



Землеробство, грунтознавство, агрохімія

УДК 631.8:551.583.13

© 2023

ДІАГНОСТИКА СПІВВІДНОШЕННЯ N:P В ОРНИХ ҐРУНТАХ ЛІВОБЕРЕЖНОГО ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

М.М. Мірошніченко¹, Є.Ю. Гладкіх²,
О.П. Волошенюк³, С.С. Коваленко⁴

¹доктор біологічних наук, член-кореспондент НААН

^{2,3}кандидати сільськогосподарських наук

ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського»

вул. Чайковська, 4, м. Харків, 61024, Україна

e-mail: ¹ecosoil@meta.ua, ²ye.hladkikh@ukr.net, ³syabryk86@gmail.com,

⁴stanislawkowalenko@gmail.com

ORCID: ¹0000-0003-2830-5933, ²0000-0002-4852-0502,

³0000-0001-9521-4607, ⁴0000-0001-6834-2259

Надійшла 25.06.2023

Мета. Визначити співвідношення N:P у ґрунті, добривах і рослинній продукції за різних умов вологозабезпечення для подальшого розроблення кліматично орієнтованих систем удобрення сільськогосподарських культур. **Методи.** Дослідження проведено на ґрунтово-агрохімічному полігоні площею 24 га впродовж 2018–2020 рр., у тимчасовому польовому досліді на ділянках із різним рівнем вологозабезпечення (2021 р.), а також у закладеному з 1969 р. стаціонарному польовому досліді на території ДП «ДГ «Граківське» ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського» (Харківський р-н Харківської обл.). Використано польові методи для проведення короткострокових і тривалих спостережень у польових дослідках; лабораторно-аналітичні — для визначення рухомих форм фосфору та калію в ґрунті після екстрагування 0,5 н CH_3COOH методом Чирікова, нітратного азоту — фотометрично з дисульфогеновою кислотою, амонійного азоту — фотометрично з реактивом Несслера, статистичні — для проведення дисперсійного та регресійного аналізів за допомогою програмного забезпечення STATISTICA. Уміст NPK у рослинах визначали після озолення сумішшю сірчаної та хлорної кислот. **Результати.** Стехіометрична регуляція доступності N і P в умовах погодно-кліматичних флуктуацій і посилення дефіциту мінеральних добрив є важливим напрямом підвищення ефективності удобрення, стабілізації високих рівнів урожаю польових культур та передбачення циклів біофільних елементів у майбутньому. На території полігона площею 24 га виявлено окремі локації з істотно вищим співвідношенням N:P в орному шарі за рахунок підвищення концентрації мінерального азоту, місцезнаходження яких здебільшого збігалося з ареалами накопичення ґрунтової вологи ($r=0,52-0,55$). У межах

грунтових ареалів, що різняться за умовами зволоження, визначено позитивну кореляцію між показниками співвідношення $N:P_2O_5$ у ґрунті та його вологозабезпеченням ($r=0,49-0,53$) і доведено позитивний вплив коригування цього показника на врожайність сої. На ділянках з кращими умовами зволоження перед сівбою найвищу врожайність зерна сої отримано за норми добрив $N_{180}P_{60}K_{60}$, з меншими запасами вологи — за норми $N_{120}P_{60}K_{60}$. **Висновки.** Коригування співвідношення $N:P_2O_5$ у ґрунті через управління його поживним статусом, тобто внесення різних доз і співвідношень NPK з урахуванням рівня вологозабезпечення ґрунту, впливає на врожайність сільськогосподарських культур і стехіометрію поживних речовин у рослинах. Визначено оптимальні співвідношення N:(PK) для вирощування сої в складі добрив та ґрунті на ділянках із різним рівнем вологозабезпечення. Установлено розширене співвідношення N:P в основній і побічній продукціях культур польової сівозміни у вологіші роки.

Ключові слова: збалансованість живлення, стехіометрія, азот, фосфор, ефективність добрив, умови зволоження.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agroviznyk202309-01>

Збільшення обсягів унесення добрив у світовому землеробстві є одним із чинників глобальної продовольчої безпеки. Проте це призводить до загострення екологічних проблем через посилення загального навантаження на агроєкосистеми і дисбалансу між елементами живлення [1]. Зокрема, співвідношення N:P у складі мінеральних добрив збільшилося з 2,4 у 1961 до 6,2 у 2013 р. [2]. Нова парадигма відповідального сталого управління добривами включає дорожні карти поживних речовин, орієнтовані на сталість, кліматичну нейтральність, рециклінг поживних речовин, цифрові рішення і пришвидшені інновації [3, 4].

В Україні агресія рф обмежує спроможність аграріїв застосовувати мінеральні добрива в потрібній кількості, що спонукає до пошуку та впровадження способів підвищення їхньої ефективності. Одним із напрямів такого вдосконалення систем удобрення є оптимізація співвідношення елементів живлення. Це дає змогу не лише підвищити ефективність добрив, а й поліпшити стресостійкість рослин, оскільки взаємне регулювання циклів N і P визначає реакцію організмів на кліматичні та атмосферні зміни, формує структуру харчових ланцюгів, мікробіологічну активність і вивільнення поживних елементів з ґрунту [5, 6]. І навпаки,

незбалансоване удобрення знижує ефективність споживання рослинами елементів живлення з ґрунту та добрив, зокрема азотних [7, 8].

Взаємодія між N і P сприяє живленню рослин шляхом формування розгалуженої кореневої архітектури [9, 10], збільшення темпів колонізації грибів арбускулярної мікоризи [11], посилення активної транспортної системи поглинання неорганічного азоту та фосфору [12]. Також доведено роль фітогормонів, зокрема стріголактонів, у формуванні ранньої азотно-фосфорної сигнальної системи [13]. За нестачі вологи в ґрунті рослини зменшують поглинання азоту та фосфору внаслідок змін перебігу фізіологічних процесів, уповільнення мінералізації ґрунтової органічної речовини та рослинних решток, зменшення дифузії в ґрунті [14–17]. Зволоження ґрунту після посухи посилює мінералізацію, що супроводжується вивільненням поживних речовин із мертвої мікробної біомаси, яка накопичилася під час періоду висихання [18]. Установлено, що з посиленням посушливості клімату цикл азоту та фосфору в ґрунті може бути розбалансованим через зниження концентрації 1- та підвищення 2-го елементів, оскільки коефіцієнт дифузії P чутливіший до вологості ґрунту, ніж коефіцієнт дифузії N [19, 20].

Регулювання співвідношення N:P у ґрунті за оптимізації доз і форм мінеральних добрив з урахуванням рівня вологозабезпечення дає змогу цілеспрямовано впливати на врожайність сільськогосподарських культур та концентрацію поживних речовин у рослинах. На думку авторів [21–24], зміни у співвідношенні N:P у ґрунті можуть бути важливішими, ніж зміни в умісті цих елементів. Найчастіше дефіцит N і P проявляється у рослин, що вегетують, за $N/P < 10$ та $N/P > 20$, хоча й ці параметри варіюють залежно від виду, інтенсивності росту, стадії розвитку тощо [25]. Це спонукає до розроблення інструментарію для кількісної оцінки критичних співвідношень N:P в окремих культурах або градацій співвідношень N:P у ґрунті, які б відзначали обмеження доступності азоту чи фосфору для рослин [26]. Подібну роботу було проведено для лісових насаджень різного типу [27]. Дослідження, що мають на меті збалансувати біогеохімічні цикли N і P в сучасних агроєкосистемах, проводять у різних країнах [28, 29]. Очікується, що підбором видів із вищим оптимальним співвідношенням N:P і більшою здатністю споживання фосфору, впровадженням збалансованих сівозмін та систем удобрення можна оптимізувати стехіометрію екосистеми для досягнення максимальної продуктивності за найменших ризиків довкіллю [30, 31].

Мета досліджень — визначити співвідношення N:P у ґрунті, добривах і рослинній продукції за різних умов вологозабезпечення для подальшого розроблення кліматично орієнтованих систем удобрення сільськогосподарських культур.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження проводили на ґрунтово-агрохімічному науково-дослідному полігоні на території ДП ДГ «Граківське» ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського» (Харківська обл., географічні координати: $49^{\circ}9'7''$ пн. ш., $36^{\circ}0'1''$ сх. д.), де в ґрунтовому покриві переважають чорноземи та темно-сірі опідзолені ґрунти, але є також контури їх еродованих, підвищено зволжених і намитих різновидів [32]. Поле площею 24 га було поділене на 24 геопозиціоновані моніторингові майданчики, на яких упродовж 2018–2020 рр. навесні

та восени відбирали змішані проби ґрунту на глибині 0–20 см.

Для експериментальних досліджень співвідношення N:P на цьому самому об'єкті було вибрано 2 ділянки, які різнилися умовами забезпечення вологою через особливості мікрорельєфу. Кращі запаси вологи мала ділянка 1 з чорноземами опідзоленими, підвищено зволженими, розташована в неглибокій улоговині, дещо гірші — ділянка 2 з модальними чорноземами опідзоленими. На кожній ділянці було закладено польовий дослід за методикою [33], а саме: дослідні ділянки у формі кола діаметром 5 м поділено на 4 сектори з різним співвідношенням N:(PK) — 1:1; 1:0,7; 1:0,5 і 1:0,3, створеним шляхом унесення 30; 60 і 120 кг/га д.р. азоту з добривами відповідно на загальний мінеральний фон $N_{60}P_{60}K_{60}$ (рис. 1).

Дослідження проводили впродовж вегетаційного періоду 2021 р., відбір зразків ґрунту здійснювали до закладання досліді та протягом вегетації сої (фази 3-го трійчастого листка і дозрівання).

Для виявлення закономірностей змін співвідношення N:P в рослинній продукції в роки з різними гідротермічними умовами проводили ретроспективний аналіз фондових даних стаціонарного польового досліді «Ефективність мінеральних добрив в залежності від рівня забезпеченості поживними речовинами», закладеного в 1969 р. на цьому самому дослідному полі (атестат досліді № 08). Детальну інформацію про схему та методику проведення досліді наведено в праці [34].

У пробах ґрунту визначали вміст рухомих форм фосфору та калію після екстрагування $0,5$ н CH_3COOH за методом Чирікова згідно з ДСТУ 4115, нітратний азот — фотометрично з дисульфофеноловою кислотою,

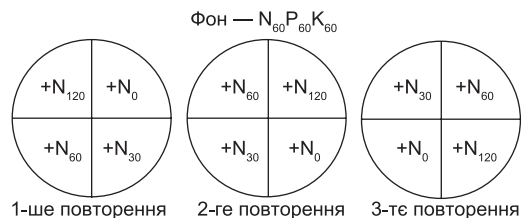


Рис. 1. Схема польового досліді з вивчення дисбалансу живлення сільськогосподарських культур

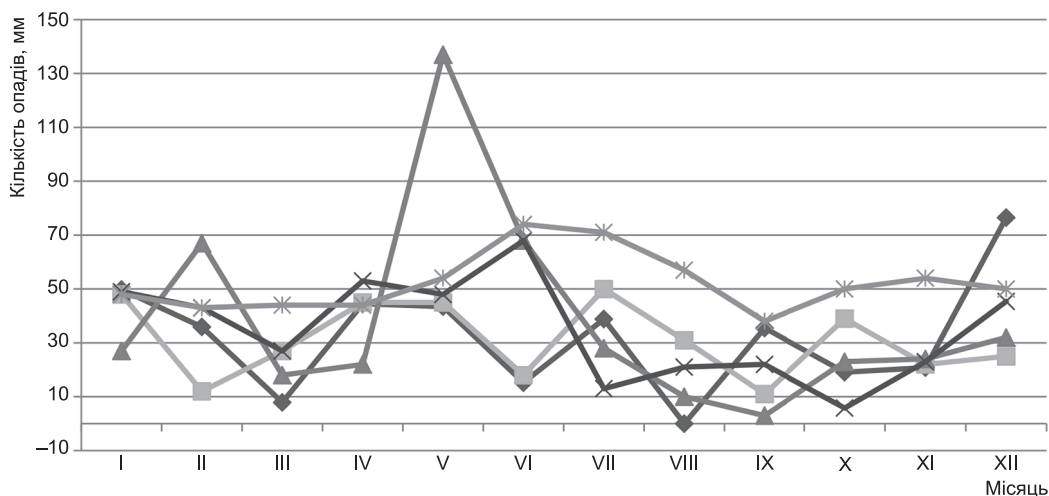


Рис. 2. Кількість опадів у роки досліджень (2018–2021 рр.): ◆ — 2018; ■ — 2019; ▲ — 2020; × — 2021; * — середні багаторічні дані

амонійний азот — фотометрично з реактивом Несслера згідно з ДСТУ 4729. Вологість ґрунту визначали термостатно-ваговим методом. У рослинних зразках визначали вміст азоту, фосфору і калію після озолення сумішню сірчаної та хлорної кислот за методом Гінзбург. Статистичну обробку результатів досліджень методами дисперсійного та регресійного аналізів проводили за допомогою програмного забезпечення STATISTICA 13.5.0.17.

Результати досліджень. Упродовж досліджень 2018–2021 рр. простежувалися періоди з низькою кількістю опадів (істотно нижчою за середні багаторічні дані) і нормальним або навіть підвищеним зволоженням. У найпошушлішому 2018 р. цикли «висихання — зволоження» були короткостроковими й однаковими за тривалістю. У 2019 і 2020 р. посухи були значно тривалішими за періоди нормального зволоження, але чергувалися з періодами рясних опадів, які перевищували середньобагаторічні обсяги (рис. 2).

Оскільки в дощові періоди нітратні форми азоту легко мігрують з потоком вологи, а за сприятливих умов для мінералізації органічної речовини їхній вміст в орному шарі швидко збільшується, мінливість зволоження позначилася на динаміці співвідношення N:P в ґрунті. Коефіцієнти варіації співвідношення N:P змінювалися в часі (35–103%), просторі — (18–39%) й були дуже подібними до коефіцієнтів варіації

мінерального азоту (26–135% і 11–57%). Натомість варіабельність вмісту рухомого фосфору була меншою: у часі 3–17%, просторі — 22–32%.

У ґрунтовому покриві полігона було виявлено окремі локації з істотно вищим співвідношенням N:P в орному шарі за рахунок підвищення концентрації мінерального азоту, місцезнаходження яких здебільшого збігалось з ареалами накопичення ґрунтової вологи ($r=0,52-0,55$). При цьому за незадовільного рівня запасів продуктивної вологи в шарі ґрунту 0–20 см зниження її вмісту на кожний 1% зумовлювало зменшення співвідношення N:P на 10%, задовільного рівня — на 4%. Тобто погіршення вологозабезпечення ґрунту супроводжувалося збільшенням дефіциту азоту.

Виявлений вплив просторової неоднорідності вологозабезпечення ґрунту на співвідношення N:P у ньому зумовлює доцільність диференціації удобрення сільсько-

1. Уміст рухомих форм елементів живлення в орному шарі ґрунту на початку досліджу

Варіант досліджу	Уміст елементів живлення, мг/кг ґрунту				
	N _{min}	N-NO ₃	N-NH ₄	P ₂ O ₅	K ₂ O
Ділянка 1	5,14	2,55	2,59	69,9	83,6
Ділянка 2	5,99	4,02	1,97	74,4	84,3

2. Співвідношення N:P:K у тукоусуміші та орному шарі ґрунту

Варіант досліджу	Співвідношення N:P:K в тукоусуміші	Співвідношення N:P:K в ґрунті на початку вегетації сої	Співвідношення N:P:K в ґрунті наприкінці вегетації сої
<i>Ділянка 1</i>			
$N_{60}P_{60}K_{60}$	1:1,0:1,0	1:6,5:7,5	1:14:17
$N_{90}P_{60}K_{60}$	1:0,7:0,7	1:4:5	1:9,5:10
$N_{120}P_{60}K_{60}$	1:0,5:0,5	1:2:2	1:6:6,5
$N_{180}P_{60}K_{60}$	1:0,3:0,3	1:1:1,5	1:4:4
<i>Ділянка 2</i>			
$N_{60}P_{60}K_{60}$	1:1,0:1,0	1:11:12,5	1:9,5:9
$N_{90}P_{60}K_{60}$	1:0,7:0,7	1:5:6	1:10:9,5
$N_{120}P_{60}K_{60}$	1:0,5:0,5	1:3:3,5	1:6:6,5
$N_{180}P_{60}K_{60}$	1:0,3:0,3	1:2:2	1:6:5,5

господарських культур для ґрунтових ареалів 1 і 2, які різняться за умовами зволоження (табл. 1). Зокрема, перед проведенням сівби сої запаси вологи в орному шарі ґрунту ділянки 1 становили 19,9 мм, ділянки 2 — 12,1 мм. Водночас за майже однакового загального вмісту мінерального азоту в ґрунті на обох ділянках співвідношення нітратної та амонійної форм різнилося (1:1 та 1:0,49 відповідно), що є наслідком гальмування амоніфікації за більш посушливих умов [35].

Упродовж вегетації сої співвідношення мінерального азоту до рухомого фосфору та калію в ґрунті обох дослідних ділянок

знизилося внаслідок більшого споживання N рослинами та високої фосфатної і калійної буферності чорноземів (табл. 2). Для дослідної ділянки 1 із кращими умовами зволоження зміна співвідношення N:(PK) за варіантами досліджу на початку і наприкінці вегетації сої мала сталий крок (1,3–1,7). При цьому кожне підвищення дози азоту на 30 кг/га супроводжувалося істотним зростанням вмісту мінерального азоту в ґрунті (11,5–60,7 мг/кг). На дослідній ділянці 2 з нижчими запасами вологи співвідношення N:(PK) на початку вегетації було значно більшим, ніж на ділянці 1, а наприкінці вегетації майже не різнилося за доз азоту N_{60} і N_{90} та N_{120} і N_{180} .

3. Урожайність сої, уміст елементів живлення та їх співвідношення в зерні за різного співвідношення N:(PK) у складі добрив

Варіант досліджу	Співвідношення N:P:K в тукоусуміші	Урожайність, т/га	Уміст елементів живлення в зерні, %			Співвідношення $N:P_2O_5:K_2O$ в зерні
			N	P_2O_5	K_2O	
<i>Ділянка 1</i>						
$N_{60}P_{60}K_{60}$	1:1,0:1,0	1,71	3,77	1,81	2,36	1:0,48:0,62
$N_{90}P_{60}K_{60}$	1:0,7:0,7	1,97	3,95	1,77	2,30	1:0,45:0,58
$N_{120}P_{60}K_{60}$	1:0,5:0,5	2,20	4,08	1,75	2,12	1:0,42:0,52
$N_{180}P_{60}K_{60}$	1:0,3:0,3	2,40	4,22	1,63	2,00	1:0,38:0,47
НІР₀₅		0,16	0,2	0,17	0,19	–
<i>Ділянка 2</i>						
$N_{60}P_{60}K_{60}$	1:1,0:1,0	1,92	4,11	1,59	2,19	1:0,38:0,53
$N_{90}P_{60}K_{60}$	1:0,7:0,7	1,92	4,19	1,51	2,12	1:0,36:0,50
$N_{120}P_{60}K_{60}$	1:0,5:0,5	2,40	4,35	1,60	2,15	1:0,37:0,49
$N_{180}P_{60}K_{60}$	1:0,3:0,3	2,19	4,31	1,60	2,01	1:0,37:0,46
НІР₀₅		0,17	0,1	0,05	0,1	–
НІР₀₅ досліджу		0,20	0,4	0,25	0,21	–

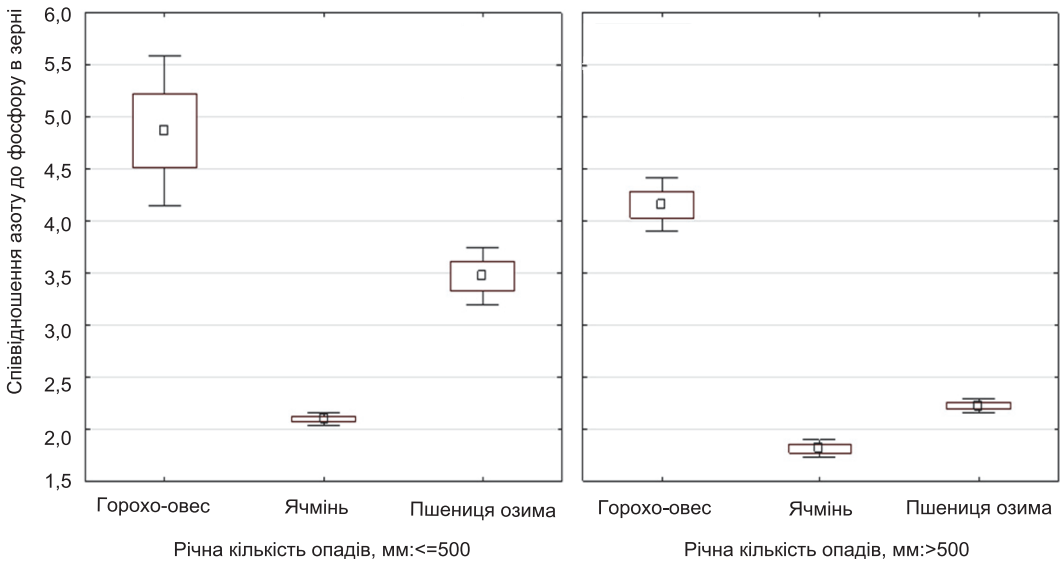


Рис. 3. Співвідношення N:P в основній продукції культур польової сівозміни в роки з різною річною кількістю опадів: □ – середнє; □ – стандартна помилка; I – 0,95 довірчий інтервал (для рис. 3, 4)

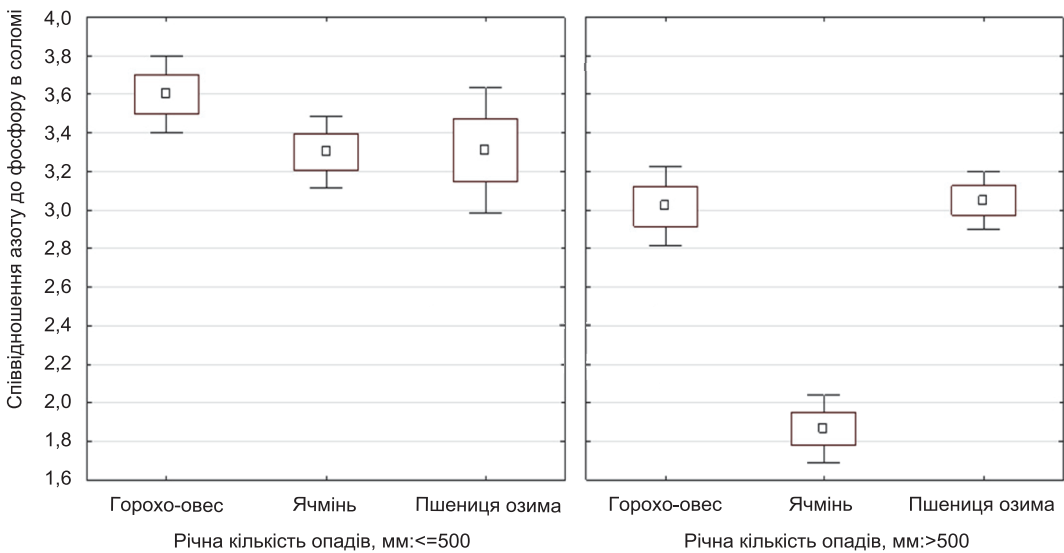


Рис. 4. Співвідношення N:P у нетоварній продукції культур польової сівозміни в роки з різною річною кількістю опадів

Соя дуже чутлива до рівня вологості ґрунту, яка впродовж вегетації має бути не нижче 70–80% від найменшої вологоємності, тому посушливі погодні умови 2021 р. із жорсткою посухою в липні негативно позначилися на врожайності (табл. 3). Найвищу врожайність зерна сої (на 40%

вище, ніж у контрольному варіанті) на краще зволоженій ділянці 1 зафіксовано за норми добрив $N_{180}P_{60}K_{60}$, на ділянці 2 (на 25% вище, ніж у контрольному варіанті) — за $N_{120}P_{60}K_{60}$, що підтверджує недоцільність збільшення внесення азоту за недостатнього вологозабезпечення.

З підвищенням норми внесення азоту з 60 до 180 кг/га на ділянці 1 вміст цього елемента в зерні значно зростає, а вміст фосфору знижується. На відміну від цього на посушливішій ділянці 2 співвідношення N:P у зерні виявилось стабільним (1:0,36–0,38) і відповідало співвідношенню за найвищого рівня застосування азоту на ділянці 1, що є найближчим до нормативних значень засвоєння поживних речовин рослинами сої (1:0,3:0,4) [36, 37].

Подібні зменшення співвідношення N:P в зерні сої у більш холодних регіонах Китаю з кількістю опадів за травень — вересень на рівні 400–500 мм відзначали автори [38], які вважають це ознакою надлишкового внесення фосфору за таких гідротермічних умов вегетації. Погодні умови періоду досліджень на ДП «ДГ «Граківське» були досить посушливими, оскільки середня кількість

опадів за травень — вересень 2018–2021 рр. становила лише 176 мм, за весь період проведення стаціонарного польового дослідження — 264 мм із коливаннями 164–435 мм. Попри це ретроспективний аналіз даних цього стаціонарного дослідження щодо вмісту елементів живлення в рослинній продукції показує, що для інших зернових культур (пшениці озимої, ячменю, горохо-вівса) також властива загальна закономірність розширення співвідношення N:P у посушливі роки для основної (рис. 3) і нетоварної частин урожаю (рис. 4). Наведені на цих графіках статистичні характеристики також наочно показують, що вплив гідротермічних умов вирощування сільськогосподарських рослин на їхній хімічний склад набагато більший, ніж мінеральних добрив, за рахунок яких можна коригувати співвідношення N:P у межах значень довірчого інтервалу.

Висновки

Співвідношення азоту і фосфору в ґрунті і рослинній продукції має просторову та часову варіабельність, пов'язану з рівнем вологозабезпечення, застосуванням добрив, перебігом мікробіологічних процесів і споживанням цих елементів рослинами. Просторова складова полягає в більш високих параметрах співвідношення доступних рослинам форм мінерального азоту до рухомого фосфору в орному шарі

мікропонижень усередині поля, часова варіабельність виражається в зниженні у вологіші роки параметрів N:P в основній та побічній продукціях культур польової сівозміни, зокрема пшениці озимої, ячменю, горохо-вівса. На прикладі сої встановлено, що за кращих умов зволоження оптимальне співвідношення N:P у складі добрив змінюється за збільшення норми внесення азоту на одиницю фосфору.

**Miroshnychenko M.¹, Hladkikh Ye.², Voloshe-
niuk O.³, Kovalenko S.⁴**

National Scientific Center «Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O.N. Sokolovsky», 4 Chaikovska Str., Kharkiv, 61024, Ukraine; e-mail: ¹ecosoil@meta.ua, ²ye.hladkikh@ukr.net, ³syabryk86@gmail.com, ⁴stanislawkwalenko@gmail.com; ORCID: ¹0000-0003-2830-5933, ²0000-0002-4852-0502, ³0000-0001-9521-4607, ⁴0000-0001-6834-2259.

Diagnostics of the N:P ratio in the arable soils of the Left Bank Forest Steppe of Ukraine

Goal. To determine the N:P ratio in soil, fertilizers, and plant products under different conditions of moisture supply for the further development of climate-oriented crop fertilizer systems. **Methods.** The research was conducted on a 24-hectare soil-agrochemical landfill during 2018–2020, in a temporary

field experiment in areas with different levels of moisture supply (2021), as well as in a stationary field experiment established in 1969 on the territory of the State Enterprise «SE «Hrakovske» of NSC «ISSAR named after O.N. Sokolovskyi» (Kharkiv district, Kharkiv oblast). Field methods were used to conduct short- and long-term observations in field experiments; laboratory-analytical — to determine the mobile forms of phosphorus and potassium in the soil after extraction of 0.5 n CH₃COOH using the Chyrikov method, nitrate nitrogen — photometrically with disulfophenolic acid, ammonium nitrogen — photometrically with Nessler's reagent, statistical — to conduct dispersion and regression analysis using the STATISTICA software. NPK content in plants was determined after ashing with a mixture of sulfuric and perchloric acids. **Results.** Stoichiometrical regulation of the availability of N and P in the conditions of weather and climate

fluctuations and increasing shortage of mineral fertilizers is an important direction for increasing the efficiency of fertilization, stabilizing high levels of field crops, and predicting the cycles of biophilic elements in the future. On the territory of the landfill with an area of 24 hectares, separate locations with a significantly higher N:P ratio in the arable layer due to an increase in the concentration of mineral nitrogen were found, the location of which mostly coincided with areas of soil moisture accumulation ($r=0.52-0.55$). A positive correlation between the N:P_{2O5} ratio in the soil and its moisture supply ($r=0.49-0.53$) was determined within the soil areas differing in moisture conditions, and the positive effect of adjusting this indicator on soybean yield was proven. In areas with better moisture conditions before sowing, the highest yield of soybeans

was obtained with N180P60K60 fertilizer dose, with lower moisture reserves — with N₁₂₀P₆₀K₆₀ dose. **Conclusions.** Adjusting the ratio of N:P_{2O5} in the soil by managing its nutrient status, i.e. applying different doses and ratios of NPK, taking into account the level of soil moisture, influenced the yield of crops and the stoichiometry of nutrients in plants. The optimal ratios of N:(RC) for growing soybeans in the composition of fertilizers and soil in areas with different levels of moisture supply were determined. An extended N:P ratio was established in the main and by-products of field crop rotation in wetter years.

Key words: nutrient balance, stoichiometry, nitrogen, phosphorus, fertilizer efficiency, moisture conditions.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202309-01>

Бібліографія

1. Penuelas J., Coello F., Sardans J. A better use of fertilizers is needed for global food security and environmental sustainability. *Agriculture and Food Security*. 2023. V. 12. P. 5. <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00409-5>
2. Lu C., Tian H. Global nitrogen and phosphorus fertilizer use for agricultural production in the past half century: shifted hotspots and nutrient imbalance. *Earth System Science Data*. 2017. V. 9. P. 181–192. <https://doi.org/10.5194/essd-9-181-2017>
3. *The International Code of Conduct for the Sustainable Use and Management of Fertilizers*. Rome. 56 pp. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO
4. Dobermann A., Bruuselma T., Cakmak I. et al. Responsible plant nutrition: A new paradigm to support food system transformation. *Global Food Security*. 2022. V. 33. 100636 doi: 10.1016/j.gfs.2022.100636
5. Zechmeister-Boltenstern S., Keiblinger K.M., Mooshammer M. et al. The application of ecological stoichiometry to plant — microbial — soil organic matter transformations. *Ecological Monographs*. 2015. V. 85. P. 133–155. doi: 10.1890/14-0777.1
6. Mingzhu He, Feike A.D. Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: a meta-analysis. *New Phytologist*. 2014. V. 204. Is. 4. P. 924–931. doi: 10.1111/nph.12952
7. Носко Б.С. Азотний режим ґрунтів і його трансформація в агроекосистемах. Харків: КП «Міська друкарня», 2013. 130 с.
8. Barlog P., Grzebisz W., Łukowiak R. Fertilizers and Fertilization Strategies Mitigation Soil Factors Constraining Efficiency of Nitrogen in Plant Production. *Plants*. 2022. V. 11. 1855. <https://doi.org/10.3390/plants11141855>
9. Chevalier F., Pata M., Nacry P. et al. Effects of phosphate availability on the root system architecture: large-scale analysis of the natural variation between Arabidopsis accessions. *Plant, Cell & Environment*. 2003. № 26. P. 1839–1850 <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01100.x>
10. Lyzenga W.L., Liu Z., Olukayode T. et al. Getting to the roots of N, P, and K uptake. *Journal of Experimental Botany*. 2023. V. 74. Is. 6. P. 1784–1805. doi: 10.1093/xb/erad035
11. Nasto M.K., Alvarez-Clare S., Lekberg Y. et al. Interactions among nitrogen fixation and soil phosphorus acquisition strategies in lowland tropical rain forests. *Ecology Letters*. 2014. № 17. P. 1282–1289. <https://doi.org/10.1111/ele.12335>
12. Zeng H., Liu G., Kinoshita T. et al. Stimulation of phosphorus uptake by ammonium nutrition involves plasma membrane H⁺ ATPase in rice roots. *Plant and Soil*. 2012. № 357. P. 205–214. doi: 10.1007/s11104-012-1136-1
13. Marro N., Lidoy J., Chico M.A. et al. Strigolactones: New players in the nitrogen-phosphorus signaling interplay. *Plant, Cell & Environment*. 2021. V. 45. P. 512–527. doi: 10.1111/pse.14212
14. Waraich E.A., Ahmad R.S., Ashraf M.Y.E. Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. *Australian J. of Crop Science*. 2011. № 5. P. 764–777. URL: https://www.cropj.com/waraich_5_6_2011_764_777.pdf
15. Sardans J., Peñuelas J. The role of plants in the effects of global change on nutrient availability and stoichiometry in the plant-soil system. *Plant Physiology*. 2012. № 160. Is. 4. P. 1741–1761. doi: 10.1104/pp.112.208785
16. Schimel J., Balsler T.C., Wallenstein M. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function. *Ecology*. 2007. № 88. P. 1386–1394. doi: 10.1890/06-0219
17. Sanaullah M., Rumpel C., Charrier X., Chabbi A. How does drought stress influence the decomposition of plant litter with contrasting quality in a

grassland ecosystem? *Plant and Soil*. 2012. № 352. P. 277–288. doi: 10.1007/s11104-011-0995-4

18. Borken W., Matzner E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. *Global Change Biology*. 2009. № 15. P. 808–824. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01681.x

19. Gaoab D., Baia E., Liab M. et al. Responses of soil nitrogen and phosphorus cycling to drying and rewetting cycles: A meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*. 2020. V. 148. 107896. doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107896

20. Blackwell M.S.A., Carswell A.M., Bol R. Variations in concentrations of N and P forms in leachates from dried soils rewetted at different rates. *Biol Fertil Soils*. 2013. № 49. P. 79–87. doi: 10.1007/s00374-012-0700-7

21. Harpole W.S., Ngai J.T., Cleland E.E. et al. Nutrient co-limitation of primary producer communities. *Ecology Letters*. 2011. V. 14. P. 852–862.

22. Güsewell S., Koerselman W. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. 2002. V. 5. P. 37–61.

23. Olde Venterink H. Does phosphorus limitation promote species-rich plant community? *Plant Soil*. 2011. V. 345. P. 1–9.

24. Di Palo F., Fornara D.A. Plant and soil nutrient stoichiometry along primary ecological successions: Is there any link? *PLOS ONE*. 2017. V. 12(8): e0182569. doi: 10.1371/journal.pone.0182569

25. Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist*. 2004. V. 164. Is. 2. P. 243–266. doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01192.x

26. Xie Y., Li L., Wang L. et al. Relationship between Phosphorus and Nitrogen Concentrations of Flax. *Agronomy*. 2023. V. 13(3). 856 doi: 10.3390/agronomy13030856

27. Soil monitoring in Europe. Indicators and thresholds for soil health assessments. European Environment Agency. European Union. 2023. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1687a21d-9df1-11ed-b508-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-284025679>

28. Bertrand I., Viaud V., Daufresne T. et al. Stoichiometry constraints challenge the potential of agroecological practices for the soil C storage. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2019. V. 39(6). 54. doi: 10.1007/s13593-019-0599-6

29. Huang Y., Wang Q., Zhang W. et al. Stoichiometric imbalance of soil carbon and nutrients drives microbial community structure under long-term fertilization. *Applied Soil Ecology*. 2021. V. 168. 104119. doi: 10.1016/j.apsoil.2021.104119

30. Chen X., Chen H.Y.H. Plant mixture balances terrestrial ecosystem C:N:P stoichiometry. *Nature Communications*. 2021. 12:4562. doi: 10.1038/s41467-021-24889-w

31. Meunier C.L., Boersma M., El Saabawi R. et al. From Elements to Function: Toward Unifying Ecological Stoichiometry and Trait-Based Ecology. *Frontiers in Environmental Science*. 2017. V. 5. 44420. doi: 10.3389/fenvs.2017.00018

32. Мірошниченко М.М., Коваленко С.С. Просторово-часова нерівномірність забезпечення ґрунтів рухомими мікроелементами. *Вісник аграрної науки*. 2023. № 4. С. 5–14. doi: 10.31073/agrovisnyk202304-01

33. Патент України на корисну модель № 151582. Спосіб вивчення дисбалансу живлення польових культур. Є.Ю. Гладких, О.П. Сябрук, М.М. Мірошниченко, Ю.Л. Розуменко. Надано чинності 18.08.2022. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=282583>

34. Мірошниченко М.М., Христенко А.О., Гладких Є.Ю. 50-річна динаміка вмісту рухомих сполук азоту, фосфору і калію в чорноземі опідзоленому за даними стаціонарного польового дослід. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 8 (821). С. 5–14. doi: 10.31073/agrovisnyk202108-01

35. Beier C., Emmett B. A., Penuelas J. Carbon and nitrogen cycles in European ecosystems respond differently to global warming. *Sci Total Environ*. 2008: 407. P. 692–697. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.10.001

36. Балюк С.А., Греков В.О., Лісовий М.В., Комариста А.В. Розрахунок балансу гумусу і поживних речовин у землеробстві України на різних рівнях управління. Харків: Миська друкарня, 2011. 30 с.

37. Господаренко Г.М., Прокопчук І.В., Бойко В.П. Засвоєння основних елементів живлення соєю з ґрунту й добрив. *Агротехніка і ґрунтознавство*. 2020. Вип. 89. С. 63–70. doi: 10.31073/acss89-07

38. Zhao S., Xu X., Wei D. et al. Soybean yield, nutrient uptake and stoichiometry under different climate regions of northeast China. *Scientific reports*. 2020. V. 10. 8431. doi: 10.1038/s41598-020-65447-6