

РОСЛИННИЦТВО

УДК 631.811:631.417.8-022.513.2

DOI: <https://doi.org/10.47414/nr.32.2024.314608>**Ефективність часткового заміщення макродобрих нанохелатними мікродобривами для підживлення пшениці ярої**

 С. М. Каленська¹,  Н. В. Новицька^{1*},  В. В. Мельниченко²,
 О. П. Чубко³,  В. В. Фещенко⁴

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна, *e-mail: novitska@ukr.net

²Natural Fertilizers Limited, 23 Grattan Court, Celbridge, Co. Kildare, Ireland

³ТОВ «Агротехносоюз», вул. Заводська, 2, с. Путрівка, Фастівський р-н, Київська обл., 08623, Україна

⁴ПП «Поділля-Агрохімсервіс», вул. Максима Залізняка, 3, м. Умань, Черкаська обл., 20304, Україна

Мета. Установити вплив часткового заміщення основних макродобрих нанохелатними мікродобривами (НХМ) на продуктивність пшениці ярої. **Методи.** Дослідження проводили у 2019–2020 рр. на базі кафедри рослинництва Національного університету біоресурсів і природокористування України (м. Київ): польові досліді – у навчально-науковій лабораторії «Демонстраційне колекційне поле сільськогосподарських культур», лабораторні – у лабораторіях «Якості насіння та садивного матеріалу» та «Аналітичні дослідження в рослинництві». Нанохелатні мікродобрива у відповідних до варіанту заміщення пропорціях вносили в підживлення пшениці м'якої ярої згідно з розробленою виробником добрив (Innoparmis Agrosience SRL) схемою заміщення у два етапи: на початку виходу в трубку (ВВСН 30–32) та на початку наливання зерна (ВВСН 71–75). Площа ділянки – 2 м², повторність – шестиразова. **Результати.** Часткове заміщення норми внесення нанохелатними мікродобривами може позитивно вплинути на врожайність пшениці й компенсувати до 30 % норми внесення кожного з макроелементів. У блоці заміщення мінерального азоту нанохелатними мікродобривами найвища достовірна врожайність досягала 3,97 т/га у варіанті N₄₀ + НХМ зі зниженням урожайності відносно контролю 2 на 16,7 %. У блоці заміщення фосфору середня врожайність була нижча й досягала максимального значення на рівні 3,52 т/га у варіантах P₄₀ + НХМ і P₃₀ + НХМ; у блоці заміщення калію зниження врожайності було ще більш суттєвим – вона не перевищувала 3,2 т/га. Відмічено значне зниження – на 3,7–13,1 % маси 1000 насінин у кожному з блоків заміщення макроелементів: 40–41 г за внесення лише N; 37–40 г за внесення лише фосфору або калію. **Висновки.** У системі удобрення зернових колосових культур (на прикладі пшениці) заміщення внесення азотних добрив нанохелатними мікродобривами можливе на 25–30 %, фосфорних і калійних – до 40 % від рекомендованої норми мінеральних добрив, врожайність при цьому становить відповідно 3,97 т/га (N₄₀ + НХМ), 3,52 т/га (P₄₀ + НХМ) і 3,24 т/га (K₄₀ + НХМ).

Ключові слова: нанохелатні мікродобрива; пшениця м'яка яра; підживлення; заміщення макроелементів; урожайність; якість зерна.

Вступ

Питання створення та впровадження нових екологічно безпечних і технологічних препаратів, які стимулюють підвищення ефективності використання рослинами поживних елементів мінеральних добрив і ґрунту, є актуальним для світової аграрної галузі [4, 34, 45]. Завдяки їх впровадженню збільшується врожайність польових культур, якість отриманої продукції та ефективність виробництва загалом [1, 15, 41]. Нанотехнології, зокрема, сьогодні є одними з ключових технологій для вдосконалення традиційних сільськогосподарських практик та тактики управління завдяки зменшенню та збереженню витрат ресурсів [25, 46].

Нанодобрива можуть подолати дефіцит макро- та мікроелементів за рахунок підвищення ефективності використання поживних речовин [31]. Використання нанодобрив має величезний потенціал, оскільки вони створені для регульованого вивільнення поживних речовин залежно від потреб сільськогосподарських культур і цим мінімізують диференціальні втрати. Зокрема, відомо, що азотні добрива характеризуються суттєвими втратами (до 50–70 %) з ґрунту через вимивання чи випаровування, що зрештою знижує їх ефективність і підвищує собівартість продукції [22, 35, 37]. На противагу мінеральним, наноформули азотитних добрив синхронізують «викид» добрива-N з попитом культури запобігаючи небажаним втратам, уникаючи взаємодії поживних речовин із ґрунтом, водою, повітрям та мікроорганізмами [7, 24]. Використання наноматеріалів на основі цеоліту, глини або хітозану суттєво зменшує втрати азоту за рахунок підвищення процесу його засвоєння [1, 23, 24]. Цеоліти, заряджені амонієм, здатні підвищувати розчинність фосфатних мінералів.

Пролонгована доступність усіх легованих поживних речовин для рослини упродовж повного періоду вирощування є вирішальним для сприяння проростанню, росту, цвітіння та плодоношення [19]. Зокрема, азотне добриво з наноматеріалами гідроксипатиту вивільняє азот повільно та рівномірно упродовж двох місяців, тоді як традиційні азотні мінеральні добрива втрачають азот менш ніж за місяць з нерівномірним вивільненням, що знижує ефективність живлення рослин та негативно впливає на якість урожаю [17].

Контрольовано вивільнені нанодобрива (наночастки) поліпшують ріст і розвиток рослин, сприяють збільшенню врожайності та продуктивності. Добрива з наноструктурою можуть підвищити ефективність використання поживних речовин за допомогою таких механізмів як цільова доставка, повільне або контрольоване вивільнення. Вони можуть точно вивільнити свої активні інгредієнти у відповідь на екологічні тригери та біологічні вимоги [12, 36]. Зміни, які відбуваються в рослинах під впливом нанодобрив, також залежать від сортових особливостей та фази розвитку рослин [11, 27, 32]. Водночас використання нанопрепаратів у технологіях вирощування сільськогосподарських культур може викликати зниження техногенного навантаження на природне середовище [13, 14, 16].

Наночастки впливають на біологічні об'єкти на клітинному рівні, вносячи свою надлишкову енергію, що підвищує ефективність проходження процесів у рослинах, беруть участь у формуванні мікроелементного балансу, тобто є біоактивними. Наноформи таких металів, як залізо, цинк і мідь, на відміну від їх солей, потенційно менш токсичні [6, 18, 32]. Вони витрачаються поступово, генерують за потреби іони та електрони, швидко включаються в біохімічні реакції в момент утворення. Таким чином, досягається пролонгуючий ефект живлення рослин з величезної питомої поверхні (сотні квадратних метрів на один грам речовини), що містить безліч оточених оболонкою іонів. Препарати вносяться в мікродозах і не забруднюють середовище. Вони, беручи участь у процесах переносу електронів, посилюють дію ферментів, перетворюють нітрати в амонійний азот, розширюють можливості впливу на дихання клітин, фотосинтез, синтез ферментів і амінокислот, вуглеводний і азотний обмін, а також безпосередньо впливають на мінеральне живлення рослин. Маючи високу рухливість, взаємодіють один з одним і можуть конгломерувати на поверхні рослин, регулюючи цільові ефекти [28, 33, 35].

Установлено, що наночастки міді, заліза, цинку володіють бактерицидними властивостями й можуть доповнювати і підсилювати традиційні засоби захисту [6, 26]; наночастки заліза прискорюють ріст рослин, магнію – стимулюють фотосинтез рослин [8, 20].

Бактерицидна дія наночасток міді, заліза та цинку пояснюється тим, що в ґрунті вони поступово окислюються і створюють на поверхні насіння середовище, несприятливе для патогенної мікрофлори. При цьому уражаються (на відміну від рослин і живих істот) найменш енергоємні оболонки клітин бактерій, зокрема внаслідок інгібування ферментів дихального ланцюга [3, 20, 24, 29, 42].

Безсумнівні перспективи розвитку і широкого використання нанодобрих полягають у тому, що вони сприяють підвищенню врожайності, валових зборів сільськогосподарських культур та якості продукції; збільшують ефективність використання елементів живлення та їх цільове використання, позитивно позначаються на зниженні токсикологічного навантаження на довкілля завдяки значному зменшенню валових об'ємів внесення добрив та пестицидів [10, 13, 16].

Мета досліджень – установити вплив часткового заміщення основних макродобрих нанохелатними мікродобривами на продуктивність пшениці ярої.

Матеріали та методика досліджень

Польовий дрібноділянковий дослід закладали в навчально-науковій лабораторії «Демонстраційне колекційне поле сільськогосподарських культур» кафедри рослинництва Національного університету біоресурсів і природокористування України (м. Київ). Лабораторні дослідження проводили в лабораторіях кафедри рослинництва НУБіП України «Якості насіння та садивного матеріалу» та «Аналітичні дослідження в рослинництві».

Ґрунти ННВ «Демонстраційне колекційне поле сільськогосподарських культур» кафедри рослинництва переважно сірі лісові грубопилувато-легкосуглинкові за гранулометричним складом. Гумусовий горизонт цих ґрунтів досягає 50–60 см, уміст гумусу в орному шарі – 2,1–3,0 %, реакція ґрунтового розчину слабкокисла (рН = 5,8–6,1), щільність ґрунту – 1,1–1,2 г/см³, повна вологоємність ґрунту – 39–40 %.

За температурним режимом 2019 рік належить до нетипових, оскільки середня температура в період квітень – жовтень перевищувала багаторічне значення на 1,6 °С (16,5 °С). Слід відмітити, що нетиповими були квітень, вересень та серпень, а аномальними умовами характеризувався червень (Кс 2,4). Сумарна кількість опадів за цей період становила 302,5 мм, що на 61,1 мм менше за багаторічне значення, але основна їх частина випала в першій половині вегетації, що позитивно впливало на ріст та формування продуктивності ярих культур. ГТК за період квітень – жовтень становив 0,9, тобто засушливі умови, а в окремі місяці засушливим був лише червень (ГТК = 0,8), тоді як у квітні, травні та липні було достатнє зволоження. Серпень, вересень та жовтень характеризувалися сухими умовами (ГТК = 0,3–0,4), проте це несуттєво обмежувало продуктивність ранньостиглих культур (табл. 1).

Таблиця 1

Особливості погодних умов в роки проведення досліджень

Рік	Місяць							IV–X
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
Коефіцієнти суттєвості відхилення опадів*								
2019	0,3	1,1	–0,5	0,0	–0,8	–0,5	–0,9	–0,6
2020	–1,3	–0,8	–1,9	–1,2	–0,7	–0,8	1,5	–2,0
Гідротермічний коефіцієнт (ГТК)**								
2019	2,6	1,6	0,8	1,2	0,3	0,4	0,3	0,9
2020	0,1	0,4	0,2	0,5	0,3	0,1	2,3	0,5

* незафарбовані – типові умови (Кс –1 ... 1); блідо-синій – нетипові холодні умови (Кс –2 ... –1); блідо-оранжевий – нетипово теплі умови (Кс 1 ... 2); темно-оранжевий – аномальні, близькі до рідкісних (Кс > 2);

** ГТК > 1,6 – надмірне зволоження, ГТК 1,3–1,6 – вологі умови, ГТК 1,0–1,3 – слабкопосушливі умови, ГТК 0,7–1,0 – посушливі умови, ГТК 0,4–0,7 – дуже посушливі умови, ГТК < 0,4 – сухі умови.

Температурний режим 2020 р. був теж нетиповим (Кс 1,5), оскільки умови травня були нетипово прохолодними (Кс -1,4), червня – нетипово теплими (Кс 1,5), а вересень та жовтень були аномально жаркими. Сумарна кількість опадів за квітень – жовтень становила 156,6 мм, (на 207 мм менше багаторічного значення), а 45 % від нього випало в жовтні, тобто були непродуктивними для сільськогосподарських культур. За комплексом характеристик умови року були дуже посушливими (ГТК = 0,5), а в період активної вегетації рослин (квітень – вересень) характеризувався сухими умовами (за винятком липня – ГТК = 0,5). Схожі погодно-кліматичні умови в роки проведення досліджень дали змогу пшениці ярій сформувати врожайність практично на одному рівні.

Дослідження 2019–2020 рр. були спрямовані на доведення можливості часткового заміщення основних макродобрих нанохелатними мікродобривами в системі удобрення пшениці ярої (табл. 2). У дослідженнях використовували зареєстровані в Україні нанохелатні мікродобрива (НХМ) виробництва Innoparmis Agroscience SRL (Registration Number: BE0799.218.434. Rue Cervantes, 4, 1190 – Forest. Belgium): НХМ Супер Мікро Плюс, НХМ Залізо 10 %, НХМ Фосфор 25 %, НХМ Калій 23 %, НХМ Цинк 20 %, НХМ Магній 25 %, НХМ Марганець 25 %, НХМ Кальцій 25 %, НХМ Мідь 15 %.

Нанохелатні мікродобрива у відповідних до варіанту заміщення пропорціях вносили в підживлення пшениці м'якої ярої згідно з розробленою виробником добрив (Innoparmis Agroscience SRL) схеми заміщення у два етапи: на початку виходу в трубку (ВВСН 30–32) та на початку наливання зерна (ВВСН 71–75).

Таблиця 2

Схема дослідів по частковому заміщенню макродобрих

№	Варіант удобрення	Норми (кг/га д. р.) внесення добрив										
		N	P	K	Супер Мікро Плюс	залізо 10 %	калій 23 %	цинк 20 %	фосфор 25 %	магній 25 %	марганець 25 %	мідь 15 %
0	Контроль 1 (без добрив)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1	Контроль 2 (N ₂₀ P ₆₀ K ₆₀ +N ₂₀ +N ₂₀)	60	60	60	–	–	–	–	–	–	–	–
2	N ₅₀ + НХМ	50	–	–	3	1	2	1	–	–	0,2	0,2
3	N ₄₀ + НХМ	40	–	–	3	1	2	1,5	–	–	0,2	0,2
4	N ₃₀ + НХМ	30	–	–	3	1	3	2	–	–	0,2	0,2
5	P ₅₀ + НХМ	–	50	–	4	1	3	2	–	–	0,2	0,2
6	P ₄₀ + НХМ	–	40	–	3	1	2	1	0,5	0,2	0,2	0,2
7	P ₃₀ + НХМ	–	30	–	3	1	2	1	1	0,5	0,2	0,2
8	P ₂₀ + НХМ	–	20	–	4	0,5	2	1	1,5	0,5	0,2	0,2
9	P ₁₀ + НХМ	–	10	–	4,5	–	2,5	1	2	–	0,2	0,2
10	K ₅₀ + НХМ	–	–	50	2	1	3	1	–	–	–	0,2
11	K ₄₀ + НХМ	–	–	40	2	1	3,5	1	–	–	–	0,2
12	K ₃₀ + НХМ	–	–	30	2	1	4	1	–	–	–	0,2
13	K ₂₀ + НХМ	–	–	20	2	1	5	1	–	–	–	0,2
14	K ₁₀ + НХМ	–	–	10	2	0,5	6	1	–	–	–	0,2

Дослідження проводили в посівах сорту пшениці м'якої ярої 'Елегія Миронівська', норма висіву – 5 млн схожих насінин на гектар, ширина міжряддя – 15 см. Мінеральні макродобрива вносили: N₂₀P₆₀K₆₀ – у передпосівну культивуацію + N₂₀ – на початку виходу в трубку (ВВСН 30–32) + N₂₀ – у фазі колосіння (ВВСН 51–59). 'Елегія Миронівська' – один із кращих ранніх сортів пшениці української селекції. Належить до високоврожайних пшениць сильного типу. Придатна для ранньої сівби і формує врожайність до 6,5 т/га. Висота рослин – 90–100 см, маса 1000 зерен – 46,7 г, натура зерна – 740 г/л, вміст «сирої» клейковини – 28 %, білка – 15,7 %, «сила» борошна – 320 о. а.

Дослідження проводили відповідно до методик проведення польових дослідів [40]. Розміщення ділянок систематичне. Польові дослідження проводили дрібноділянковим методом. Площа облікової ділянки – 5 м², за шестиразового повторення. Визначення врожайності основної та побічної продукції проводили поділяночно, методом суцільного обліку з використанням ручного комбайну Minibatt. Отриману масу зерна пшениці ярої перераховували на урожай з 1 га з урахуванням засміченості та вологості в перерахунку на 14 % (ДСТУ 7011:2009). Перед обмолочуванням відбирали «пробний сніп» з кожного варіанту з 1 м. п. для встановлення структури врожаю.

Якість зерна визначали в лабораторії «Аналітичні дослідження в рослинництві» з використанням методу інфрачервоної спектрометрії на приладі «INXMrates 1241 FOSS».

Статистично результати досліджень обробляли методом дисперсійного аналізу з використанням прикладної програми Statistica 10 [44].

Результати досліджень

Рослинний організм не може нормально функціонувати в умовах дефіциту або нестачі поживних речовин, адже вони регулюють ріст вегетативної маси та активізують ріст кореневої системи, приймають участь в утворенні органічних сполук та процесах фотосинтезу й синтезу хлорофілу, підвищують зимостійкість, стійкість до хвороб, шкідників та стресових умов, допомагають регулювати водний баланс, забезпечують транспорт цукрів та інших поживних речовин [39]. Зважаючи на проведені дослідження (табл. 3), жоден з макроелементів не здатен самостійно забезпечити нормальне протікання усіх важливих процесів в рослинах пшениці ярої. Водночас виключення будь-якого макроелемента із загального комплексу удобрення культури призводить до «просідання» того чи іншого життєво необхідного для рослини процесу, і як наслідок, негативно впливає на врожайність.

Таблиця 3

Урожайність пшениці ярої 'Елегія Миронівська' за заміщення макродобрих нанохелатними мікродобривами (2019–2020 рр.)

Варіант удобрення	2019	2020	Середнє	± до контролю 1		± до контролю 2	
				т/га	%	т/га	%
0 Контроль 1 (без добрив)	2,35	2,15	2,25	–	–	–2,51	–52,7
1 Контроль 2 (N ₂₀ P ₆₀ K ₆₀ +N ₂₀ +N ₂₀)	4,94	4,57	4,76	+2,51	+211,6	–	–
2 N ₅₀ + НХМ	4,04	3,78	3,91	+1,66	+173,8	–0,85	–17,9
3 N ₄₀ + НХМ	4,08	3,85	3,97	+1,72	+176,4	–0,80	–16,7
4 N ₃₀ + НХМ	3,69	3,55	3,62	+1,37	+160,9	–1,14	–23,9
5 P ₅₀ + НХМ	3,42	3,31	3,37	+1,12	+149,8	–1,40	–29,3
6 P ₄₀ + НХМ	3,53	3,51	3,52	+1,27	+156,4	–1,24	–26,1
7 P ₃₀ + НХМ	3,54	3,49	3,52	+1,27	+156,4	–1,24	–26,2
8 P ₂₀ + НХМ	3,23	3,20	3,22	+0,97	+143,1	–1,55	–32,5
9 P ₁₀ + НХМ	2,87	2,83	2,85	+0,60	+126,7	–1,91	–40,1
10 K ₅₀ + НХМ	3,28	3,15	3,22	+0,97	+143,1	–1,55	–32,5
11 K ₄₀ + НХМ	3,29	3,18	3,24	+0,99	+144,0	–1,53	–32,0
12 K ₃₀ + НХМ	3,24	3,16	3,20	+0,95	+142,2	–1,56	–32,8
13 K ₂₀ + НХМ	2,86	2,82	2,84	+0,59	+126,2	–1,92	–40,3
14 K ₁₀ + НХМ	2,82	2,74	2,78	+0,53	+123,6	–1,98	–41,6
НІР _{0,05}	0,11	0,08	0,15	–	–	–	–

Зокрема, у варіанті досліду без добрив урожайність пшениці ярої становила лише 2,25 т/га, тобто зниження врожайності за відсутності внесення всієї норми мінеральних добрив досягало 53 %. Пшениця належить до азотозалежних польових культур і більш суттєво реагує

на відсутність мінерального азоту в системі удобрення, ніж фосфору і калію. Відсутність у системі живлення пшениці фосфорно-калійних мінеральних добрив (2–4 варіанти досліду) менш знижувала врожайність, лише на 16–24 %. Проте однокомпонентне мінеральне фосфорне або калійне живлення без азотних добрив знижувало врожайність більш суттєво – на 30–40 %.

Нанодобрива підтвердили свою високу фізіологічну активність шляхом швидшого включення в обмінні процеси в рослинах, проте врожайність пшениці ярої в блоках заміщення окремих макроелементів була менша на 20–30 %, ніж за внесення повної норми NPK через неповну реалізацію генетичного потенціалу продуктивності та нижчі параметри ряду інших ознак, які прямо впливають на врожайність – густота стояння посівів, площа листкової поверхні, виживання. Це пояснюється тим, що всі макро- і мікроелементи рівнозначні у фізіологічному відношенні і роль їх у формуванні врожаю різна залежно від ступеня задоволення потреб рослин. Рівень урожаю найбільше залежить від того фактора, якого рослині найбільше не вистачає, тобто від фактора, що знаходиться у найбільш глибокому мінімумі (закон Лібіха). Тому врожайність пшениці ярої, вирощеної за однокомпонентного удобрення нижча, ніж за комплексної норми NPK, оскільки елемент, який повністю відсутній або не знаходиться в потрібній кількості, заважає іншим поживним сполукам проявляти їх ефект або, принаймні, зменшує їх позитивну дію.

Як показали наші дослідження, часткове заміщення норми внесення макродобрив нанохелатними мікродобривами може позитивно вплинути на врожайність пшениці і компенсувати до 30 % норми внесення кожного з макроелементів. У блоці заміщення мінерального азоту нанохелатними мікродобривами (2–4 варіанти) найвища достовірна врожайність досягала 3,97 т/га на варіанті N₄₀ + НХМ зі зниженням врожайності відносно контролю 2 на 16,7 %. У блоці заміщення фосфору середня врожайність була нижча і досягала максимального значення на рівні 3,52 т/га на варіантах P₄₀ + НХМ і P₃₀ + НХМ; в блоці заміщення калію зниження врожайності було ще більш суттєвим, урожайність пшениці не перевищувала 3,2 т/га (рис. 1).



Рис. 1. Середня за 2019–2020 рр. врожайність пшениці ярої ‘Елегія Миронівська’ в досліді із заміщенням макродобрив нанохелатними мікродобривами

На графічному зображенні (рис. 1) середньої за роки проведення досліджень урожайності пшениці ярої чітко прослідковується загальна для заміщення NPK

нанохелатними мікродобривами залежність, яка проявляється у деякому підвищенні (до певної межі) врожайності культури при зменшенні норми внесення макродобрих. Зокрема, врожайність у блоці заміщення азотних добрив врожайність зростає до заміщення нанодобривами 30 % рекомендованої норми, у блоці фосфорних і калійних в середньому до 45 % норми і становить відповідно 3,97 т/га ($N_{40} + \text{НХМ}$), 3,52 т/га ($P_{40} + \text{НХМ}$) і 3,24 т/га ($K_{40} + \text{НХМ}$) при врожайності на контролі 4,76 т/га. Таку суттєву частку заміщення мінеральних добрив нанодобривами можна пояснити позакореневим внесенням останніх безпосередньо на листя, що призводить до скорочення часової затримки між внесенням і поглинанням рослиною, а також високою ефективністю і швидкістю негайного використання поживних речовин, необхідних рослині в даний період часу для максимального росту та врожаю. Подібні результати досліджень відмічені в працях Hasan і Saad [9], які вказують про можливість 50 % заміщення мінеральних добрив добривами з наночастками, що зменшує надмірне використання мінеральних добрив і знижує токсичність ґрунту. Заміщення нанохелатними мікродобривами більше 50 % рекомендованої норми внесення мінеральних добрив є недоцільним через суттєве зниження врожайності культури.

Разом з цим варто відмітити досить високий загальний рівень урожайності (3–4 т/га) за вирощування пшениці ярої на понижених нормах внесення NPK. Компенсація NPK нанохелатними мікродобривами виробництва Innoparmis Agrosience SRL, які у своєму складі містять наночастки фізіологічно важливих металів (мідь, залізо, магній та ін.) з високою біодоступністю, швидкістю поглинання рослинними клітинами та мінімальними втратами поживних речовин підтвердила високу ефективність. Наночастки мають велику площу поверхні, високу сорбційну здатність та кінетику з контрольованим вивільненням у цільових місцях, що робить їх «розумною» системою доставки. Тобто, перевага заміщення NPK нанохелатними мікродобривами по-перше в їх комплексному складі і по-друге – позакореновому внесенню, яке сприяє швидкому включенню в метаболічні процеси рослини без втрат і забруднення навколишнього середовища.

В оглядовій статті Alhasan [2] вказується, що позакореневе внесення нанодобрив безпосередньо призводить до скорочення часової затримки між внесенням і поглинанням рослиною під час фази швидкого росту, а також може покращити ефективність і швидкість негайного використання поживної речовини, необхідні рослині для максимального росту та врожаю. Застосування нанодобрив збільшило довжину колоса, кількість колосів, кількість насінин в колосі, масу насіння та кількість днів до повної стиглості. Загалом застосування нанобіологічних добрив збільшило ріст культур і покращило врожайність і компоненти врожайності завдяки подовженню періоду вирощування.

Внесення азоту в підживлення в кінці кушення – на початку виходу в трубку (III е. о.) та у фазі колосіння (VII е. о.) призводить до збільшення довжини, озерненості колоса і маси 1000 насінин, виповненості зерна і т. д., тому прийнято вважати, що замінити в повній мірі макроелемент азот на ряд мікроелементів неможливо. У наших дослідках аналіз показників індивідуальної продуктивності пшениці якої (табл. 4) засвідчив, що заміщення внесення азотних добрив нанохелатними мікродобривами можливе в незначних, на 20–30 %, нормах зменшення азоту, тоді як фосфорних і калійних – не вище 40–50 %. Зокрема, маса 1000 насінин пшениці ярої в блоках заміщення N, P і K нанодобривами перевищувала навіть показник 42,8 г на контролі з внесенням $N_{60}P_{60}K_{60}$ і досягала відповідно 41,2 г ($N_{40} + \text{НХМ}$), 40,5 г ($P_{30} + \text{НХМ}$) і 40,2 г ($K_{30} + \text{НХМ}$). Загалом слід відзначити значно нижчі – на 3,7–13,1 % відносно контролю показники маси 1000 насінин в кожному з блоків заміщення: 40–41 г за внесення лише N; 37–40 г за внесення лише фосфору або калію. За вирощування пшениці без добрив маса 1000 насінин становила лише 31,2 г, нижче контролю на 27 %.

По окремих варіантах заміщення мікроелементів нанохелатними мікродобривами – $N_{40} + \text{НХМ}$ та $K_{50-30} + \text{НХМ}$ відмічено також перевищення показників кількості зерен у колосі та маси зерна з колоса. Отримані результати співзвучні з результатами Hasan і Saad [9], Mardalipour та ін. [21], які у своїх дослідженнях теж показали перевагу обробки посівів пшениці нанодобривами над мінеральними добривами за площею листя, кількістю колосків,

кількістю зерен, масою 1000 зерен і врожайністю культури загалом. Joshi та ін. [14] відмічали збільшену вдвічі кількість зерен у колосі пшениці за обробки насіння перед сівбою нанодобривами.

Таблиця 4

**Індивідуальна продуктивність рослин пшениці ярої ‘Елегія Миронівська’
залежно від заміщення макроелементів нанохелатними мікродобривами
(середнє за 2019–2020 рр.)**

Варіант удобрення		Висота рослин, см	Довжина колоса, см	Кількість зерен у колосі, шт.	Маса зерна з колоса, г	Маса 1000 насінин	
						г	% відносно контролю 2
0	Контроль 1 (без добрив)	84,5	10,4	17,2	0,54	31,2	–27,1
1	Контроль 2 (N ₂₀ P ₆₀ K ₆₀ +N ₂₀ +N ₂₀)	85,7	11,8	26,5	1,13	42,8	–
2	N ₅₀ + НХМ	80,2	11,7	23,0	0,93	40,4	–5,6
3	N ₄₀ + НХМ	80,1	11,6	22,9	0,95	41,2	–3,7
4	N ₃₀ + НХМ	87,2	11,7	21,4	0,86	40,2	–6,1
5	P ₅₀ + НХМ	87,2	11,5	20,5	0,80	39,2	–8,4
6	P ₄₀ + НХМ	82,1	11,6	20,8	0,84	40,2	–6,1
7	P ₃₀ + НХМ	86,6	11,3	20,7	0,84	40,5	–5,4
8	P ₂₀ + НХМ	83,8	11,4	19,4	0,77	39,5	–7,7
9	P ₁₀ + НХМ	82,8	11,2	18,1	0,68	37,4	–12,6
10	K ₅₀ + НХМ	87,3	11,8	19,2	0,77	40,0	–6,5
11	K ₄₀ + НХМ	88,4	11,2	19,2	0,77	40,1	–6,3
12	K ₃₀ + НХМ	85,1	11,1	19,0	0,76	40,2	–6,1
13	K ₂₀ + НХМ	83,4	11,3	17,4	0,68	38,9	–9,1
14	K ₁₀ + НХМ	82,4	11,2	17,8	0,66	37,2	–13,1
НІР _{0,05}		2,2	2,2	0,4	1,5	0,08	

Якісні показники зерна пшениці обумовлюються всім комплексом технологічних факторів, але визначальним є забезпечення рослин елементами живлення. Доведена можливість (табл. 5) підвищення якості зерна пшениці шляхом заміщення в технології вирощування мінеральних добрив нанохелатними мікродобривами. Внесення базових добрив N₆₀P₆₀K₆₀ під пшеницю озиму сприяло підвищенню синтезу білка в зерні – з 11,4 у варіанті без добрив до 14,8 %. За застосування НХМ у блоці заміщення азотних добрив (вар. 2–4) уміст білка в зерні збільшувався на 0,3–1,1 % відносно контрольного варіанту – від 15,1 до 15,9 %. Уміст білка в зерні зростав до 15,3–15,8 % за збільшення до 76 % частки заміщення мінеральних РК добрив нанодобривами – P_{10–20} + НХМ і K_{10–20} + НХМ. За підживлення посівів нанодобривами K_{50–30} + НХМ та P₅₀ + НХМ тенденція щодо збільшення вмісту білка в зерні зберігалася, але показники були дещо нижчими.

Подібні результати отримали також дослідники Sheoran та ін. [30], Zhang та ін. [38], які спостерігали за впливом позакореневого внесення нанодобрив цинку на ріст рослин пшениці і виявили перевищення більш ніж 20 % вмісту білка в зерні та значне збільшення фотосинтетичних пігментів порівняно зі звичайним позакореневим внесенням мінерального цинковмісного добрива. Також результати дворічного експерименту Behboudi та ін. [5] засвідчили збільшення вмісту білка в зерні за рахунок нанодобрив порівняно з контролем, як за умов повного зрошення, так і за умов посухи. Приріст був найвищим в умовах дефіциту води при обробці нано-Zn, дещо нижчим – нано-Si, внаслідок зниження врожайності в умовах посухи та збільшення вмісту азоту в зерні.

Таблиця 5

Якість зерна пшениці ярої 'Елегія Миронівська' залежно від заміщення макроелементів нанохелатними мікродобривами (середнє за 2019–2020 рр.)

Варіант удобрення	Вологість, %	Уміст білка, %	Натура зерна, г/л
0 Контроль 1 (без добрив)	11,0	11,4	680
1 Контроль 2 (N ₂₀ P ₆₀ K ₆₀ +N ₂₀ +N ₂₀)	11,1	14,8	717
2 N ₅₀ + НХМ	11,1	15,9	690
3 N ₄₀ + НХМ	11,1	15,1	655
4 N ₃₀ + НХМ	11,4	15,6	712
5 P ₅₀ + НХМ	11,5	14,3	667
6 P ₄₀ + НХМ	11,6	14,5	716
7 P ₃₀ + НХМ	11,6	15,1	720
8 P ₂₀ + НХМ	11,4	15,5	705
9 P ₁₀ + НХМ	11,8	15,3	709
10 K ₅₀ + НХМ	12,1	15,1	684
11 K ₄₀ + НХМ	12,0	15,0	666
12 K ₃₀ + НХМ	12,1	15,6	709
13 K ₂₀ + НХМ	12,3	15,8	671
14 K ₁₀ + НХМ	12,1	15,8	676
НІР _{0,05}	1,2	0,6	28

Розрахунок кореляційної залежності ознак засвідчив (табл. 6), що заміщення основних макроелементів нанохелатними мікродобривами прямо впливає на формування урожайності пшениці, при цьому найбільше впливають азотні добрива ($r = 0,99$), дещо менше фосфорні ($r = 0,97$) та калійні ($r = 0,94$). Доведено чітку тісну пряму залежність умісту білка в зерні та частки нанохелатних мікродобрив – у блоці з внесенням азоту $r = 0,99$, у блоці з внесенням фосфору $r = 0,79$ та у блоці з внесенням калію $r = 0,69$.

Таблиця 6

Кореляція між різними ознаками пшениці залежно від заміщення нанодобривами (лінійна кореляція Пірсона)

Варіант	Вміст білка	Маса 1000 насінин	Натура	Урожайність
У блоці з внесенням азоту				
Удобрення	0,99**	–0,36*	–0,39*	0,99**
Вміст білка	–	0,06 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,93**
Маса 1000 насінин	–	–	0,99**	–0,32*
Натура	–	–	–	–0,34*
У блоці з внесенням фосфору				
Удобрення	0,79**	0,13 ^{ns}	–0,46*	0,97**
Вміст білка	–	0,15 ^{ns}	–0,76**	0,86**
Маса 1000 насінин	–	–	–0,01 ^{ns}	0,32*
Натура	–	–	–	–0,53**
У блоці з внесенням калію				
Удобрення	0,69**	0,69**	0,02 ^{ns}	0,94**
Вміст білка	–	–0,91**	–0,50**	–0,70**
Маса 1000 насінин	–	–	0,67**	0,68**
Натура	–	–	–	0,18 ^{ns}

* зв'язок статично значущий на рівні $p < 0,001$;

** зв'язок статично значущий на рівні $p < 0,05$; ns – зв'язок статично недостовірний, $p > 0,05$.

Висновки

Результати досліджень підтвердили можливість часткового заміщення окремих макроелементів нанохелатними мікродобривами виробництва Innoparmis Agrosience SRL у системі підживлення посівів пшениці ярої. У системі удобрення зернових колосових культур (на прикладі пшениці) заміщення внесення азотних добрив нанохелатними мікродобривами можливе на 25–30 %, фосфорних і калійних – до 40 % від рекомендованої норми мінеральних добрив, врожайність при цьому становить відповідно 3,97 т/га ($N_{40} + HXM$), 3,52 т/га ($P_{40} + HXM$) і 3,24 т/га ($K_{40} + HXM$). У деяких випадках заміщення NPK добрив відмічено перевищення на 3 % кількості зерен у колосі і на 5 % маси зерна з колоса.

Використана література

1. Abdel-Aziz H. M. M., Hasaneen M. N. A., Omer A. M. Nano chitosan-NPK fertilizer enhances the growth and productivity of wheat plants grown in sandy soil. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2016. Vol. 14, Iss. 1. Article e0902. doi: 10.5424/sjar/2016141-8205
2. Al-Juthery H. W. A., Lahmoud Nabil. R., Alhasan Ali. S. et al. Nano-Fertilizers as a Novel Technique for Maximum Yield in Wheat Biofortification (Article Review). *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1060. Article 012043. doi: 10.1088/1755-1315/1060/1/012043
3. Arora S., Sharma P., Kumar S. et al. Gold-nanoparticle induced enhancement in growth and seed yield of *Brassica juncea*. *Plant Growth Regulation*. 2012. Vol. 66. P. 303–310. doi: 10.1007/s10725-011-9649-z
4. Batsmanova L., Taran N., Konotop Y. et al. Use of a colloidal solution of metal and metal oxide-containing nanoparticles as fertilizer for increasing soybean productivity. *Journal of Central European Agriculture*. 2020. Vol. 21, Iss. 2. P. 311–319. doi: 10.5513/JCEA01/21.2.2414
5. Behboudi F., Tahmasebi Sarvestani Z., Kassae M. Z. et al. Evaluation of chitosan nanoparticles effects on yield and yield components of barley (*Hordeum vulgare* L.) under late season drought stress. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*. 2018. Vol. 3, Iss. 1. P. 22–39. doi: 10.22090/jwent.2018.01.003
6. Davarpanah S., Tehranifar A., Davarynejad G. et al. Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality. *Scientia Horticulturae*. 2016. Vol. 210. P. 57–64. doi: 10.1016/j.scienta.2016.07.003
7. Dwivedi S., Saquib Q., Al-Khedhairi A. A., Musarrat J. Understanding the role of nanomaterials in agriculture. *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity* / D. P. Singh, H. B. Singh, R. Prabha (Eds). New Delhi, India : Springer, 2016. P. 271–288.
8. El-Feky S. A., Mohammed M. A., Khater M. S. et al. Effect of magnetite nano-fertilizer on growth and yield of *Ocimum basilicum* L. *International Journal of Indigenous Medicinal Plants*. 2013. Vol. 46, Iss. 3. P. 1286–1293.
9. Hasan B., Saad T. Effect of Nano Biological and Mineral Fertilizers on Growth and Yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Indian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 46, Iss. 8. P. 97–101.
10. Heffer P., Prud'homme M. Fertilizer Outlook 2012–2016. International Fertilizer Industry Association (IFA). Paris, France, 2012.
11. Iqbal M., Raja N. I., Hussain M. et al. Effect of silver nanoparticles on growth of wheat under heat stress. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*. 2019. Vol. 43. P. 387–395. doi: 10.1007/s40995-017-0417-4
12. Iravani S. Green synthesis of metal nanoparticles using plants. *Green Chemistry*. 2011. Vol. 13. P. 2638–2650. doi: 10.1039/c1gc15386b
13. Joshi A., Kaur S., Dharamvir K. et al. Multi-walled carbon nanotubes applied through seed-priming influence early germination, root hair, growth and yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2018. Vol. 98, Iss. 8. P. 3148–3160. doi: 10.1002/jsfa.8818
14. Joshi A., Thakur N., Verma G. et al. Qualitative Assessment of MWCNT-Treated Grains of Some Food Cereals: Life Sciences-Botany. *International Journal of Life Science and Pharma Research*. 2022. L61–L73. doi: 10.22376/ijlpr.2023.13.1.SP1.L61-73

15. Kalenska S., Novytska N., Stolyarchuk T. et al. Nanopreparations in technologies of plants growing. *Agronomy Research*. 2021. Vol. 19(S1). P. 795–808. doi: 10.15159/AR.21.017
16. Kole C., Kole P., Randunu K. M. et al. Nanobiotechnology can boost crop production and quality: First evidence from increased plant biomass, fruit yield and phytomedicine content in bitter melon (*Momordica charantia*). *BMC Biotechnology*. 2013. Vol. 13. Article 37. doi: 10.1186/1472-6750-13-37
17. Kottegoda N., Munaweera I., Madusanka N., Karunaratne V. A green slow-release fertilizer composition based on urea-modified hydroxyapatite nanoparticles encapsulated wood. *Current Science*. 2011. Vol. 101, Iss. 1. P. 73–78. URL: <https://www.jstor.org/stable/24077865>
18. Kravchenko Y., Lopatko R., Aftandilyants Y., Trach V. The effect of colloidal nanoparticles on plant growth, phytotoxicity and crop yields. *Fertilizer Technology*. 2015. Vol. 1. P. 689–724.
19. Lateef A., Nazir R., Jamil N. et al. Synthesis and characterization of zeolite based nano-composite: An environment friendly slow release fertilizer. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2016. Vol. 232. P. 174–183. doi: 10.1016/j.micromeso.2016.06.020
20. Long S. P., Zhu X. G., Naidu S. L., Ort D. R. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? *Plant, Cell & Environment*. 2006. Vol. 29, Iss. 3. P. 315–330. doi: 10.1111/j.1365-3040.2005.01493.x
21. Mardalipour M., Zahedi H., Sharghi Y. Evaluation of Nano biofertilizer efficiency on Agronomic traits of Spring Wheat at Different Sowing Date. *Biological Forum*. 2014. Vol. 6, Iss. 2. Article 349.
22. Miao Y. F., Wang Z. H., Li S. X. Relation of nitrate N accumulation in dryland soil with wheat response to N fertilizer. *Field Crops Research*. 2015. Vol. 170. P. 119–130. doi: 10.1016/j.fcr.2014.09.016
23. Millan G., Agosto F., Vazquez M. et al. Use of clinoptilolite as a carrier for nitrogen fertilizers in soils of the Pampean regions of Argentina. *Ciencia e Investigación Agraria*. 2008. Vol. 35, Iss. 3. P. 293–302.
24. Panpatte D. G., Jhala Y. K., Shelat H. N., Vyas R. V. Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity. *Nanoparticles: The next generation technology for sustainable agriculture*. New Delhi, India : Springer, 2016. P. 289–300.
25. Preetha S. P., Balakrishnan N. A Review of Nano Fertilizers and Their Use and Functions in Soil. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017. Vol. 62, Iss. 112. P. 3117–3133. doi: 10.20546/ijcmas.2017.612.364
26. Prasad T. N. V. K. V., Sudhakar P., Sreenivasulu Y. et al. Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition*. 2012. Vol. 35, Iss. 6. P. 905–927. doi: 10.1080/01904167.2012.663443
27. Rizwan M., Ali S., ur Rehman M. Z. et al. Effect of foliar applications of silicon and titanium dioxide nanoparticles on growth, oxidative stress, and cadmium accumulation by rice (*Oryza sativa*). *Acta Physiologiae Plantarum*. 2019. Vol. 41. Article 35. doi: 10.1007/s11738-019-2828-7
28. Sabir A., Yazar K., Sabir F. et al. Vine growth, yield, berry quality attributes and leaf nutrient content of grapevines as influenced by seaweed extract (*Ascophyllum nodosum*) and nanosize fertilizer pulverizations. *Scientia Horticulturae*. 2014. Vol. 175. P. 1–8. doi: 10.1016/j.scienta.2014.05.021
29. Servin A., Elmer W., Mukherjee A. et al. A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. *Journal of Nanoparticle Research*. 2015. Vol. 17. Article 92. doi: 10.1007/s11051-015-2907-7
30. Sheoran P., Grewal S., Kumari S., Goel S. Enhancement of growth and yield, leaching reduction in *Triticum aestivum* using biogenic synthesized zinc oxide nanofertilizer. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2021. Vol. 32. Article 101938. doi: 10.1016/j.bcab.2021.101938
31. Shukla P., Chaurasia P., Younis K. et al. Nanotechnology in sustainable agriculture: Studies from seed priming to post-harvest management. *Nanotechnology for Environmental Engineering*. 2019. Vol. 4. Article 11. doi: 10.1007/s41204-019-0058-2

32. Tripathi D. K., Singh S., Singh V. P. et al. Silicon nanoparticles more effectively alleviated UV-B stress than silicon in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2017. Vol. 110. P. 70–81. doi: 10.1016/j.plaphy.2016.06.026
33. Verma S. K., Das A. K., Patel M. K. et al. Engineered nanomaterials for plant growth and development: A perspective analysis. *Science of The Total Environment*. 2018. Vol. 630. P. 1413–1435. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.313
34. Wang P., Lombi E., Zhao F. J., Kopittke P. M. Nanotechnology: a new opportunity in plant sciences. *Trends in Plant Science*. 2016. Vol. 21, Iss. 8. P. 699–712. doi: 10.1016/j.tplants.2016.04.005
35. Wang Z. H., Miao Y. F., Li S. X. Effect of ammonium and nitrate nitrogen fertilizers on wheat yield in relation to accumulated nitrate at different depths of soil in drylands of China. *Field Crops Research*. 2015. Vol. 183. P. 211–224. doi: 10.1016/j.fcr.2015.07.019
36. Yan A., Chen Z. Impacts of silver nanoparticles on plants: a focus on the phytotoxicity and underlying mechanism. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. Vol. 20, Iss. 5. Article 1003. doi: 10.3390/ijms20051003
37. Yang H., Xu M., Koide R. T. et al. Effects of ditch-buried straw return on water percolation, nitrogen leaching and crop yields in a rice-wheat rotation system. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2016. Vol. 96, Iss. 4. P. 1141–1149. doi: 10.1002/jsfa.7196
38. Zhang T., Sun H., Lv Z. et al. Using Synchrotron-Based Approaches To Examine the Foliar Application of ZnSO₄ and ZnO Nanoparticles for Field-Grown Winter Wheat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2018. Vol. 66, Iss. 11. P. 2572–2579. doi: 10.1021/acs.jafc.7b04153
39. Важливість макро- та мікроелементів для розвитку рослин. *SuperAgronom*. 24 жовтня 2018. URL: <https://superagronom.com/blog/418-vajlivist-makro--ta-mikroelementiv-dlya-rozvitku-roslin>
40. Рожков А. О., Пузік В. К., Каленська С. М. та ін. Дослідна справа в агрономії. Книга 1: Теоретичні аспекти дослідної справи. Харків : Вид-во Майдан, 2016. 314 с.
41. Каленська С. М., Новицька Н. В. Ефективність нанопрепаратів в технології вирощування сої. *Plant and Soil Science*. 2020. Т. 11, № 3. С. 7–22. doi: 10.31548/agr2020.03.007
42. Лопатько К. Г., Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. Застосування наночастинок металів–екологічно безпечна технологія вирощування пшениці озимої. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2011. Вип. 158. С. 119–125.
43. Нанотехнології в рослинництві / за ред. С. М. Каленської. Київ : Компрінт, 2020. 460 с.
44. Присяжнюк О. І., Каражбей Г. М., Лещук Н. В. та ін. Статистичний аналіз агрономічних дослідних даних в пакеті Statistica 10 : методичні вказівки. Київ : Нілан-ЛТД, 2016. 54 с.
45. Копілевич В. А., Максін В. І., Каплуненко В. Г., Косінов М. В. Функціональні наноматеріали для потреб сільського господарства. *Вісник НАУ*. 2008. № 130. С. 349–354.
46. Якименко Ю., Цендровський В., Наритнюк Т. Місце України в світі нанотехнологій. *Дзеркало тижня*. 2008. № 29. С. 9–15.

References

1. Abdel-Aziz, H. M. M., Hasaneen, M. N. A., & Omer, A. M. (2016). Nano chitosan-NPK fertilizer enhances the growth and productivity of wheat plants grown in sandy soil. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(1), Article e0902. doi: 10.5424/sjar/2016141-8205
2. Al-Juthery, H. W. A., Lahmoud, Nabil. R., Alhasan, Ali. S., Al-Jassani, Nisreen. A. A., & Houria, A. (2022). Nano-Fertilizers as a Novel Technique for Maximum Yield in Wheat Biofortification (Article Review). *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1060, Article 012043. doi: 10.1088/1755-1315/1060/1/012043

3. Arora, S., Sharma, P., Kumar, S., Nayan, R., Khanna, P. K., & Zaidi, M. G. H. (2012). Gold-nanoparticle induced enhancement in growth and seed yield of *Brassica juncea*. *Plant Growth Regulation*, 66, 303–310. doi: 10.1007/s10725-011-9649-z
4. Batsmanova, L., Taran, N., Konotop, Y., Kalenska, S., & Novytska, N. (2020). Use of a colloidal solution of metal and metal oxide-containing nanoparticles as fertilizer for increasing soybean productivity. *Journal of Central European Agriculture*, 21(2), 311–319. doi: 10.5513/JCEA01/21.2.2414
5. Behboudi, F., Tahmasebi Sarvestani, Z., Kassae, M. Z., Modares Sanavi, S. A. M., Sorooshzadeh, A., & Ahmadi, S. B. (2018). Evaluation of chitosan nanoparticles effects on yield and yield components of barley (*Hordeum vulgare* L.) under late season drought stress. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*, 3(1), 22–39. doi: 10.22090/jwent.2018.01.003
6. Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Abadía, J., & Khorasani, R. (2016). Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality. *Scientia Horticulturae*, 210, 57–64. doi: 10.1016/j.scienta.2016.07.003
7. Dwivedi, S., Saquib, Q., Al-Khedhairi, A. A., & Musarrat, J. Understanding the role of nanomaterials in agriculture. In D. P. Singh, H. B. Singh, & R. Prabha (Eds.), *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity*. New Delhi, India: Springer, 2016. P. 271–288.
8. El-Feky, S. A., Mohammed, M. A., Khater, M. S., Osman, Y. A., & Elsherbini, E. (2013). Effect of magnetite nano-fertilizer on growth and yield of *Ocimum basilicum* L. *International Journal of Indigenous Medicinal Plants*, 46(3), 1286–1293.
9. Hasan, B., & Saad, T. (2020). Effect of Nano Biological and Mineral Fertilizers on Growth and Yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Indian Journal of Ecology*, 46(8), 97–101.
10. Heffer, P., & Prud'homme, M. (2012). *Fertilizer Outlook 2012–2016*. International Fertilizer Industry Association (IFA). Paris, France.
11. Iqbal, M., Raja, N. I., Mashwani, Z.-U.-R., Hussain, M., Ejaz, M., & Yasmeen, F. (2017). Effect of silver nanoparticles on growth of wheat under heat stress. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 43, 387–395. doi: 10.1007/s40995-017-0417-4
12. Iravani, S. (2011). Green synthesis of metal nanoparticles using plants. *Green Chemistry*, 13, 2638–2650. doi: 10.1039/c1gc15386b
13. Joshi, A., Kaur, S., & Dharamvir, K. (2018). Multi-walled carbon nanotubes applied through seed-priming influence early germination, root hair, growth and yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(8), 3148–3160. doi: 10.1002/jsfa.8818
14. Joshi, A., Thakur, N., & Verma, G. (2022). Qualitative assessment of MWCNT-treated grains of some food cereals: life sciences-botany. *International Journal of Life Science and Pharma Research*, L61–L73. doi: 10.22376/ijlpr.2023.13.1.SP1.L61-73
15. Kalenska, S., Novytska, N., Stolyarchuk, T., Kalenskyi, V., Garbar, L., Sadko, M., Shutiy, O., & Sonko, R. (2021). Nanopreparations in technologies of plants growing. *Agronomy Research*, 19(S1), 795–808. doi: 10.15159/AR.21.017
16. Kole, C., Kole, P., Randunu, K. M., Choudhary, P., Podila, R., Ke, P. C., Rao, A. M., & Marcus, R. K. (2013). Nanobiotechnology can boost crop production and quality: First evidence from increased plant biomass, fruit yield and phytomedicine content in bitter melon (*Momordica charantia*). *BMC Biotechnology*, 13, Article 37. doi: 10.1186/1472-6750-13-37
17. Kottegoda, N., Munaweera, I., Madusanka, N., & Karunaratne, V. (2011). A green slow-release fertilizer composition based on urea-modified hydroxyapatite nanoparticles encapsulated wood. *Current Science*, 101(1), 73–78. <https://www.jstor.org/stable/24077865>
18. Kravchenko, Y., Lopatko, R., Aftandilyants, Y., & Trach, V. (2015). The effect of colloidal nanoparticles on plant growth, phytotoxicity and crop yields. *Fertilizer Technology*, 1, 689–724.
19. Lateef, A., Nazir, R., Jamil, N., Alam, S., Shah, R., Khan, M. N., & Saleem, M. (2016). Synthesis and characterization of zeolite based nano-composite: An environment friendly slow

- release fertilizer. *Microporous and Mesoporous Materials*, 232, 174–183. doi: 10.1016/j.micromeso.2016.06.020
20. Long, S. P., Zhu, X. G., Naidu, S. L., & Ort, D. R. (2006). Can improvement in photosynthesis increase crop yields? *Plant, Cell & Environment*, 29(3), 315–330. doi: 10.1111/j.1365-3040.2005.01493.x
21. Mardalipour, M., Zahedi, H., & Sharghi, Y. (2014). Evaluation of Nano biofertilizer efficiency on Agronomic traits of Spring Wheat at Different Sowing Date. *Biological Forum*, 6(2), Article 349.
22. Miao, Y. F., Wang, Z. H., & Li, S. X. (2015). Relation of nitrate N accumulation in dryland soil with wheat response to N fertilizer. *Field Crops Research*, 170, 119–130. doi: 10.1016/j.fcr.2014.09.016
23. Millan, G., Agosto, F., Vazquez, M., Botto, L., Lombardi, L., & Juan, L. (2008). Use of clinoptilolite as a carrier for nitrogen fertilizers in soils of the Pampean regions of Argentina. *Ciencia e Investigación Agraria*, 35(3), 293–302.
24. Panpatte, D. G., Jhala, Y. K., Shelat, H. N., & Vyas, R. V. (2016). Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity. In *Nanoparticles: The next generation technology for sustainable agriculture* (pp. 289–300). New Delhi, India: Springer.
25. Preetha, S. P., & Balakrishnan, N. A (2017). Review of Nano Fertilizers and Their Use and Functions in Soil. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 62(112), 3117–3133. doi: 10.20546/ijcmas.2017.612.364
26. Prasad, T. N. V. K. V., Sudhakar P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Reddy, K. R., Sreeprasad, T. S., Sajanlal, P. R., & Pradeep, T. (2012). Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition*, 35(6), 905–927. doi: 10.1080/01904167.2012.663443
27. Rizwan, M., Ali, S., ur Rehman, M. Z., Malik, S., Adrees, M., Qayyum, M. F., Alamri, S. A., Alyemeni, M. N., & Ahmad, P. (2019). Effect of foliar applications of silicon and titanium dioxide nanoparticles on growth, oxidative stress, and cadmium accumulation by rice (*Oryza sativa*). *Acta Physiologiae Plantarum*, 41, Article 35. doi: 10.1007/s11738-019-2828-7
28. Sabir, A., Yazar, K., Sabir, F., Kara, Z., Yazici, M. A., & Goksu, N. (2014). Vine growth, yield, berry quality attributes and leaf nutrient content of grapevines as influenced by seaweed extract (*Ascophyllum nodosum*) and nanosize fertilizer pulverizations. *Scientia Horticulturae*, 175, 1–8. doi: 10.1016/j.scienta.2014.05.021
29. Servin, A., Elmer, W., Mukherjee, A., De la Torre-Roche, R., Hamdi, H., White, J. C., Bindran, P., & Dimkpa, C. (2015). A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. *Journal of Nanoparticle Research*, 17, Article 92. doi: 10.1007/s11051-015-2907-7
30. Sheoran, P., Grewal, S., Kumari, S., & Goel, S. (2021). Enhancement of growth and yield, leaching reduction in *Triticum aestivum* using biogenic synthesized zinc oxide nanofertilizer. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 32, Article 101938. doi: 10.1016/j.bcab.2021.101938
31. Shukla, P., Chaurasia, P., Younis, K., Qadri, O. S., Faridi, S. A., & Srivastava, G. (2019). Nanotechnology in sustainable agriculture: Studies from seed priming to post-harvest management. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 4, Article 11. doi: 10.1007/s41204-019-0058-2
32. Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, V. P., Prasad, S. M., Dubey, N. K., & Chauhan, D. K. (2017). Silicon nanoparticles more effectively alleviated UV-B stress than silicon in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 70–81. doi: 10.1016/j.plaphy.2016.06.026
33. Verma, S. K., Das, A. K., Patel, M. K., Shah, A., Kumar, V., & Gantait, S. (2018). Engineered nanomaterials for plant growth and development: A perspective analysis. *Science of The Total Environment*, 630, 1413–1435. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.313
34. Wang, P., Lombi, E., Zhao, F.-J., & Kopittke, P. M. (2016). Nanotechnology: a new opportunity in plant sciences. *Trends in Plant Science*, 21(8), 699–712. doi: 10.1016/j.tplants.2016.04.005

35. Wang, Z. H., Miao, Y. F., & Li, S. X. (2015). Effect of ammonium and nitrate nitrogen fertilizers on wheat yield in relation to accumulated nitrate at different depths of soil in drylands of China. *Field Crops Research*, 183, 211–224. doi: 10.1016/j.fcr.2015.07.019
36. Yan, A., & Chen, Z. (2019). Impacts of silver nanoparticles on plants: a focus on the phytotoxicity and underlying mechanism. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(5), Article 1003. doi: 10.3390/ijms20051003
37. Yang, H., Xu, M., Koide, R. T., Liu, Q., Dai, Y., Liu, L., & Bian, X. (2015). Effects of ditch-buried straw return on water percolation, nitrogen leaching and crop yields in a rice-wheat rotation system. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(4), 1141–1149. doi: 10.1002/jsfa.7196
39. The importance of macro- and microelements for plant development. (2018). *SuperAgronom*. Retrieved from <https://superagronom.com/blog/418-vajlivist-makro--ta-mikroelementiv-dlya-rozvitku-roslin> [In Ukrainian]
40. Rozhkov, A. O., Puzik, V. K., Kalenska, S. M., Puzik, L. M., Popov, S. I., Muzafarov, N. M., Bukhalo, V. Ya., & Kryshchop, E. A. (2016). *Research work in agronomy. Book 1: Theoretical aspects of the research case*. Kharkiv: Maidan. [In Ukrainian]
41. Kalenska, S. M., & Novytska, N. V. (2020). Efficiency of nano preparations in soybean growing technology. *Plant and Soil Science*, 11(3), 7–22. doi: 10.31548/agr2020.03.007 [In Ukrainian]
42. Lopatko, K. H., Aftandilants, Ye. H., & Zazymko, O. (2011). The use of metal nanoparticles is an environmentally safe technology for growing winter wheat. *Scientific reports of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 158, 119–125. [In Ukrainian]
43. Kalenska, S. M. (Eds.). (2020). *Nanotechnology in crop production*. Kyiv: Komprynt. [In Ukrainian]
44. Prysiashniuk, O. I., Karazhbei, H. M., Leshchuk, N. V., Tsyba, S. V., Mazhuha, K. M., Brovkin, V. V., Symonenko, V. A., & Maslechkin, V. V. (2016). *Statistical analysis of agronomic research data in the Statistica 10 package: methodological guidelines*. Kyiv: Nilan-LTD. [In Ukrainian]
45. Kopilevych, V. A., Maksin, V. I., Kaplunenko, V. H., & Kosinov, M. V. (2008). Functional nanomaterials for the needs of agriculture. *Bulletin of the National Agrarian University*, 130, 349–354. [In Ukrainian]
46. Yakymenko, Yu., Tsendrovskiy, V., & Narytniuk, T. (2008). Ukraine's place in the world of nanotechnology. *Dzerkalo tyzhnia*, 29, 9–15. [In Ukrainian]

UDC 633.34:631.5:631.8

Kalenska, S. M.¹, Novytska, N. V.^{1*}, Melnychenko, V. V.², Chubko, O. P.³, & Feshchenko, V. V.⁴ (2024). Efficiency of partial replacement of macro fertilisers with nano chelates for spring wheat. *Scientific Papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet*, 32, 14–29. <https://doi.org/10.47414/np.32.2024.314608> [In Ukrainian]

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony St., Kyiv, 03041, Ukraine, *e-mail: novytska@ukr.net

²Natural Fertilizers Limited, 23 Grattan Court, Celbridge, Co. Kildare, Ireland

³“Agrotechonsoiuz” LLC, 2 Zavodska St., Putrivka, Fastivskiy district, Kyiv region, 08623, Ukraine

⁴PE “Podillia-Agrochemical Service”, 3 Maksym Zalizniak St., Uman, Cherkasy region, 20304, Ukraine

Purpose. To determine the effect of partial replacement of basic macro fertilisers with nano chelate micro fertilisers (NCMF) on the spring wheat productivity. **Methods.** The study was conducted in 2019–2020 at the Plant Breeding Department of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine (Kyiv). Field experiments were carried out at the educational and scientific laboratory Demonstration and Collection Crop Field. Laboratory analyses were

performed at the laboratories Quality of Seeds and Planting Material and Analytical Studies in Crop Production. Nano chelate micro fertilisers were used according to the replacement scheme developed by the manufacturer (Innoparmis Agrosience SRL) in two stages: at the beginning of the stem emergence (BBCH 30–32) and at the beginning of grain filling (BBCH 71–75). A single plot area was 2 m² in six replications. **Results.** Partial replacement of the application rate with nano chelate micro fertilisers can have a positive effect on wheat yield and compensate for up to 30% of the application rate of each of the macronutrients. In the block of replacing mineral nitrogen with nano chelate micro fertilisers, the highest reliable yield reached 3.97 t/ha in the N₄₀ + NCMF treatment with a 16.7% decrease in yield relative to control 2. In the block of phosphorus substitution, the average yield was lower and reached the maximum value of 3.52 t/ha in the treatments P₄₀ + NCMF and P₃₀ + NCMF. In the block of potassium replacement, yield reduction was even more significant: it did not exceed 3.2 t/ha. A significant decrease of the 1000-kernel weight by 3.7–13.1% was recorded in each of the blocks of macronutrient replacement: 40–41 g for application of only N; 37–40 g for applying only phosphorus or potassium. **Conclusions.** In the fertilization system for grain crops (for example, wheat), it is possible to replace nitrogen fertilisers with nano chelate micro fertilisers by 25–30%, phosphorus and potassium by up to 40% of the recommended rate of mineral fertilisers. The yield values in these cases were 3.97 t/ha (N₄₀ + NCMF), 3.52 t/ha (P₄₀ + NCMF), and 3.24 t/ha (K₄₀ + NCMF).

Keywords: nano chelate micro fertilisers; bread spring wheat; nutrition; replacement of macronutrients; crop yield; grain quality.

Надійшла / Received 12.08.2024

Погоджено до друку / Accepted 27.09.2024

УДК 633.854.78

DOI: <https://doi.org/10.47414/np.32.2024.319650>

Формування продуктивності соняшнику за вирощування в умовах північно-східного регіону України

 Р. С. Бондарець*,  І. В. Верещагін

Сумський національний аграрний університет, вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 4000, Україна, *e-mail: roman2016u@gmail.com

Мета. Установити ефективність вирощування гібридів соняшнику (*Helianthus annuus*) у північно-східних регіонах України. **Методи.** Польові дослідження проводили впродовж 2020–2024 рр. у Лівобережному Лісостепу України, на межі двох ґрунтово-кліматичних зон – Лісостепу і Полісся. **Результати.** За показниками середньої врожайності соняшнику в умовах північно-східних регіонів України очевидно, що ця культура неухильно завойовує популярність у виробників. У середньому за трьома областями врожайність культури щорічно переважає показники, отримані загалом по країні. Зокрема, в умовах 2020 року було отримано на 0,73 т/га більший урожай насіння, у 2021-му – на 0,30, а у 2022 р. – 0,25 т/га. Також, у 2022 році за середньої по Україні врожайності насіння соняшнику 2,16 т/га в Сумській області отримано 2,62, у Харківській – 2,29, а в Чернігівській – 2,32 т/га. Натомість, умови 2023 року засвідчили, що до вирощування цієї культури в північно-східному регіоні України слід ставитись дуже зважено, адже за середнього по Україні показника врожайності на рівні 2,45 т/га лише в Чернігівській області отримано 3,16 т/га, тоді як у Сумській та Харківській – 2,38 та 2,18 т/га відповідно. Таким чином, середня врожайність культури в цих трьох областях була на 0,08 т/га меншою, ніж загалом по Україні. **Висновки.** В умовах