

УДК 631.8:551.583.13

© 2025

## **ЕФЕКТИВНІСТЬ НАНОДОБРИВА НА ОСНОВІ ЗВ'ЯЗАНОГО ВУГЛЕЦЮ В ПОЛІПШЕННІ ЖИВЛЕННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР**

*М.М. Мірошниченко<sup>1</sup>, Є.Ю. Гладкіх<sup>2</sup>,  
Є.В. Панасенко<sup>3</sup>, В.І. Богомаз<sup>4</sup>, Р.В. Акімова<sup>5</sup>*

*<sup>1</sup>доктор біологічних наук, член-кореспондент НААН*

*<sup>2,3</sup>кандидати сільськогосподарських наук, <sup>4</sup>кандидат хімічних наук*

*<sup>1-3,5</sup>Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства  
та агрохімії імені О.Н. Соколовського»*

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

*<sup>4</sup>ТОВ «Агропромислова компанія «БЕСТА»*

*вул. Кадетський Гай, 6/1, м. Київ, 03048, Україна*

*e-mail: <sup>1</sup>ecosoil@meta.ua, <sup>2</sup>ye.hladkikh@ukr.net,*

*<sup>3</sup>panasenko-evgeniy777@ukr.net, <sup>4</sup>bogomaz743@ukr.net, <sup>5</sup>arv55@ukr.net*

*ORCID: <sup>1</sup>0000-0003-2830-5933,*

*<sup>2</sup>0000-0002-4852-0502, <sup>3</sup>0000-0002-5248-0179*

Надійшла 30.12.2024

**Мета.** Дослідити біологічну ефективність нанодобрива на основі зв'язаного вуглецю за показниками стимулювання ростових процесів і коефіцієнтами споживання основних елементів живлення з мінеральних добрив. **Методи.** Дослідження здійснено в лабораторному та польовому дослідах у 2023 – 2024 рр. Лабораторний експеримент проводили для визначення впливу різних доз (концентрацій розчину) нанодобрив на посівні якості насіння пшениці, сої та огірка. У польовому досліді на чорноземі типовому досліджували дію обробки насіння та позакореневого обприскування посівів на врожайність ріпаку озимого та ефективність споживання елементів живлення з мінеральних добрив. **Результати.** Встановлено високу ефективність нанодобрив на основі зв'язаного вуглецю із застосуванням у передпосівну обробку насіння і позакоренево по вегетуючих рослинах у комплексі з мінеральними добривами. Визначено оптимальні концентрації розчину нанодобрива для передпосівної обробки насіння пшениці, сої, огірка та максимально ефективну комбінацію застосування мінеральних добрив і нанопрепарату в посівах ріпаку озимого. Доведено істотне поліпшення споживання основних елементів живлення з мінеральних добрив рослинами ріпаку впродовж вегетації завдяки додаванню нанодобрива до системи удобрення. **Висновки.** Рекомендованими дозами розчину нанодобрива для передпосівної обробки насіння пшениці є 2 л/т, сої та огірка – 5 л/т. Додавання нанодобрива

**на основі зв'язаного вуглецю до системи удобрення ріпаку озимого сприяє збільшенню його врожаю на 0,74 – 1,35 т/га і коефіцієнтів використання елементів живлення з мінеральних добрив у 1,2 – 2,5 раза та в 2,9 раза підвищує агрономічну ефективність мінеральних добрив.**

**Ключові слова:** регулятори росту рослин, урожай, продуктивність, ефективність використання макроелементів, позакореневе підживлення.

**DOI:** <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202502-02>

Продовольча та енергетична безпека України й більшості країн світу потребують постійного нарощування обсягів виробництва продукції рослинництва, що за сучасного кліматичного тренду можливо лише за впровадження інноваційних та адаптивних технологій вирощування сільськогосподарських культур і їх окремих елементів, зокрема удобрення [1]. Нарощування обсягів застосування неорганічних добрив у поєднанні з високоврожайними сортами, удосконалення агротехніки вирощування сільськогосподарських культур у ХХ ст. сприяли стійкому підвищенню врожайності та продовольчої безпеки країн світу. Проте через посилення загального навантаження на агроєкосистеми і внаслідок дисбалансу між елементами живлення це супроводжувалося загостренням екологічних проблем [2–4]. На цьому тлі нова парадигма відповідального управління живленням рослин спрямована на підвищення ефективності понад 20 фізіологічно необхідних елементів і мінімізацію їх непродуктивних втрат завдяки онлайн-діагностиці, цифровим технологіям і штучному інтелекту, нормуванню якості добрив, застосуванню нових речовин і матеріалів [5].

Вимоги до поліпшення екологічної безпечності та економічної ефективності застосування добрив у землеробстві постійно зростають і набувають особливої актуальності в умовах ринкових відносин, а також у зв'язку з підвищенням цін на добрива та пальне

під час воєнного стану і у післявоєнний період [6]. Нині сільське господарство України потребує ефективних і недорогих засобів для підвищення врожайності та покращення якості вирощеної продукції. Разом із такими основними складовими формування високопродуктивних посівів, як сорт, збалансоване живлення, агротехніка і засоби захисту, дедалі більшого значення набувають стимулятори росту та розвитку рослин і нанодобрива [7–9]. Це запобігає надлишковому внесенню мінеральних добрив і допомагає використати ту кількість елементів живлення, яка буде корисною для розвитку рослин, що знизить негативний вплив хімічних речовин на навколишнє середовище.

Стимулятори росту рослин і нанодобрива зменшують негативні наслідки абіотичних стресів, спричинених зміною клімату, і залежність землеробства від джерел постачання мінеральних добрив [10, 11]. Крім підвищення врожайності, на якому наголошується в описі більшості стимуляторів і нанодобрив, від вчасного та адресного стимулювання фізіологічних процесів підвищується ефективність споживання елементів живлення рослинами, що є важливим і потребує поглибленого вивчення [12].

**Мета досліджень** — визначити біологічну ефективність нанодобрив на основі зв'язаного вуглецю за показниками стимулювання ростових процесів і коефіцієнтами споживання основних елементів живлення з мінеральних добрив.

**Матеріали та методи досліджень.**

Дослідження здійснювали впродовж 2023–2024 рр. у лабораторних і польових дослідах за поєданого застосування нанодобрив Grafen-Faktor™ виробництва ТОВ «Агропромислова компанія "Беста"» та мінеральних добрив у рекомендованих дозах.

Вплив різних концентрацій розчинів нанодобрив на динаміку проростання насіння досліджували за передпосівної обробки насіння пшениці озимої, сої (1 л/т, 2 та 5 л/т) та огірка (1 л/т, 5 та 10 л/т) згідно з ДСТУ 4138–2002 [13]. Швидкість проростання зерна визначали за формулою Піпера:

$$E = n_1 s_1 + n_2 s_2 + \dots + n_m s_m / n_1 + n_2 + n_m, \quad (1)$$

де  $E$  — середня швидкість проростання зерна, діб;  $n$  — кількість пророслих зернин за добу в дні підрахунку;  $m$  — кінцевий день підрахунку;  $s$  — строки проростання.

Показник дружності проростання обчислювали за формулою:

$$D = B / S, \quad (2)$$

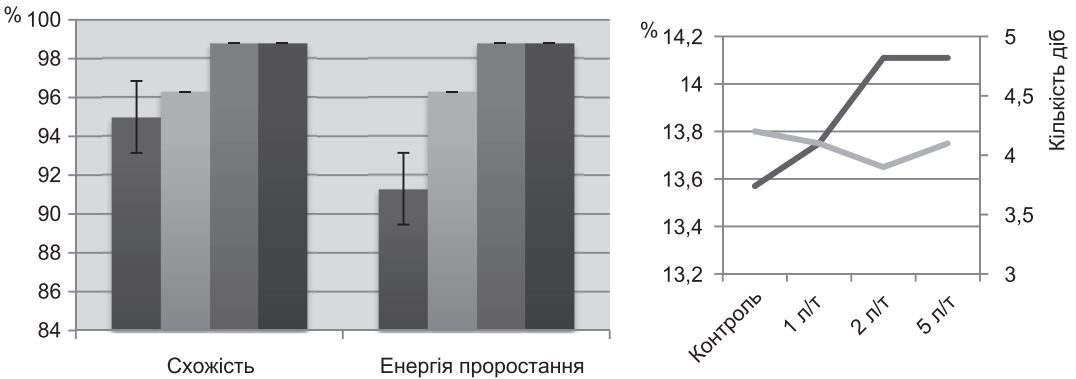
де  $D$  — дружність проростання, %;  $B$  — кінцева схожість зерна, %;  $S$  — кількість діб проростання.

Польові дослідження проводили в дрібноділянковому польовому досліді на території ДП «ДГ «Граківське» ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського» на чорноземі типовому. Вміст гумусу в орному шарі становив 3,9%, валовий уміст азоту — 2,52 г/кг ґрунту, уміст рухомих форм фосфору та калію за Чиріковим — 47 і 78 мг/кг ґрунту відповідно. Схема досліду передбачала 5 варіантів: 1 — без добрив (контроль); 2 — агрохімічний фон ( $N_{90}P_{60}K_{60}$ ); 3 — нанодобрива, 5 л/га (позакоренево); 4 — агрохімічний фон + нанодобрива, 5 л/га (позакоренево); 5 — агрохімічний фон + нанодобрива, 5 л/га (позакоренево) + нанодобрива, 5 л/т (обробка насіння). Добрива вносили

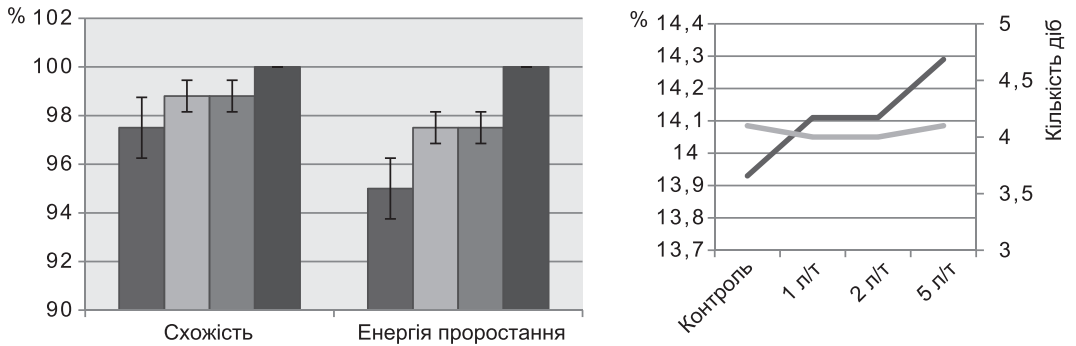
перед сівбою у формі гранфоски марки  $N : P : K = 5 : 15 : 15$  та в ранньовесняне підживлення культур аміачною селітрою ( $N_{70}$ ). Вирощували ріпак озимий сорту «Торес». Позакореневу обробку проводили на початку стеблуння (ВВСН 30-35), обробіток насіння — безпосередньо перед сівбою. У кінцевій продукції визначали вміст азоту, фосфору і калію після озолення сумішшю сірчаної та хлорної кислоти за методом Гінзбург. Статистичну обробку результатів досліджень здійснювали методами дисперсійного та регресійного аналізу за допомогою програмного забезпечення STATISTICA 13.5.0.17.

**Результати досліджень.** Установлено, що за обробки насіння пшениці дозами нанодобрив 2 та 5 л/т істотно підвищуються всі показники його посівної якості: схожість — на 4%, енергія проростання — на 8,2, дружність проростання — на 3,9 та швидкість проростання — на 7,2% (рис. 1). З огляду на те, що істотної різниці між обробкою нанодобривами дозами 2 і 5 л/т немає, достатньою для пшениці можна вважати дозу 2 л/т. Вплив нанодобрив на показники посівної якості сої виявився дещо нижчим, ніж на показники пшениці, і достовірне поліпшення отримано лише за дози 5 л/т: схожість збільшилася на 2,6%, енергія проростання — на 5,3, дружність проростання — на 2,3% (рис. 2). Виявлено також збільшення довжини основного кореня сої та утворення додаткових корінців за обробки насіння нанодобривами, що важливо для формування здорових і міцних рослин.

Для насіння огірка ефективність нанодобрива виявилася істотно вищою, ніж для пшениці та сої: показник схожості перевищував контроль на 19–39%, енергія проростання — на 18–72, дружність проростання — на 18–38%, на швидкості проростання обробка препаратом не позначилася (рис. 3). Максимальний ефект відзначено за



**Рис. 1.** Показники посівної якості насіння пшениці за обробки Grafen-Faktor™ різними дозами: ■ — контроль, %; ■ — 1 л/т; ■ — 2 л/т; ■ — 5 л/т; — — дружність проростання, %; — — швидкість проростання, днів (для рис. 1–3).



**Рис. 2.** Показники посівної якості насіння сої за обробки Grafen-Faktor™ різними дозами

обробки нанодобривом дозами 1 і 5 л/т. Причому за дози 5 л/т отримано проростки огірка з потужною і найдовшою кореневою системою, натомість доза 1 л/т не сприяла утворенню додаткових корінців. Слід зазначити, що оптимальною дозою для обробки насіння огірка нанодобривом є 5 л/т.

Застосування нанодобрив на основі зв'язаного вуглецю різними способами (передпосівна обробка насіння та позакореневе підживлення) на агрохімічному фоні й без нього позитивно вплинули на врожайність ріпаку озимого (таблиця).

Отримані результати підтверджують, що застосування лише нанодобрива без основного внесення мінеральних

добрив є неефективним, оскільки не забезпечує достатнього живлення, особливо в осінній період, що на 70% визначає врожайність цієї культури та її стійкість до низьких зимових температур. Слід зазначити, що для формування 1 т насіння ріпаку з відповідною вегетативною масою потрібно 50–60 кг азоту, 20–25 кг фосфору та 40–50 кг калію, що значно більше, ніж виноситься з урожаєм зерна пшениці, ячменю та інших зернових культур. Отже, дія нанодобрив, як і будь-якого стимулятора росту та розвитку рослин, найбільше проявляється за достатнього та збалансованого мінерального живлення.

Натомість вирощування ріпаку озимого за системи удобрення, яка поєднує

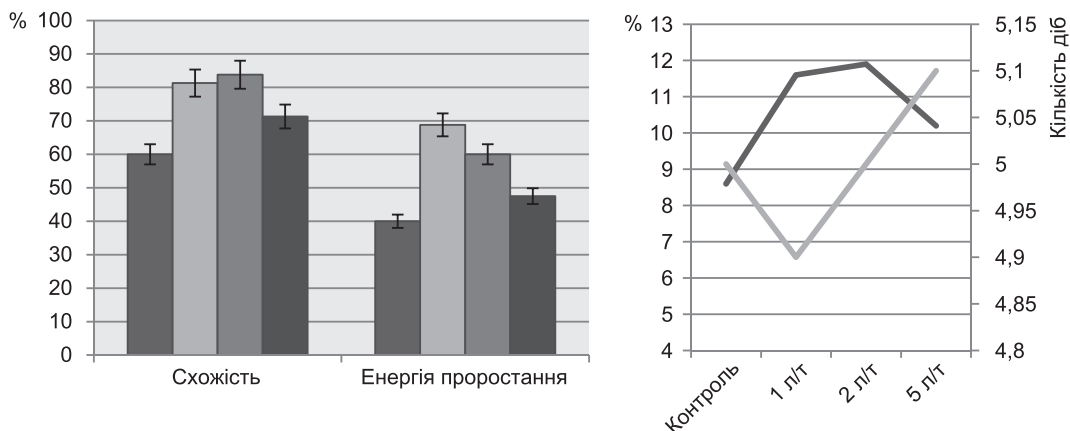


Рис. 3. Показники посівної якості насіння огірка за обробки Grafen-Faktor™ різними дозами

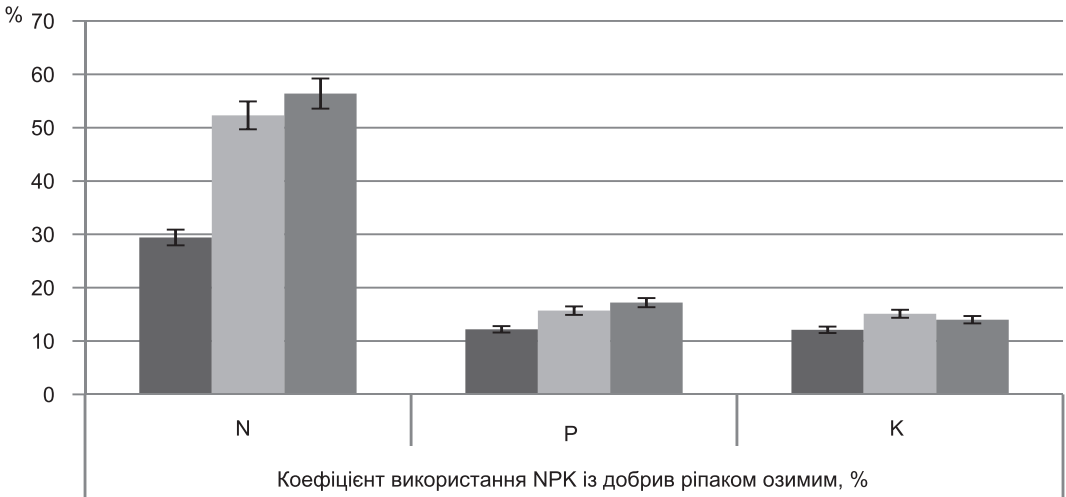
Вплив застосування Grafen-Faktor™ на основі зв'язаного вуглецю на врожайність ріпаку озимого

Варіант дослідю	Урожайність насіння, т/га	Приріст урожаю, %
1. Без добрив (контроль)	4,82	–
2. Агрохімічний фон (N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> )	5,28	9,54
3. Нанодобриво, 5 л/га (позакоренево)	5,02	4,14
4. Агрохімічний фон + нанодобриво, 5 л/га (позакоренево)	5,56	15,4
5. Агрохімічний фон + нанодобриво, 5 л/га (позакоренево) + нанодобриво, 5 л/т (обробка насіння)	6,17	28,0
НІР <sub>05</sub>	0,30	–

основне внесення мінеральних добрив восени, ранньовесняне азотне підживлення та обробку насіння і позакоренево застосування нанодобрив у критичній фазі росту й розвитку рослин (варіант 5), забезпечило отримання найвищих приростів урожаю — 0,74–1,35 т/га (див. таблицю). При цьому позитивний ефект від передпосівної обробки насіння нанодобривами істотно підсилював дію мінеральних добрив. Було отримано найвищу окупність 1 кг NPK урожаєм — 6,4 кг насіння. Якщо порівняти окупність добрив із застосовуваним у досліді агрохімічним фоном, то можна констатувати, що з додаванням до системи удобрення ріпаку нанодобрив у 2,9 раза

підвищилася агрономічна ефективність мінеральних добрив.

Дослідження препаратів на основі зв'язаного вуглецю є новим напрямом в Україні. Доведено, що графенові квантові точки позитивно діють на фізіологічні процеси рослин і продуктивність фотосинтезу навіть за низьких доз [14]. Автори [15] відзначили позитивний вплив передпосівної обробки насіння графеном (що, по суті, є зв'язаним вуглецем) у концентрації 0,2 мг/мл на ріст і розвиток коріандру (*Coriandrum sativum* L.) й часнику (*Allium sativum*). Результати випробувань препаратів на основі зв'язаного вуглецю на різних культурах, проведених останніми роками, підтверджують, що залежно від дози



**Рис. 4.** Рівень споживання основних елементів живлення рослинами з мінеральних добрив за використання нанодобрива Grafen-Faktor™: ■ — агрохімічний фон (N<sub>90</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>); ■ — агрохімічний фон + нанодобриво, 5 л/га (позакоренево); ■ — агрохімічний фон + нанодобриво, 5 л/га (позакоренево) + нанодобриво, 5 л/га (обробка насіння)

та тривалості обробки можливе як стимулювання, так і пригнічення росту рослин [16]. Результати наших досліджень збігаються з даними, отриманими закордонними дослідниками, і підтверджують перспективність використання нанодобрив на основі зв'язаного вуглецю як складової сучасних систем удобрення.

Нами доведено, що за використання добрив на основі зв'язаного вуглецю істотно поліпшувалося споживання рослинами ріпаку озимого основних елементів живлення, здебільшого азоту. Із застосуванням Grafen-Faktor™ на агрохімічному фоні коефіцієнти

використання азоту з добрив збільшилися в 1,7–2,5 рази, фосфору — 1,3–1,6, калію — у 1,2–1,3 рази (рис. 4).

Це свідчить про принципову можливість зниження рекомендованої дози азотних добрив у посівах ріпаку озимого за введення до системи удобрення нанодобрива на основі зв'язаного вуглецю, що актуально в період дефіциту мінеральних добрив в Україні та значного їх здорожчання. Більше споживання азоту добрив рослинами забезпечує зниження неефективних втрат азоту і запобігає нітратному забрудненню підґрунтових вод.

## Висновки

Дослідженнями доведено високу ефективність нанодобрив на основі зв'язаного вуглецю із застосуванням у передпосівну обробку насіння і позакоренево по рослинах, що вегетують. Оптимальною дозою розчину нанодобрив для передпосівної обробки насіння пшениці є 2 л/т, сої та огірка — 5 л/т.

За вирощування ріпаку озимого в польовому експерименті найефек-

тивнішою виявилася система удобрення, де поєднано основне внесення мінеральних добрив восени і ранньовесняне азотне підживлення з обробкою насіння (5 л/т) і позакореневим застосуванням (5 л/га) нанодобрив, що забезпечило отримання найвищих приростів урожаю та підвищення коефіцієнтів використання NPK із добрив.

Miroshnichenko M.<sup>1</sup>, Hladkikh Ye.<sup>2</sup>, Panasenko Ye.<sup>3</sup>, Bohomaz V.<sup>4</sup>, Akimova R.<sup>5</sup>

<sup>1-3</sup>, <sup>5</sup>NSC «O.N. Sokolovsky Institute for Soil Science and Agrochemistry», 4 Chaikovska Str., Kharkiv, 61024; <sup>4</sup>Agro-Industrial Group «BESTA, Ltd.», 6/1 Kadetskyi Hay Str., Kyiv, 03048, Ukraine; e-mail: <sup>1</sup>ecosoil@meta.ua, <sup>2</sup>ye.hladkikh@ukr.net, <sup>3</sup>panasenko-evgeniy777@ukr.net, <sup>4</sup>bogomaz743@ukr.net, <sup>5</sup>arv55@ukr.net; ORCID: <sup>1</sup>0000-0003-2830-5933, <sup>2</sup>0000-0002-4852-0502, <sup>3</sup>0000-0002-5248-0179

### **Efficiency of nano-fertilizer based on bound carbon in improving crop nutrition**

**Goal.** To study the biological efficiency of nano-fertilizers based on bound carbon on the stimulation of growth processes and coefficients of consumption of basic nutrients from mineral fertilizers. **Methods.** The study was carried out in laboratory and field experiments in 2023–2024. The laboratory experiment was conducted to determine the effects of different doses (concentrations of the solution) of nano-fertilizers on the sowing qualities of wheat, soybean, and cucumber seeds. In the field experiment on the typical chernozem, they studied the effect of seed treatment and foliar feeding of crops on winter rape, and the efficiency of consumption of nutrients from

mineral fertilizers. **Results.** The high efficiency of nano-fertilizers based on bound carbon used in the pre-sowing treatment of seeds and as foliar feeding on vegetative plants in combination with mineral fertilizers was established. The optimal concentrations of nano-fertilizer for pre-sowing treatment of wheat, soybean, and cucumber, as well as the most effective combination of mineral and nano-fertilizer for sowings of winter rape were determined. A significant improvement in the consumption of the main nutrients with mineral fertilizers by plants of rape during the growing season was proven by adding nano-fertilizer to the fertilizer system. **Conclusions.** Recommended doses of nano-fertilizer for pre-sowing treatment of wheat seeds were 2 l/t, soybeans, and cucumber — 5 l/t. Adding carbon-based nano-fertilizer to the fertilizer system of winter rape contributed to an increase in its crop by 0.74–1.35 t/ha. The coefficients of use of nutrients from mineral fertilizers increased by 1.2–2.5 times, and the agronomic efficiency of mineral fertilizers — by 2.9 times.

**Key words:** plant growth regulators, crop, productivity, efficiency of use of macronutrients, foliar feeding.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202502-02>

## **Бібліографія**

1. Стратегія розвитку сільського господарства та сільських територій в Україні на період до 2030 року. Затвердж. розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15.11.2024 р. № 1163-р.

2. Penuelas J., Coello F., Sardans J. A better use of fertilizers is needed for global security and environmental sustainability. *Agriculture et Food Security*. 2023/12/ Article number 5. doi: 10.1186/s40066-023-00409-5

3. Zaib M., Zubair M., Aryan M. et al. A Review on Challenges and Opportunities of Fertilizer Use Efficiency and Their Role in Sustainable Agriculture with Future Prospects and Recommendations. *Current Research in Agriculture and Farming*. 2023. 4(4). P. 1–14. doi: 10.18782/2582-7146.201

4. Система удобрення сільськогосподарських культур в землеробстві початку XXI століття: моногр.; за ред. С.А. Балюка, М.М. Мірошніченка. Київ: Альфа-Стевія, 2016. 400 с.

5. Doberman A., Bruulsema T., Cakmak I. et al. Responsible Plant nutrition: A new paradigm to support food system transformation. *Global Food Security*. 2022. 33. 100636 doi: 10.1016/j.gfs.2022.100636

6. Filho W., Fedoruk M., Eustachio Jo. et al. How the War in Ukraine Affects Food Security. *Foods*. 2023. 12(21). Article number 3996. doi: 10.3390/foods12213996

7. Popko M., Michalak I., Wilk R. et al. Effect of the New Plant Growth Biostimulants Based on Amino Acids on Yield and Grain Quality

of Winter Wheat. *Molecules*. 2018. 23(2). doi: 10.3390/molecules23020470

8. Cao Z., Wang X., Gao Y. Effect of Plant Growth Regulators on Cotton Seedling Root Growth Parameters and Enzyme Activity. *Plants*. 2022. 11(21). doi: 10.3390/plants11212964

9. Li J., Van G.T., Geelen D.A Meta-Analysis of Biostimulant Yield Effectiveness in Field Trials. *Frontiers in Plant Science. Full*. 2022. 13. doi: 10.3389/fpls.2022.836702

10. Hunter M.C., Smith R.G., Schipanski M.E. et al. Agriculture in 2050: recalibrating targets for sustainable intensification. *Bio-science*. 2017. 67. P. 386–391. doi: 10.1093/biosci/bix010

11. Каленська С., Новицька Н. Нанодобрива в сучасному сільському господарстві. *Агробізнес сьогодні*. Онлайн-посилання: <https://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/24730-nanodobryva-v-suchasnomu-silskomu-hospodarstvi.html>. Дата звернення 12.03.2024.

12. Ricci M., Tilbury L., Daridon B. et al. General principles to justify plant biostimulant claims. *Front. Plant Science*. 2019. 10. P. 494. doi: 10.3389/fpls.2019.00494

13. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. Державний стандарт (ДСТУ 4138-2002). Київ: Держспоживстандарт України, 2003. 173 с.

14. Guirguis A., Yang W., Conlan X.A. et al. Boosting Plant Photosynthesis with Carbon Dots: A Critical Review of Performance and Prospects. *Small*. 2023. 19. Is. 43. Article number 2300671. doi: 10.1002/smll.202300671

15. Chakravarty D., Erande M.B., Late D.J. Graphene quantum dots as enhanced plant growth regulators: effects on coriander and garlic plants. *J. Science Food Agriculture*. 2015. 95(13). Article number 2772-8. doi: 10.1002/jsfa.7106

16. Zhang X., Cao H., Wang H. et al. The Effects of Graphene-Family Nanomaterials on Plant Growth: A Review. *Nanomaterials*. 2022. 12(6). 936. doi: 10.3390/nano12060936