ФОСФОР плюс/мінус ЦИНК

Усім відомо, що фосфор і цинк — класичні антагоністи. Але чи все так просто? Як правильно управляти фосфором і цинком? Саме про це читайте в нашому дослідженні цього питання.

Взаємодія між фосфором і цинком досить широко вивчена й висвітлена в публікаціях. У польових дослідженнях різних авторів було доведено, що високі норми фосфорних добрив без достатнього рівня доступного для рослин Zn можуть знизити поглинання останнього коренями культури, спричинити його дефіцит і негативно вплинути на ріст рослин і врожайність.

МОЖЛИВІ МЕХАНІЗМИ ВЗАЄМОДІЇ P І Zn

В останні декілька десятиріч численні дослідження були сфокусовані на тому, як пояснити потенційний механізм взаємодії фосфору й цинку в живленні рослин. Науково встановлені причини такого явища можна умовно об'єднати в такі групи:

1 Взаємодія фосфору з цинком у ґрунтовому розчині. Високий уміст фосфатів у ґрунті є однією із найбільш визнаних причин дефіциту цинку для культур у всьому світі. Однак, хоча ця взаємодія з фосфатами відома вже багато років, реальний механізм цього процесу досі недостатньо зрозумілий.

Найчастіше причиною називають реакцію фосфору з розчинним цинком у ґрунті з утворенням фосфатів цинку, що впливає на доступність Zn для культур і, в результаті, призводить до його дефіциту та пригнічення росту рослин.

Доведене й протилежне: внесення високих норм цинку в субстрати, бідні на фосфор, може загострити дефіцит фосфору.

Проте з цього приводу є думка, висловлена ще 1972 року вченим Lindsay, що немає фосфорних сполук цинку, які настільки нерозчинні, щоб бути причиною дефіциту цинку за внесення високих норм фосфорних добрив через утворення нерозчинних фосфатів цинку. Насправді, сполуки цинку й фосфору, які, найімовірніше, можуть утворитися при цьому ($Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$), є достатньо розчинними для того, щоб бути джерелом цинку й фосфору для рослин. Від себе додамо, що через низький результат розчинності такі сполуки можна розглядати доступними в тривалішій перспективі.

Цікаво, що, згідно з дослідженнями Maclean (1974), Bergmann (1992) та інших учених, внесення фосфорних добрив і вапна знижувало вміст цинку в рослинах, але не вміст доступного цинку в ґрунті. Це, зокрема, вказує на те, що зниження поглинання цинку рослинами після внесення фосфорних добрив не є прямим наслідком утворення нерозчинних сполук цинку й фосфору ззовні від рослин.

Проте низка інших досліджень вказує на зменшення концентрації доступного Zn у ґрунтах із низьким забезпеченням цинком після внесення високих норм фосфорних добрив. Наші дослідження у тривалому стаціонарному досліді (кафедра агрохімії НУБіП України) також свідчать про зниження

вмісту рухомого цинку в ґрунті за тривалого внесення добрив, що може бути наслідком як взаємодії у ґрунтовому розчині, так і більшого рівня винесення цього елемента з урожаями культур.

Є й інші пояснення взаємодії фосфору й цинку в ґрунті. Так, деякі вчені, наприклад, Saeed і Fox, 1979; Loneragan, 1975 та інші, дотримуються думки, що головним чинником впливу фосфору на Zn у ґрунті є вплив P на підвищення сорбції цинку ґрунтом. Адже, сорбція P на поверхні оксидів Fe і Al підвищує їхній негативний заряд, призводячи до підвищеної сорбції Zn.

Узагальнюючи дослідження різних авторів, Bergmann et al. (1992) роблять висновок про те, що внесення високих норм P у ґрунти з високим значенням pH і низьким (до середнього) вмістом цинку, може спричиняти дефіцит цинку, тоді як на ґрунтах із достатнім рівнем цинку дефіцит спостерігається зрідка або й зовсім не спостерігається навіть за внесення фосфорних добрив у великих нормах.

Крім того, у деяких випадках внесення фосфорних добрив може спричиняти навіть підвищення концентрації цинку в рослинах. Це може пояснюватися підвищенням кислотності ризосферного ґрунту (і, відповідно, поглинання цинку) або наявністю домішок цинку у фосфорних добривах. Комерційні добрива, такі як суперфосфати, можуть містити помітні кількості цинку (і кадмію) та також підкислювати ґрунт.

Таким чином, дані щодо безпосередньої взаємодії P і Zn у ґрунті суперечливі, що, очевидно, можна пояснити умовами проведення досліджень. Головним висновком, на наш погляд, тут має бути те, що рослини також беруть активну участь у реакції на взаємодію P і Zn. І тому твердження про неможливість одночасного внесення фосфорних і цинкових добрив, імовірно, не має під собою достатнього підґрунтя.

❷ Іншою причиною називають **явище «ростового розбавлення»**, тобто зменшення концентрації Zn в тканинах рослину в результаті інтенсифікації росту за внесення фосфорних добрив. Проте Marschner (1995) вказує, що зниження поглинання рослинами цинку часто є більшим за рівень, який може бути пояснений лише ефектом розбавлення.

❸ **Взаємодія фосфору й цинку всередині рослини**. Для такої взаємодії навіть існує особливий термін — синдром «*спровокованого фосфором дефіциту цинку*» — підвищення внутрішньорослинної потреби в Zn як реакція на внесення фосфорних добрив і, відповідно, підвищення поглинання P рослинами.

Потрібно зазначити, що за нормальних концентрацій фосфор і цинк всередині рослини виступають синергістами. Адже було встановлено, що дефіцит цинку активує транскрипцію численних генів, що беруть участь в обміні фосфору (*van de Mortel et al., 2006*), а дефіцит фосфору активує експресію генів, відповідальних за гомеостаз цинку в рослині (*Bustos et al., 2010*).

Huang et al. (2000) передбачили, що цинк відіграє ключову роль у регулюванні поглинання фосфору, й показали, що експресія генів, які кодують фосфор-транспортні білки, суворо контролюється, але залежить від фосфорного й цинкового статусу рослин. За умов дефіциту цинку контроль експресії цих генів порушується, що спричиняє акумулювання дуже високих концентрацій фосфору в рослинах.

Але за порушення оптимальної кількості і співвідношення фосфору й цинку, що надходять у рослину, можливі порушення метаболізму.

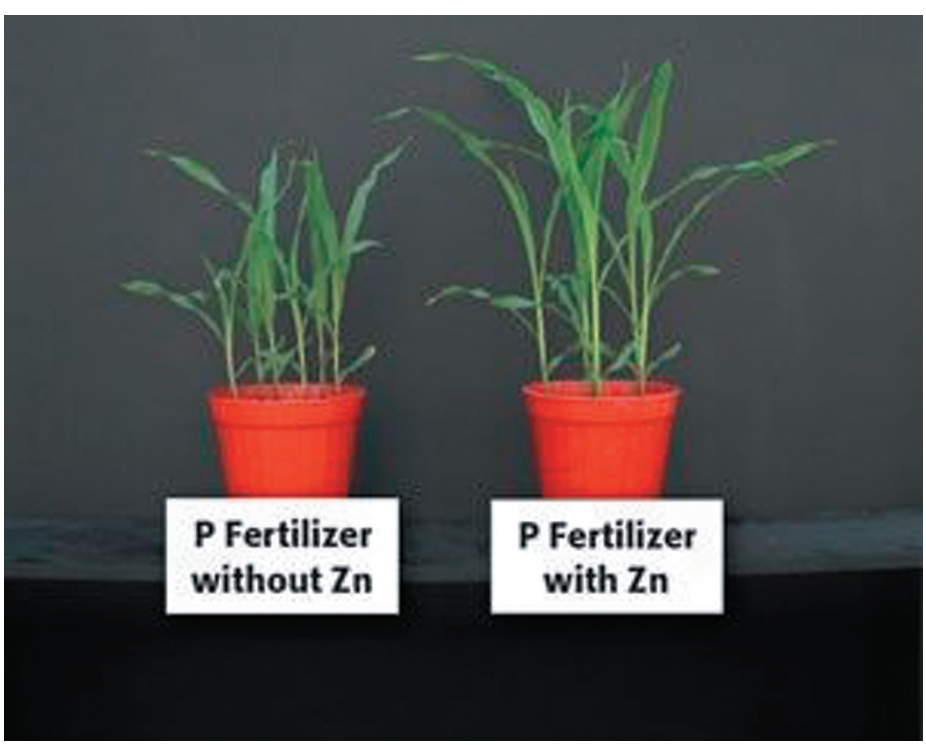
Часто причиною спровокованого фосфором дефіциту цинку називають іммобілізацію цинку в коренях унаслідок високого поглинання P.

Youngdahl et al. (1977) зробили висновок, що високі рівні P спричиняють підвищення концентрації Zn в коренях і зниження — в пагонах. Це передбачає, що взаємодія Zn і P відбувається в коренях і має місце порушення або радіального транспорту Zn у судинну систему, або акропетального транспорту з коренів у надземні частини рослини.

Подібної думки дійшли й дослідники Trier і Bergmann (1974), які експериментально показали, що високі рівні фосфору пригнічують акропетальний транспорт Zn^{2+}, найбільше впливаючи на вміст цинку в листках, тоді як на поглинання іонів Zn^{2+} коренями це впливало значно менше. Проте такий вплив був істотним лише за низького вмісту доступного цинку.

Bhardwaj et al. (2019) вважають можливим утворення комплексів P/Zn у коренях, що попереджає рух P рослиною за високого постачання Zn. Дослідження низки вчених також вказують на можливість утворення фітатів цинку в коренях за високих кількостей Zn (*Cakmak, Marshner, 1987; Hopkins et al., 1998; Rupa et al., 2003*).

Soltangheisi et al. (2014) зазначають, що дефіцит Zn може підвищувати поглинання рослинами фосфору та його транслокацію такою мірою, що P може нагромаджуватись у токсичних рівнях у листках. Це підтверджують



Ріст рослин пшениці з підвищенням норм внесення P в ґрунт із низьким (зліва) і достатнім (справа) вмістом Zn (*джерело: Ova et al., 2015*)

Ознаки нестачі цинку у кукурудзи

дані Cakmak (1988), Huang et al. (2000), Ova et al. (2015) та інших дослідників, які встановили, що за дефіциту цинку в рослинах зазвичай спостерігається аномально високий уміст неорганічного фосфору, а відтак підвищується фізіологічна потреба в цинку. Підтверджено й зворотний процес: дефіцит фосфору призводить до надмірного нагромадження цинку в пагонах.

Культури й сорти істотно різняться за здатністю поглинати та транспортувати цинк. Так, група вчених Zhu et al. (2001) вивчила взаємодію Zn-P для двох сортів пшениці, що різнились за ефективністю поглинання фосфору. Вони встановили, що збільшення доступного Р спричиняло істотне зменшення поглинання цинку на одиницю маси коренів, а також концентрацію цинку в тканинах обох сортів. Причому поглинання й концентрація цинку у фосфор-ефективного сорту була значно нижча. Таким чином було зроблено припущення, що висока ефективність поглинання фосфору може пригнічувати поглинання рослинами цинку і, врешті, спричиняти зменшення концентрації цинку в зерні пшениці, що вирощується на ґрунтах, низько забезпечених фосфором.

Це вказує на необхідність зміни підходу до вирощування різних сортів однієї і тієї самої культури. Адже питання сортової агротехніки, на наш погляд, має величезні перспективи в майбутньому.

Отже, щодо процесів, які впливають на взаємодію P і Zn у рослинах, також немає одностайної думки серед учених. Найчастіше пригнічувальний ефект фосфору спостерігається за вирощування чутливих до нього культур на ґрунтах, бідних на доступний цинк.

4 **Виснаження мікоризи**. Мікориза відіграє велику роль у живленні рослин багатьма маломобільними в ґрунті елементами (зокрема, фосфором і цинком) шляхом подовження гіфів горизонтально й углиб ґрунту, збільшуючи таким чином поверхню для поглинання води та елементів живлення.

Щодо цинку мікориза відповідає за майже 50% загального його поглинання рослинами (Marschner, 2012). За внесення високих норм Р гіфи стають «лінивими», менш розвинутими, що призводить до зниження поглинання рослинами цинку. Отже, високі норми Р можуть знижувати поглинання цинку переважно шляхом зменшення мікоризозалежного шляху поглинання цинку (*Loneragan ma Webb, 1993; Marschner, 2012; Watts-Williams et al., 2013*).

Потрібно зазначити, що рослини з добре розгалуженою кореневою системою, наприклад зернові й трави, загалом не настільки сильно покладаються на мікоризу в процесі поглинання елементів живлення. Однак рослини з відносно слаборозгалуженою кореневою системою й невисокою кількістю кореневих волосків, наприклад бобові, можуть поглинати значну частину елементів живлення через симбіоз із мікоризою.

Очевидно, що після культур, які не утворюють мікоризу, рівень колонізації наступної культури грибами буде знижений (явище, відоме під назвою «синдром пару»). Це може призводити до дефіциту P і Zn на ґрунтах, що мають граничні показники їхнього вмісту.

Проте молекулярний механізм взаємодії фосфору й цинку та вплив на симбіоз із мікоризою поки що недостатньо зрозумілий, є лише невелика кількість публікацій, присвячених цій темі (наприклад, *Cakmak and Marschner, 1986; Zhu et al., 2001; Watts-Williams et al., 2013; Watts-Williams et al., 2017; Ova et al., 2015*).

Таким чином, було науково висвітлено й навіть експериментально підтверджено декілька механізмів, які можуть пояснити зниження забезпечення рослин цинком за внесення високих норм фосфору. При цьому не завжди взаємодія Zn-P може бути охарактеризована як антагонізм. І багато даних вказують на те, що в більшості культур підвищені дози Р не мали негативного впливу на їхній ріст і врожайність, коли відповідно підвищувалось забезпечення рослин цинком.

Це дає підґрунтя вважати, що існують певні співвідношення між Р і Zn, необхідні для підтримки балансу між елементами.

НЕ ЛИШЕ ВМІСТ – А Й СПІВВІДНОШЕННЯ

Звичайно, хотілось би знати певне співвідношення доступного P:Zn в ґрунті, аби попередити можливий дефіцит і виключити взаємодію фосфору й цинку зі списку лімітуючих факторів.

Чеські вчені Sedlar et al. (2018) нещодавно опублікували результати, які свідчать, що за вирощування пшениці на карбонатному ґрунті вміст цинку в рослинах сильніше корелював із співвідношенням P:Zn у ґрунті (екстрагування за методом Мехліх-3), аніж із вмістом доступного цинку в ґрунті (за тим самим методом). А співвідношення P:Zn в рослинах у межах 130:1 не призводило до дефіциту фосфору й відповідало співвідношенню P:Zn в ґрунті в межах від 9,3:1,0 до 14,3:1,0.

Згідно з дослідженнями Takkar et al. (1976), співвідношення P:Zn в ґрунті в межах від 4,0 до 7,5 вказує на помірний дефіцит цинку. За вищих значень співвідношення дефіцит цинку стає відчутнішим, але водночас зростає ймовірність отримання відгуку на внесення цинкових добрив.

Американські консультанти часто вказують на значення 10:1, тобто на 10 мг/кг рухомого фосфору в ґрунті має припадати 1,0 мг/кг доступного цинку. Але тут мається на увазі визначення рухомих сполук фосфору й цинку в

ґрунті за методами, прийнятими у них у країні. В Україні ж для аналізу ґрунту використовують інші методи, тому це співвідношення, на наш погляд, може бути некоректним, оскільки різні витяжки різняться за кількістю сполук, що вилучають із ґрунту.

Звичайно, лише співвідношення P:Zn в ґрунті недостатньо для прийняття рішення щодо внесення добрив. Адже вміст кожного з них може бути низьким, тоді як співвідношення між ними — наближатись до оптимального. Проте таке співвідношення може дати нам можливість спрогнозувати відповідний відгук рослин на внесення добрив: якщо в ґрунті співвідношення P:Zn близьке до оптимального, але абсолютний вміст цинку в ґрунті низький, то внесення фосфорних добрив призведе до ще більшого загострення дефіциту цинку для рослин. Проте за середнього й низького вмісту цинку в ґрунті фосфорні добрива, ймовірно, не чинитимуть такого сильного впливу.

Те саме можна передбачити для ситуації, коли ви намагаєтесь одноразовим внесенням високих норм цинкових добрив підвищити вміст доступного цинку в ґрунті, але водночас не враховуєте вмісту фосфору в ґрунті чи норм внесення фосфорних добрив для наближення співвідношення між ними до оптимального.

Тому, якщо ви маєте обмежений бюджет, то кращим буде менш кардинальне коригування обох елементів, аніж інтенсивне коригування одного з них. Утім, аналіз ґрунту на мікроелементи відомий своєю певною умовністю, тому реальнішу картину можна побачити за використання тканинної діагностики рослин. Саме аналіз рослин дає можливість виявити реальність дефіциту цинку. За проведення такої діагностики зазвичай уміст цинку порівнюють із певним оптимальним рівнем, який залежить як від культури, так і від фази відбору зразка й індикаторного органу. Крім того, для точнішого визначення оптимального рівня елемента необхідне проведення регіональних досліджень, що є досить трудомістким і витратним завданням.

Ознаки дефіциту фосфору на кукурудзі

Альтернативним методом визначення забезпеченості рослин елементами живлення є розрахунок співвідношення різних елементів, зокрема й співвідношення P:Zn, для діагностики дефіциту. Але загалом, такий підхід не набув широкого застосування. Прикладом є система DRIS, яка саме й орієнтована на визначення співвідношення між елементами в рослині, а не їхнього загального вмісту. Ціла низка вчених присвятила свої дослідження встановленню оптимального співвідношення P:Zn в різних рослинах. Зокрема, Brair et al. (1974) відзначив, що максимальної врожайності кукурудзи можливо досягнути за співвідношення P:Zn у рослинах у межах 76-116. Lagett і Brown виявили, що для нормального росту кукурудзи співвідношення має бути 150, а дефіцит Zn проявляється за значень, що перевищують 300.

А згідно з дослідженнями Dennis (1971), «нормальні» співвідношення P:Zn у культурах під час цвітіння становлять (розрахунки від значень вмісту елементів у рослинах у мг/кг): кукурудза — 100, соя — 90, сорго — 125, пшениця — 140, люцерна — 130, цукрові буряки (в середині вегетаційного періоду) — 110. Автор вважає, що врахування співвідношення дуже важливе, адже концентрація всіх елементів може перебувати на «достатньому» рівні, але їхні співвідношення можуть бути недостатні для нормального росту.

Проте в наведених даних є своє обмеження: середина вегетації — не найкращий час для визначення такого співвідношення. Адже, наприклад, помірний дефіцит цинку в кукурудзи може зникати до фази інтенсивного росту, але його нестача на початку вегетації може істотно вплинути на врожайність. А аналіз у фазі викидання волоті чи цвітіння може не виявити дефіциту на початку вегетації.

Крім того, метод встановлення співвідношення P:Zn може варіювати залежно від виду рослин і умов експерименту. І, навпаки, однакового співвідношення можна досягнути за різного загального вмісту. Тому, на наш погляд, для правильного прогнозування об'єктивної потреби та потенційного відгуку на внесення цинку важливо враховувати дані з різних джерел інформації, включаючи ґрунтову й рослинну діагностику, історію поля, прогноз погодних умов тощо.

Таким чином, за внесення фосфорних добрив не можна недооцінювати роль цинку. Розуміння взаємодії між елементами, що впливає на їхню доступність рослинам, може допомогти в прийнятті правильних рішень щодо джерел добрив, способів і строків їхнього внесення.

І. Логінова, консультант із живлення рослин, НВК «Квадрат»

Градація співвідношення P:Zn для деяких культур за дослідженнями Trier і Bergmann (1974)

Рослина (надземна частина), середина вегетації	Співвідношення P/Zn, розраховане з використанням даних вмісту в рослинах (мг/кг)			
	гострий дефіцит Zn	прихований дефіцит Zn	достатнє забезпечення Zn	надлишок Zn
Кукурудза	> 300	300-201	200-50	< 25
Квасоля	> 300	300-201	200-80	< 40
Соняшник	> 400	400-201	200-80	< 50
Картопля	> 300	300-201	200-100	< 60