмісту рухомих сполук фосфору (P_2O_5 , мг/100 г) у ґрунті залежно від норм добрив і тривалості їх застосування (Табл.1).

Таблиця 1

Прогнольні нормативи середньозваженого вмісту рухомих сполук фосфору в ґрунтах України залежно від норм і тривалості застосування добрив (розрахунок за даними математичної моделі №1)

Норма внесення P_2O_5 , кг/га	Вміст P_2O_5 , мг /100 г			
	Тривалість застосування добрив (роки)			
	10	15	20	25
10	7,2	7,4	7,6	7,8
30	7,5	8,4	8,9	9,5
50	7,7	8,7	9,6	10,5

Як відомо [18], якщо регресійні моделі адекватні (математична форма відповідає експериментальним закономірностям) і статистично значущі, то вони легко дозволяють вивчати модельований об'єкт. У разі, якщо дослідження модельованого об'єкта виходять за область значень аргументів регресійної моделі (екстраполяція), то точність відповідних розрахунків зазвичай різко падає.

Модель, у межах фактичних значень аргументів (від 10 до 50 кг/га P_2O_5), підтверджує висновок про те, що за систематичного внесення навіть невеликих норм фосфорних добрив, наприклад 10 кг/га, спостерігається поступове накопичення залишкових фосфатів у ґрунті. Зрозуміло, що за такої норми добрив (за 10-25 років) це підвищення буде чисто теоретичним, але вже за збільшення норми до 30 кг/га і більше, підвищення фосфатного рівня чітко фіксується, а розрахункові значення повністю відповідають фактичним даним, одержаним в результаті агрохімічного обстеження ґрунтів України [14].

Про можливість підвищення вмісту фосфору в ґрунтах в умовах тривалого систематичного внесення низьких доз добрив автор статті раніше вже згадував у своїх публікаціях [16]. Порівняння фосфатного стану двох ґрунтів – чорнозему типового важкосуглинкового (варіант без удобрення в досліді ДП «ДГ«Граківське», Харківська область) і чорнозему типового легкосуглинкового (варіант Р10 досліді №51 Миронівського стаціонару, Київська область. Варіант «Абсолютний контроль (000)» у досліді №51 відсутній.) показало, що насиченість останнього ґрунту рухомими сполуками фосфору і доступність фосфору рослинам, були явно більш високими (Табл. 2).

Таблиця 2

Оцінка насиченості ґрунтів фосфором і його доступності рослинам

Ґрунт	Варіант	Вміст P ₂ O ₅ у ґрунті, мг/кг			Вміст P ₂ O ₅ у фітомасі вівса ¹ , %
		Методи визначення			
		іонообмінної хроматографії	Олсена	Карпінського-Зам'ятіної	
Чорнозем типовий, ДП «ДГ «Граківське»	Контроль (000)	20	18	0,25	0,52±0,09
Чорнозем типовий, Миронівський стаціонар	P10 кг/га щорічно	31	25	0,45	0,58±0,11

¹ Результати вегетаційного дослідження 1979-1981 рр., проведеного автором

Про це свідчать дані принципово різних методів визначення: іонообмінної хроматографії, 2-х хімічних (сольовий і лужний) і біологічного (вегетаційний дослід з рослинами). А головне, за всіма показниками параметри фосфатного стану слабо удобрюваного ґрунту Миронівського стаціонару перевищували значення, притаманні неудобрюваному орному ґрунту: рівень динамічної рівноваги фосфатних систем таких ґрунтів не може перевищувати 18 ± 2 за методом Олсена (ДСТУ ISO 11236) або $0,25 \pm 0,03$ за методом Карпінського-Зам'ятіної (ДСТУ 4727) [16]. І причини цього явища очевидні: на варіанті P10 за час 1912 - 1982 рр. було сумарно внесено близько 700 кг/га P₂O₅. Тобто підвищений вміст фосфору в орному шарі ґрунту Миронівського стаціонару пояснюється наявністю залишкових фосфатів добрив.

3.3. Динаміка вмісту рухомих сполук калію в ґрунті

Дослідження закономірностей динаміки калійного стану чорнозему типового важкосуглинкового у польовому стаціонарному досліді (ДП «ДГ «Граківське», Харківський район, Харківська область) показало, що в усіх варіантах склався від'ємний баланс калію (K₂O), який різнився від -3016 кг/га на контролі до -1338 кг/га у варіанті з систематичним внесенням середньорічної норми N100P100K100 (за матеріалами Б.С. Носка). Незважаючи на це, вміст рухомого калію в орному шарі ґрунту на всіх удобрених ділянках підвищувався, а за максимального удобрення (високий калійний фон+N100P100K100) – удвічі, з 81 до 168 мг/кг.

Систематичне внесення калійних добрив у середньорічній нормі K₅₀ також сприяло накопиченню в цьому ґрунті рухомого калію. Залежність вмісту калію у ґрунті від тривалості удобрення за норми K₅₀ описується таким рівнянням:

$$Y = 8,19 + 0,12X, \quad r = 0,74 \quad (2)$$

де Y – вміст K₂O за Чириковим, мг/100 г ґрунту; X – тривалість внесення калійних добрив, роки.

Згідно з рівнянням, середнє річне підвищення вмісту K₂O, за норми K₅₀, становило 0,12 мг/100 г ґрунту. З підвищенням річної норми внесення калійних добрив до K100 підвищувалася й інтенсивність накопичення калію в ґрунті:

$$Y = 8,34 + 0,24X, \quad r = 0,80 \quad (3)$$

де Y – вміст K₂O за Чириковим, мг/100 г ґрунту; X – тривалість внесення калійних добрив, роки.

Середньорічне підвищення вмісту K₂O, при нормі K100, становило 0,24 мг/100 г ґрунту. Закономірності, виявлені у польовому досліді, щодо можливості накопичення калію у ґрунті на фоні його, загалом, від'ємного балансу (за умов внесення помірних норм добрив) також підтверджуються даними агрохімічної служби країни. У всі роки так званої «інтенсивної хімізації» (1966-1990 рр.) вміст калію в ґрунтах України, зростає, незважаючи на постійний від'ємний баланс цього елемента живлення (Табл. 3).

Таблиця 3

Динаміка агрохімічного балансу калію у землеробстві України і вмісту його в ґрунті [19, 20]

Період, роки	Статті балансу K ₂ O, кг/га			Середньозважений вміст K ₂ O у ґрунті, мг/кг
	надійшло з добривами	винесено з урожаєм	баланс	
1966-1970	34,1	75,3	-41,2	98
1971-1975	44,0	72,0	-28,0	98
1976-1980	61,8	78,7	-16,9	102
1981-1985	70,8	78,8	-8,0	111
1986-1990	79,5	92,0	-12,5	113

3.4. Базова модель економічно обґрунтованого рівня балансу елементів живлення

Отже, результати дослідження демонструють, що сприймання від'ємного балансу макроелементів живлення рослин як індикатора суттєвого погіршення трофічного стану ґрунтів, є помилковим. Проведений аналіз статистичних даних також показав, що для зсуву вмісту K_2O в орному шарі ґрунту всього на 1 мг/100 г, в середньому по країні, було внесено з мінеральними й органічними добривами 1173 кг/га калію (Табл. 4).

Таблиця 4

Витрати добрив для зсуву на одиницю середньозваженого вмісту P_2O_5 і K_2O в ґрунтах України за 1966-1990 рр.

Добрива	Сумарна доза добрив, кг/га д. р.	Підвищення вмісту P_2O_5 , або K_2O , мг/100 г ґрунту	Витрати для зсуву на 1 мг/100 г ґрунту:	
			добрив, кг/га д. р.	коштів на 1 га, у. о.
Фосфорні	1125	3,5	321	321
Калійні	1759	1,5	1173	350

Виходячи з матеріалів агрохімслужби країни, можливість (у сучасних умовах) підвищити вміст рухомого фосфору на одному гектарі всього на 1 мг/100 г ґрунту (при вартості 100 кг P_2O_5 добрив – 100 у.о.), буде коштувати 321 у.о. А відповідне підвищення вмісту калію (при вартості 100 кг K_2O добрив – 30 у.о.), буде коштувати близько 350 у.о. Тобто, дуже і дуже недешево. І це без урахування додаткових витрат на використання добрив, які становлять зазвичай не менш як 10-20 % від вартості добрива (доставка, навантаження–розвантаження, зберігання, внесення в ґрунт тощо).

Ймовірніше за все ці витрати добрив у масштабі України в цілому є дещо завищеними внаслідок непродуктивних втрат добрив в умовах виробництва. Крім того, викликає певні сумніви і достовірність тогочасних статистичних даних про кількість і якість внесених органічних добрив.

Дані, одержані в умовах тривалого польового дослідження на чорноземі типовому важкосуглинковому, в умовах відсутності таких втрат показали, що для зсуву вмісту рухомого фосфору на 1 мг/100 г ґрунту знадобилося внести з добривами за 20 років – 142, за 30 років – 182 кг P_2O_5 /га.

Для зсуву вмісту рухомого калію на 1 мг/100 г за 20 років в умовах цього дослідження потрібно було внести в ґрунт з добривами 417 кг K_2O /га. Тобто в умовах тривалого стаціонарного дослідження витрати добрив для зсуву вмісту поживних речовин на 1 мг/100 г ґрунту були значно меншими ніж у виробництві, але також були високими.

Розрахунки показують, що стратегія, спрямована на досягнення бездефіцитного балансу поживних речовин у землеробстві країни, потребує удосконалення, оскільки недостатньо виправдана економічно – застосування добрив у дозах, необхідних для цього, зазвичай є економічно збитковим. Відомо, що національна безпека країни тісно пов'язана зі збереженням родючості та раціональним використанням ґрунтів. Тому вкрай важливо, щоб ця найважливіша соціальна і політична задача була ще й обґрунтованою економічно. Як показали дослідження, просте відтворення родючості ґрунтів за систематичного внесення навіть низьких норм добрив досягається автоматично. Тому немає необхідності у розробці спеціальної моделі економічно обґрунтованого рівня балансу елементів живлення для простого відтворення родючості основних типів ґрунтів.

Цей феномен можна пояснити. З термодинамічних позицій ґрунт є відкритою поліморфною багатокомпонентною системою, яка обмінюється з навколишнім середовищем речовиною і енергією. Існує поняття "квазістаціонарний режим функціонування ґрунту", тобто режим, що забезпечує підтримку й оновлення внутрішнього складу, будови і характеру зв'язків між компонентами в умовах коливання зовнішніх факторів. Функціонування системи зводиться до здійснення роботи за рахунок енергії, що підводиться [21]. Тому кількість реально доступних рослинам сполук елементів живлення в екстенсивно використовуваному орному ґрунті є величиною постійною, за уявної (позірної) їх динамічності. Будь-яка кількість елемента живлення (фосфору або калію), що надійшла ззовні в активній формі в раніше не удобрюваний ґрунт, обов'язково призведе до тимчасового зсуву його трофічного рівня в бік підвищення. Це явище пояснюється як низьким коефіцієнтом використання добрив сільськогосподарськими рослинами, так і тією обставиною, що кількість P_2O_5 або K_2O , взятих рослинами з природних запасів ґрунту (а це десятки або навіть сотні тонн у кореневмісному шарі), обов'язково самовідновиться:

рівновага в системі «тверда фаза–рідка фаза» неудобрених ґрунтів не може бути порушеною.

Так, якщо наприклад, винесено фосфору (P_2O_5) рослинами 15 кг/га, внесено з добривами 10 кг/га, а коефіцієнт використання добрив у перший рік становить 10 %, то спостерігається таке явище: рослини виносять (14 кг із ґрунту + 1 кг із добрив = 15 кг). Взяті з ґрунту 14 кг P_2O_5 відновляться, а 9 кг P_2O_5 добрив підуть на підвищення його фосфатного рівня. Більш детально теорію цього явища автор статті виклав у роботі [16].

Складнішим є вирішення проблеми досягнення розширеного відтворення родючості ґрунтів. Проблема полягає в тому, що багато дослідників підходять до вирішення завдання збереження родючості ґрунту занадто механістично, вважаючи, що розширене відтворення є можливим лише за додатного балансу елементів живлення в землеробстві. У цьому зв'язку питання досягнення розширеного відтворення родючості ґрунтів, як і питання визначення економічно обґрунтованого рівня балансу елементів живлення в землеробстві наразі, залишається відкритим.

Автор досить критично ставиться до балансового методу і вважає, що більшість поставлених завдань можна вирішити простішими і менш витратними способами. Так, наприклад, для визначення ступеню інтенсифікації землеробства інколи досить провести порівняння рівня застосування добрив (кг/га д. р.) в Україні і у, так званих, розвинутих країнах. Можливо, така оцінка буде менш точна, проте вона обійдеться набагато дешевше й одержати її можна набагато швидше. Втім, високою точністю балансовий метод ніколи і не характеризувався. Щоб у цьому перекоонатися достатньо порівняти між собою дані (щодо певного регіону), отримані різними науковими установами. Зрозуміло, що ця думка досить суб'єктивна і не претендує на статус кінцевої істини. Крім того, балансовий підхід дуже поширений у світовій практиці і, як будь-який метод пізнання, має свої позитивні і негативні сторони. По суті – це лише інструмент, яким треба навчитися правильно користуватися.

Інформація, здобута аналітичними і розрахунковими методами, дозволяє стверджувати, що завдання підвищення трофічного рівня ґрунтів України (стосовно фосфору і калію) на сучасному етапі є економічно нераціональним і не повинно бути самоціллю. Основні зусилля необхідно зосередити на проблемі розробки і впровадження прийомів і способів підвищення економічної віддачі від застосування добрив.

За даними М.В. Лісового та ін. [22], за період 2001-2003 рр. від'ємний баланс поживних речовин у ґрунтах України був таким: -48,3 кг/га азоту; -18,8 кг/га фосфору і -68,0 кг/га калію. При цьому автори вважають, що ґрунти важкого гранулометричного складу відносно добре забезпечені калієм, тому можна обмежитися внесенням 45-50 % K_2O від його виносу урожаєм. Для компенсації втрат потрібно щороку вносити на 1 га посівної площі з різними видами добрив не менше 70 кг – N, 25 кг – P_2O_5 і 35 кг – K_2O . Тобто, для рівноважного балансу поживних речовин у ґрунті мінімальна потреба добрив становить 130 кг/га. Проведені відділом агрохімії експертні розрахунки (з урахуванням впливу вище перелічених факторів, а також сучасних цін на промислові добрива) в цілому співпадають з нормами добрив, запропонованими М.В. Лісовим і ін. [22].

З урахуванням фактичного збільшення середнього врожаю сільськогосподарських культур протягом останніх років, пропонується базова модель економічно обґрунтованого рівня балансу елементів живлення в системі «добрива–ґрунт–рослина» для розширеного відтворення родючості ґрунтів України, яка відповідає нормі N90P30K35.

Норма K35 обґрунтована таким положенням. Твердження, що ґрунти важкого гранулометричного складу України відносно добре забезпечені калієм, досить спірне, оскільки було доведено, що оцінка калійного стану важких ґрунтів, через недосконалість методів хімічного аналізу, штучно завищена [23]. Проте, з огляду на те, що одним із факторів, який лімітує врожаї культур на даному етапі розвитку економіки країни, є недостатньо висока культура землеробства, а також певний дефіцит вологи (особливо в зоні Степу), реальна потреба в калії може бути тимчасово знижена. Тобто, в сучасних умовах існує не стільки агрохімічна, скільки економічна доцільність вносити з добривами близько 50 % калію від виносу з урожаєм культур, що відповідає близько 35 кг K_2O на гектар посівної площі.

На основі даних із польового дослідження, а також в результаті аналізу та узагальнення матеріалів агрохімічного обстеження ґрунтів України зроблено такий експертний прогноз – за норми внесення N90P30K35, середньозважений вміст рухомого фосфору в ґрунті буде зростати з інтенсивністю 0,15 мг P_2O_5 /100 г на рік, а рухомого калію – 0,12 мг K_2O /100 г на рік. У цих розрахунках припустили, що в умовах виробництва, внаслідок різних непродуктивних втрат, інтенсивність накопичення фосфору і калію в ґрунтах буде, в середньому, на 30 % нижче ніж у польових дослідженнях.

Отже, за систематичного застосування рекомендованої норми добрив (незважаючи на певний від'ємний баланс елементів живлення), буде спостерігатися повільне, але неухильне підвищення родючості ґрунтів. Вважаємо, що параметри цієї базової моделі удобрення сільськогосподарських культур мало залежать від типу ґрунту, але можуть корегуватися залежно від кліматичних умов, змін ціни на добрива, набору вирощуваних культур і рівня культури землеробства.

4. Висновки

1. Доведено, що за тривалого систематичного внесення мінеральних і органічних добрив, навіть в умовах від'ємного балансу поживних речовин, вміст рухомих сполук азоту, фосфору й калію в орному шарі ґрунту не тільки не знижується, але й має тенденцію до підвищення. Тобто, уявлення про суттєве погіршення трофічного стану ґрунтів в умовах від'ємний балансу поживних речовин, є дещо перебільшеними. У зв'язку з цим слід коректніше підходити до інтерпретації даних, одержаних методами балансових розрахунків.

2. Теоретично обґрунтовано, що за систематичного внесення навіть невеликих доз добрив, просте відтворення родючості ґрунтів досягається автоматично.

3. Запропоновано, базову модель економічно обґрунтованого (для сучасних умов) рівня балансу елементів живлення в системі «добрива–ґрунт–рослина» для розширеного відтворення родючості ґрунтів України.

Список використаних джерел

1. Magen H. Balanced Crop Nutrition: Fertilizing for Crop and Food Quality. *Turk J Agric For*. 2008. 32 P. 183-193. URL: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/119781>
2. Баланс елементів живлення у зерно-буряковій сівозміні залежно від системи удобрення / Я.П. Цвей, В.В. Іваніна, Ю.М. Цебро [та ін.]. *Вісник аграрної науки*. 2012. №1. С. 33-37. URL: https://agrovisnyk.com/oldpdf/visnyk_01_2012.pdf
3. Лісовий М.В., Карацуба О.В., Сліденко О.І. Динаміка балансу поживних речовин у землеробстві України. // *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тематичн. наук. Спеціальний випуск. Книга 2. Харків: Стиль-Іздат, 2018. С.185-186.
4. Балюк С.А., Медведєв В.В. Чорнозем потребує більше мінеральних добрив. *Голос України* 01.03.2016. URL: <http://www.golos.com.ua/article/264888>.
5. Баланс гумусу і поживних речовин у ґрунтах України / А.С. Заришняк., С.А. Балюк, М.В. Лісовий, А.В. Комариста. *Вісник аграрної науки*. 2012. №1. С. 28-32.
6. Снакин В.В., Попов П.Д., Присяжная А.А., Хрисанов В.Р. Баланс питательных веществ в земледелии. Атлас почв РФ. Электронная версия Национального атласа почв Российской Федерации. 2011. URL: <https://soilatlas.ru/balans-pitatelnyh-veshchestv-v-zemledelii>.
7. Носко Б.С. Азотний режим ґрунтів і його трансформація в агроєкосистемах. Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського». Харків: КП «Міська друкарня», 2013. 130 с.
8. Носко Б.С. Фосфор у ґрунтах і землеробстві України. Харків: ФОП Бровин О.В., 2017. 476 с.
9. Носко Б.С. Антропогенна еволюція чорноземів. Харків: КП «Друкарня № 13», 2006. 240 с.
10. Прокошев В.В., Дерюгин И.П. Калий и калийные удобрения: практическое руководство. Москва: Ледум, 2000. 185 с.
11. Zarrabi M., Jalali M., Hajilouei Sh.M. Kinetics of non-exchangeable potassium release through malic acid and supplying power of some soils of lamadan province. *Iran. J. Agr. Sci*. 2007. V. 37. № 6. P. 1-4.
12. Zhou J.M., Huang P.M. Kinetics of potassium release from illite as influenced by different phosphates. *Geoderma*. 2007. V. 138. Iss. 3/4. P. 221-228. URL: <https://www.researchgate.net/publication/248167151>
13. Калийный режим чернозема типичного при его длительном сельскохозяйственном использовании в различных агроэкосистемах / В.И. Лазарев, Р.И. Лазарева, Б.С. Ильин, Н.Н. Боева]. *Агрохимия*. 2020. № 2. С. 14-19. URL: <https://sciencejournals.ru/view-issue/?j=agro&y=2020&v=0&n=2>
14. Довідник з агрохімічного та агроєкологічного стану ґрунтів України / За ред. Б. С. Носка, Б.С. Пристера, М.В. Лободи. Київ: Урожай, 1994. 334 с.
15. Носко Б.С. Использование метода моделирования фонов при изучении агрохимических свойств почв. *Агрохимия*. 1981. №1. С.122-127.
16. 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.
17. Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення: керівний нормативний документ / за ред. І.П. Яцука, С.А. Балюка. Вид. 2-е допов. Київ, 2019. 108 с.
18. Фрид А.С. Современное состояние моделирования в агрохимии. *Агрохимия*. 2004. № 1. С. 40–45.
19. Столяр В.М., Медведєва Л.С. Баланс поживних речовин в землеробстві. Довідник з агрохімічного та агроєкологічного стану ґрунтів України. Київ: Урожай, 1994. С. 95-99.
20. Медведєва Л.С. Баланс поживних речовин в землеробстві. Довідник працівника агрохімслужби. Київ: Урожай, 1991. С.41-48.
21. Трофимов С.Я., Седов С.Н. Функционирование почв в биогеоценозах: подходы к описанию и анализу. *Почвоведение*. 1997. № 6. С.770-778.
22. Лісовий М.В. Основні завдання агрохімічного забезпечення землеробства України. *Агрохімія і ґрунтознавство: спец. випуск до VIII з'їзду УТГА*. Житомир: Рута, 2010. Кн. I. С. 70–76.
23. Христенко А.А. Калийное состояние почв и эффективность удобрений. Харьков: ФЛП Бровин А.В., 2017. 120 с.

UDC 631.811

Theoretical problems of the methodology of balance assessment of the cycle of macroelements in the “fertilizer-soil-plant” system

A.O. Khristenko

NSC «Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O.N.Sokolovsky»,
Kharkiv, Ukraine
E-mail: Khristenko53@gmail.com

The strategy of activities aimed at achieving a deficit-free balance of nutrients in agriculture requires improvement, theoretical justification and determination of economic feasibility. The aim of the research is to improve the theoretical aspects of the balance assessment of the cycle of macroelements in the soil-plant system. The task was to identify new patterns of formation of the balance of nitrogen, phosphorus and potassium in the soil-plant system and to develop basic models of economically justified level of balance of nutrients. Applied materials and methods: results of long-term research in stationary field experiment; analysis, generalization and statistical data processing of stock and modern literature materials (partially combined in an electronic database); analysis and generalization of data of the agrochemical service of the country. Researched objects: main soils of Ukraine (object of direct research- typical heavy loam chernozem); models of economically justified level of balance of nutrients in the soil-plant system. It is found that with the systematic application of fertilizers (even under the conditions of a negative balance of nutrients) the content of mobile compounds of nitrogen, phosphorus and potassium in the soil tends to increase. This led the author to suggest that the idea of a significant deterioration of the trophic state of soils in a negative balance of nutrients is not theoretically sound and somewhat exaggerated. In this regard, the author recommends approaching the interpretation of the results of balance calculations with some caution. Mathematical models are developed and standards for the dynamics of phosphorus content in the soils of Ukraine depending on the rate of fertilizers and the duration of their application are calculated. It is established and theoretically substantiated that with systematic application of even small doses of fertilizers, simple reproduction of soil fertility is achieved automatically. A basic model of economically justified level of nutrient balance for extended reproduction of soil fertility is proposed. The parameters of the model may vary depending on climatic conditions, fertilizer prices, the set of crops grown and the level of agricultural culture.

Keywords: fertility reproduction; macroelements balance; mathematical modeling; soil; theoretical aspects.

Citing: Khristenko A.O. 2020. Theoretical problems of the methodology of balance assessment of the cycle of macroelements in the “fertilizer-soil-plant” system. *Agrochemistry and Soil Science*. Collected papers. No. 90. Kharkiv: NSC ISSAR, P. 47-56. (Ukr.). DOI: <https://doi.org/10.31073/acss90-05>.