РОСЛИННИЦТВО ТА КОРМОВИРОБНИЦТВО

УДК 620.3:633.34 https://doi.org/10.31548/agr2020.03.007

ЕФЕКТИВНІСТЬ НАНОПРЕПАРАТІВ У ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ СОЇ

КАЛЕНСЬКА С. М., *доктор с.-г. наук, професор, член-кореспондент НААН України, завідувач кафедри рослинництва*
https://orcid.org/0000-0002-3393-837x
E-mail: kalenskaya@nubip.edu.ua
НОВИЦЬКА Н. В., *кандидат с.-г. наук, доцент кафедри рослинництва*
https://orcid.org/0000-0002-7645-4151
E-mail: novictska@ukr.net
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація. *Нанотехнології розглядаються як одна з ключових технологій у двадцять першому сторіччі, яка обіцяє вдосконалити традиційні сільськогосподарські практики та запропонувати стійкий розвиток через вдосконалення тактики управління та збереження внаслідок зменшення витрат сільськогосподарських ресурсів. Створення та впровадження нових екологічно безпечних і технологічних нанопрепаратів, покликаних підвищити ефективність використання рослинами поживних елементів мінеральних добрив і ґрунту є одним зі шляхів підвищення урожайності культур та якості сільськогосподарської продукції. Мета досліджень полягала у встановленні впливу передпосівної обробки насіння та підживлення посівів нанопрепаратами Аватар (мікродобриво карбоксилатів природних кислот), Йодіс-концентрат (імуномодулятор – стимулятором ростових процесів) та Супер Мікро Плюс (нанохелатне добриво) на формування листового апарату, активність симбіотичної азотфіксації та урожайність сорту сої Хорол. Польові дослідження проводили у 2016 – 2020 рр. в стаціонарному досліді у ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» у 10-ти пільній польовій сівозміні та на базі навчально-наукової лабораторії «Демонстраційне колекційне поле сільськогосподарських культур» кафедри рослинництва. У результаті проведених досліджень встановлено, що застосування нанопрепаратів Аватар, Йодіс-концентрат та Супер Мікро Плюс для обробки насіння та в підживлення активізувало формування листкової поверхні та діяльність симбіотичного апарату рослин сої. Отримані результати підтверджують, що внесення комплексу нанодобрив Йодіс-концентрат, Аватар та Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus у підживлення сої сприяло підвищенню врожайності, що свідчить про*

безумовну їхню ефективність. Найвищу ефективність нанодобрива проявили за інокуляції та обробки насіння Аватаром за сумісного підживленням Аватар+ Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus, забезпечуючи формування 52,4 тис. м²/га площі листової поверхні посівів сої сорту Хорол, 69,7 шт./рослину бульбочок на кореневій системі, 785 мг/рослину їхньої маси та врожайність на рівні 2,79 т/га.

Ключові слова: *соя, інокуляція насіння, підживлення посівів, Аватар, Йодіс-концентрат, Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus, площа листової поверхні, кількість та маса бульбочок, урожайність*

Вступ.

Формування стійкого харчового майбутнього кількісно визначає проблеми, що стоять перед глобальною продовольчою системою. Попит на продовольство до середини століття зросте більше, ніж на 50 %, а попит на продукти на тваринній основі майже на 70 %. Водночас Dijk V.M., вказує, що необхідно на 60–100 % більше їжі (Dijk V.M., Meijerink G.W., 2014). Уже сьогодні, сотні мільйонів людей недоїдають, а в деяких регіонах проявляються відкриті форми голоду. У липні 2019 року був опублікований звіт про світові ресурси «Забезпечення стабільного харчування», у якому запропоновано декілька сценаріїв рішень як прогодувати 10 млрд населення планети в 2050 році (Searchinger T., Waite R., Hanson C. & Ranganathan J., 2019). Цей звіт – результат багаторічної партнерської співпраці між Інститутом світових ресурсів, Групою Світового банку, Програмою ООН із навколишнього середовища, Програмою розвитку Організації Об'єднаних Націй та Інтернаціональним Центром співпраці. У звіті основна увага зосереджена на технічних можливостях та політиці можливих економічно вигідних сценаріїв щодо вирішення глобальних проблем людства до 2050 року.

Для задоволення попиту на продукти харчування зростає інтенсивність виробництва, що так само призводить до виснаження родючості ґрунтів та зниження врожайності сільського господарства (Kirchmann H., Börjesson G, Bolinde M. A. at all., 2020). Приблизно 40 % сільськогосподарських угідь у світі, через інтенсивне виробництво, деградували, що призвело до значних втрат родючості ґрунтів (Kale A. P., Gawade S. N., 2016). Для вирішення зростаючих викликів сталого виробництва та продовольчої безпеки, за останні роки в галузі сільського господарства досягнуто значних технологічних досягнень та інновацій (Dwivedi S., Saquib Q., Al-Khedhairy A.A., 2016; Kou T. J., Yu W. W., Lam S. K. at all., 2018).

Нанотехнології мають значний потенціал для ефективного розв'язання проблем, пов'язаних із сільським господарством. Нанотехнології розглядаються як одна з ключових технологій у двадцять першому сторіччі, яка обіцяє вдосконалити традиційні сільськогосподарські практики та запропонувати стійкий розвиток через удосконалення тактики управління та збереження внаслідок зменшення витрат сільськогосподарських ресурсів (Dwivedi, S., Saquib, Q., Al-Khedhairy, A. A., & Musarrat J., 2016; Dubey, A., Mailapalli, D. R., 2016). За останні два десятиліття проведено значну

кількість досліджень у галузі нанотехнологій та їхнього використання в сільському господарстві (Chen, Y. W., Lee, H. V., Juan, J. C. & Phang, S. M., 2016; Honchar, L., Kalenska, S. & Novictska, N. et al., 2017; Makarenko, N. A., Kalenska, S. M. & Rudnitska, L. V., 2015; Prasad, R., Bhattacharyya, A., & Nguyen, Q. D., 2017).

Добрива відіграють ключову роль у зростанні врожайності сільськогосподарських. культур. Однак надмірне використання добрив безповоротно змінює екологію ґрунту, зменшуючи придатні для рослинництва площі. Стале сільське господарство передбачає мінімальне використання агрохімікатів, що з часом може захистити довкілля та зберегти деякі види від зникнення. Наноматеріали підвищують продуктивність сільськогосподарських культур, збільшуючи ефективність використання природних та промислових ресурсів через цільову контрольовану доставку елементів живлення. Одне з основних завдань рослинництва полягає в управлінні адаптаційними властивостями рослин до прогресуючої зміни клімату, таких як екстремальні температури, дефіцит води, солоність, лужність та забруднення довкілля токсичними металами, не загрожуючи існуючим чутливим екосистемам (Eremenko, O., Kalenska, S., Pokoptseva, L. & Todorova, L., 2019; Eremenko, O., Kalitka, V., Kalenska, S. & Malkina, V., 2018; Vermeulen, S. J., Aggarwal, P. K. & Ainslie, A. et al., 2012). Розробка та використання наносенсорів за точного виробництва продукції рослинництва, суттєво покращили контроль людиною стану грунту та рослин, контроль якості та забезпечення безпеки, сприяючи сталому сільському господарству та екологічним системам (Chen, Y. W., Lee, H. V., Juan, J. C. & Phang, S. M., 2016). Наноматеріальна інженерія є передовим напрямом досліджень, що підтримує розвиток високотехнологічного сільськогосподарського виробництва, пропонуючи більш широку питому площу, що має вирішальне значення для сталого розвитку систем сільського господарства (He, X., Deng, H., & Hwang, H.-M., 2018; Panpatte, D. G., Jhala, Y. K., Shelat H. N. & Vyas, R. V., 2016; Worrall, E., Hamid, A. & Mody, K. et al., 2018).

Актуальним для сільського господарства України є створення та впровадження нових екологічно безпечних і технологічних препаратів, покликаних підвищити ефективність використання рослинами поживних елементів мінеральних добрив і ґрунту (Lopatko, K. H., Aftandiliants, E. H, Kalenska, S. M. & Tonkha, O. L., 2009; Makarenko, N. A., Kalenska, S. M. & Rudnitska, L. V., 2015). Це сприяє підвищенню врожайності культур та якості продукції і, відповідно зростає загалом ефективність вирощування культур (Eremenko, O., Kalenska, S., Pokoptseva, L. & Todorova, L., 2019; Eremenko, O., Kalitka, V., Kalenska, S. & Malkina, V., 2018). Одним зі шляхів досягнення цього може бути розробка інноваційних технологій вирощування рослин у посівах. Важливу роль у цьому відведено новим препаратам: нанодобривам, рістстимулювальним комплексам тощо (Kozyrskyi, V., Zablodskiy, M., & Savchenko, V. et al., 2019).

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Використання інженерних наноматеріалів у рамках сталого сільського господарства показало абсолютно

новий спосіб виробництва продуктів харчування, який потенційно може подолати невизначеність у сільськогосподарському секторі з обмеженими наявними ресурсами (Godfray, H. C. J., Beddington, J. R. & Crute, I. R. et al., 2010; Sytar, O., Novicka, N. & Taran, N. et al., 2010). Інженерія наночастинок – одне з останніх технологічних нововведень, яке демонструє унікальні цільові характеристики з підвищеною міцністю. Термін «нанотехнологія» вперше був уведений Норіо Танігуїчі, професором Токійського університету наук, в 1974 році (Khan, M. R., Rizvi, T. F., 2014). Нещодавні досягнення у виробництві наноматеріалів різних розмірів та форм дали широкий спектр застосувань у медицині, екології, сільському господарстві та харчовій промисловості.

Використання нанорозмірних частинок (НРч) є відносно новою технологічною інновацією, яка все ще перебуває в процесі поступового розвитку (Gogos, A., Knauer, K. & Bucheli, T. D., 2012). Історично доведено, що такі досягнення в науці та виробництві, мають значний вплив на розвиток сільського господарства, яке постійно стикається з численними та безпрецедентними проблемами, пов'язаними з біотичними та абіотичними стресами рослин (Chen, Y. W., Lee, H. V., Juan, J. C. & Phang, S. M., 2016; Prasad, R., Bhattacharyya, A., & Nguyen, Q. D., 2017).

Нині є значна кількість перспективних напрямів використання нанотехнологій у рослинництві: джерело елементів живлення, активація та зростання продуктивності фотосинтезу, імунокоректори, антистресори, нанопестициди, специфічні кореневі ефектори для укорінення пагонів та тканинних культур, препарати мультивалентної дії для підвищення стійкості рослин до стресу. Антитранспіранти – сприяють зниженню транспірації, регулюванню ефективного використання вологи, регулятори росту – у малих дозах активно впливають на обмін речовин, спричиняючи водночас значні зміни в рості та розвитку рослин; наносенсори для діагностики та контролю за точного виробництва продукції рослинництва, збереження екології грунту (He, X., Deng, H., & Hwang, H.-M., 2018; Kalenska, S., Ryzhenko, A., Novytska, N. et al., 2020; Kwak, S.-Y., Wong, M. H. & Lew, T. T. S. et al., 2017).

Величезна кількість добрив використовується для поліпшення родючості ґрунту та підвищення продуктивності культур (Dubey, A., Mailapalli, D. R., 2016). За багато чисельними даними, показано, що третина продуктивності врожаю припадає на добрива, а решта залежить від ефективності використання інших сільськогосподарських ресурсів. Проте ефективність використання поживних речовин із традиційних добрив не перевищує 30–40 % (Dijk, V. M., Meijerink, G. W., 2014). Ефективність використання поживних речовин звичайних добрив, таких як азот (N) – 30–35 %, фосфору (P) – 18–20 та калію (K) – 35–40 %, залишалася незмінною впродовж останніх кількох десятиліть (Subramanian, K. S., Manikandan, A., Thirunavukkarasu, M. & Rahale, C. S., 2015). Ефективність використання поживних речовин звичайних добрив, що вносяться безпосередньо в ґрунт або у вигляді підживлень по листу, значною мірою залежить від кінцевої концентрації добрив, що досягає цільового місця (Solanki, P., Bhargava, A. & Chhipa, H. et al., 2015). А досягає дуже низь-

ка кількість – набагато нижча за мінімально необхідну концентрацію, через втрати хімічних речовин у разі вимивання, внесення, стоку, гідролізу, випаровування, деградації (Sabir, A., Yazar, K. & Sabir, F. et al., 2014). Як наслідок, багаторазове використання надмірної кількості добрив негативно позначається на властивій рівновазі поживних речовин ґрунту. Окрім цього, водне середовище серйозно забруднюється через вимивання токсичних речовин у річки та водойми, зумовлюючі забруднення питної води (Solanki, P., Bhargava, A. & Chhipa, H. et al., 2015). На початку 1970 року для виробництва однієї тонни зерна було потрібно лише 27 кг NPK ha^{-1}, тоді як у 2008 році він досяг 109 кг NPK ha^{-1}, щоби досягти того ж рівня виробництва. За даними Міжнародної асоціації промислових добрив (IFIA), світове споживання добрив різко зростало, і, за прогнозами, світовий попит досягне 192,8 млн тонн до 2016 – 2017 років (Heffer, P., Prud'homme, M., 2012). Значна частина хімікатів залишається в ґрунті або може потрапити в інші екологічні ніші, що призводить до сильного забруднення довкілля, та впливає на нормальний ріст флори та фауни.

Контрольовано вивільнені нанодобрива (наночастинки) покращують ріст та розвиток рослин, сприяють збільшенню урожайності та продуктивності (Kale, A. P., Gawade, S. N., 2016; Makarenko, N. A., Kalenska, S. M. & Rudnitska, L. V., 2015; Shcherbakova, E. N., Shcherbakov, A. V. & Andronov, E. E. et al., 2017). Підхід щодо цільової доставки елементів живлення на основі нанорозмірних частинок використовується для оптимізації продуційного процесу, направлено змінюючи його проходження, шляхом певних напрямів їхньої функціональної ефективності (Makarenko, N. A., Kalenska, S. M. & Rudnitska, L. V., 2015).

Для зниження дефіциту макро- та мікроелементів завдяки підвищенню ефективності використання поживних речовин та подолання хронічної проблеми забруднення довкілля найкращими альтернативами можуть бути нанодобрива (Shcherbakova, E. N., Shcherbakov, A. V. & Andronov, E. E. et al.; 2017; Subramanian, K. S., Manikandan, A., Thirunavukkarasu, M. & Rahale, C. S., 2015). Нанодобрива, синтезовані спеціально для регульованого вивільнення поживних речовин залежно від потреб культур, мінімізуючи диференціальні втрати, мають величезний потенціал (Batsmanova, L., Taran, N. & Konotop, Y. et al., 2020). Звичайні азотні добрива характеризуються величезними втратами з ґрунту через вимивання, випаровування або, навіть, деградацію до 50–70 %, що в кінцевому рахунку знижує ефективність добрив і підвищує собівартість продукції (Miao, Y. F., Wang, Z. H. & Li, S. X., 2015; Wang, Z. H., Miao, Y. F. & Li, S. X., 2015). З іншого боку, наноформули азотистих добрив синхронізують «викид» добрива-N із попитом культури, що запобігає небажаним втратам поживних речовин унаслідок прямого використання посівами, тим самим уникаючи взаємодії поживних речовин із ґрунтом, водою, повітрям та мікроорганізмами (Dwivedi, S., Saquib, Q., Al-Khedhairy, A. A., & Musarrat J., 2016; Panpatte, D. G., Jhala, Y. K., Shelat H. N. & Vyas, R. V., 2016). Застосування пористих наноматеріалів, таких як цеоліти, глина або хітозан, значно зменшує втрати азоту, регулюючи викиди на

основі попиту та покращуючи процес засвоєння рослин (Panpatte, D. G., Jhala, Y. K., Shelat H. N. & Vyas, R. V., 2016). Цеоліти, заряджені амонієм, здатні підвищувати розчинність фосфатних мінералів. Довгострокова доступність усіх легованих поживних речовин для рослини протягом повного періоду вирощування є вирішальним для сприяння проростанню, зростання, цвітіння та плодоношення (Shcherbakova, E. N., Shcherbakov, A. V. & Andronov, E. E. et al., 2017).

Мета досліджень – з'ясувати вплив передпосівної обробки насіння та підживлення посівів нанопрепаратами Аватар (мікродобриво карбоксилатів природних кислот), Йодіс-концентрат (імуномодулятор – стимулятором ростових процесів) та Супер Мікро Плюс (нанохелатне добриво) на формування листового апарату, активність симбіотичної азотфіксації та урожайність сорту сої Хорол.

Матеріали і методи досліджень.

Польові дослідження проводили у 2016–2020 рр. в стаціонарному досліді у ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» у 10-ти пільній польовій сівозміні та на базі навчально-наукової лабораторії «Демонстраційне колекційне поле сільськогосподарських культур» кафедри рослинництва, яка розташована на території Ботанічного саду НУБіП України. Сорт сої Хорол висівали за прогрівання ґрунту на глибині заробки насіння до +8 °С. В усі роки календарна дата сівби відповідали першій декаді травня.

Відповідно до поставленої мети була розроблена програма дослідження та схема польового досліду (табл. 1), яка передбачала варіанти обробки насіння (чинник А) та підживлення посівів (чинник В) на початку бутонізації (ВВСН 50-53) сої. Насіння перед сівбою обробляли сухим або вологим методом відповідно до розробленої схеми.

Комплексне мікродобриво *Аватар* (Co – 0,0001-0,0025 %, Cu – 0,01-0,08, Zn – 0,001-0,007, Fe – 0,0015-0,008, Mn – 0,0005-0,005, Mo – 0,00001-0,0025, Mg – 0,01-0,08 %), містить одержаний із колоїдних розчинів металів комплекс цитрато-хелатів таких важливих мікроелементів, як цинк, магній, мідь, манган, залізо, кобальт, молібден (ТУ У 24.1-37033728-001 : 2010). Комплексне мікродобриво містить мікроелементи, хелатовані природними органічними кислотами – карбоксилатами, необхідними для росту та розвитку рослин. Рекомендована норма обробки насіння 50 мл/10 кг насіння.

1. Ефективність застосування нанопрепаратів та передпосівної обробки насіння (схема досліду)

Передпосівна підготовка насіння (чинник А) / позначення варіанту	Застосування препаратів (чинник В) / позначення варіанту
Інокуляція насіння (контроль) / А1 Інокуляція насіння + Йодіс- концентрат / А2 Інокуляція насіння + Аватар / А3	Обробка насіння водою (контроль) / В1 Йодіс-концентрат / В2 Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus / В3 Аватар / В4 Аватар+Йодіс концентрат / В5 Аватар+ Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus / В6

Йодіс-концентрат (ТУ У 14326060.003-98) – імуномоделюючий препарат. Водний розчин із вмістом біологічно – активного йоду (70 мг/дм^3). Загальна мінералізація не більше 1000 мг/дм^3. Хімічний склад, мг/дм^3, не більше: Na+K – 10–100; Ca – 50–150; Mg – 10–100; хлориди - <50; гідрокарбонати – 300–600.

Нанохелатне добриво *Супер Мікро Плюс* (Nano Chelate Fertilizer Super Micro Plus) Fe – 4,5 % ((FeO), (FeS) – 9 % від загального), Zn – 8 % ((ZnO), (ZnS) – 13 % від загального), Mn – 0,8 % ((MnO), (MnS) – 3,2 % від загального), K – 3 % ((K_2O) – 5 % від загального), Mg – 6 % ((MgO), (MgS) – 9,5 % від загального), Cu – 0,65 % ((CuO) – 2,7 % від загального), N – 5 % ((NO_2), $(N_2H_4O_3)$ – 10,3 % від загального), P – 3 % ((P_2O_5) – 5 % від загального), Mo – 0,1 % ((MoO_2) – 2,1 % від загального), Ca – 6 % ((CaO), (CaS) – 10,5 % від загального), B – 0,65 % ((B_2O_3) – 2,7 % від загального). Норма позакореневого внесення 9 кг/га.

Площа облікової ділянки – 50 м^2 за чотириразової повторності. Розміщення ділянок систематичне (Ermantraut, E. R., Gopcij, T. I. & Kalenska, S. M. et al., 2014). Норма висіву насіння – 600 тис. схожих насінин/га. У якості інокулянта використовували препарат *ХайСтік* (400 г/100 кг насіння). Препаративна форма – стерилізований торф. Діюча речовина – *Bradyrhizobium japonicum* (штам 532 С). Сою вирощували на фоні внесення мінеральних добрив у нормі $N_{45}P_{60}K_{60}$. Внесення препаратів по вегетації проводили ранцевим обприскувачем. Площу листкової поверхні визначали за методикою А. О. Ничипоровича, урожайність – обліковим методом, статистичну обробку даних проводили з використанням програми SAS 9,4.

Результати досліджень.

Соя є надзвичайно вимогливою до чинників довкілля за росту та розвитку рослин і особливо до погодних умов, забезпеченістю елементами живлення. Погодні умови в роки проведення досліджень значною мірою різнилися як за температурним режимом, так і за кількістю опадів. Найбільш сприятливі умови для росту та розвитку рослин були у 2016 та 2018 роках – достатня кількість опадів та оптимальні температури. Погодні умови у 2017 та 2019 роках характеризувалися дефіцитом вологи в певні періоди росту та розвитку рослин за відносно високих середньодобових температур повітря. Водночас погодні умови 2020 року були вкрай несприятливими й наближенні до екстремальних умов щодо забезпечення вологою в поєднанні з критично високими температурами повітря, що негативно вплинуло на ріст і розвиток рослин.

Встановлено, що площа листкової поверхні посівів сої суттєво залежала від погодних умов року (табл. 2–3). Так, вища площа листкової поверхні посівів сої відмічена у 2016 та 2018 роках, нижча – у вкрай несприятливому, посушливому та жаркому 2020 році.

Передпосівна інокуляція насіння в комбінаціях із нанопрепаратами, які використовували для обробки насіння та підживлення по вегетації забезпечували диференціацію рослин щодо росту та розвитку, що насамперед можна було ідентифікувати за інтенсивністю формування площі листкової поверхні. Найбільшу (35,3–37,2 тис. м^2/га), у середньому за роки проведення досліджень, площу листкової поверхні формували посіви сої сорту Хорол на варіантах досліду, де підживлення проводили нанохелатним добривом

2. Площа листової поверхні посівів сої у фазу цвітіння (BBCH 65–70) залежно від обробки нанопрепаратами насіння та рослин, тис. м²/га

Варіант досліду	Рік					Середнє за 2016-2020 рр.	r1
	2016	2017	2018	2019	2020		
A1B1	32,0	29,4	32,4	28,2	20,4	28,5	0,966
A1B2	33,7	29,9	34,4	28,6	22,4	29,8	0,967
A1B3	36,1	30,4	36,8	29,6	26,6	31,9	0,907
A1B4	36,2	32,6	35,8	30,8	22,8	31,6	0,984
A1B5	36,6	30,8	34,2	28,2	24,2	30,8	0,923
A1B6	38,2	35,1	38,4	32,9	28,1	34,5	0,996
A2B1	32,6	30,2	34,4	28,9	20,9	29,4	0,962
A2B2	36,2	33,4	36,4	31,2	22,9	32,0	0,992
A2B3	39,0	34,2	38,8	32,6	27,8	34,5	0,975
A2B4	37,2	36,2	36,8	34,2	22,8	33,4	0,995
A2B5	39,2	37,2	38,4	35,5	24,6	35,0	0,995
A2B6	41,2	37,7	40,2	35,7	28,9	36,7	0,983
A3B1	32,2	31,4	36,4	30,8	21,0	28,9	0,895
A3B2	36,8	33,8	38,4	32,7	23,4	33,0	0,978
A3B3	39,6	34,4	40,4	33,3	28,9	35,3	0,963
A3B4	37,6	35,8	39,4	35,4	23,8	34,4	0,964
A3B5	38,4	36,8	40,2	35,5	24,8	35,1	0,982
A3B6	42,6	32,6	44,6	35,8	30,2	37,2	0,903

Примітка. [1] Кореляція між урожайністю та площею листкової поверхні

Супер Мікро Плюс на фоні обробки насіння комбінацією інокулянта ХайСтік та мікродобрива Аватар. Очевидною є перевага позакореневого підживлення рідкими комплексними нанодобривами, як порівняти з варіантом без підживлення за показником площі листкової поверхні. Застосування нанопрепаратів за обробки насіння та в підживлення активізувало формування листкової поверхні.

Соя, на відміну від багатьох польових культур, і далі активно формує листкову поверхню й після фази цвітіння. Проведене визначення площі листків підтвердило, що максимальні розміри листкової поверхні посівів сої були сформовані в період закінчення формування бобів – початок дозрівання насіння, на 78–82 мікростадіях за шкалою BBCH (табл. 3). У середньому за роки проведення досліджень максимальна (52,4 тис. м²/га) площа листкової поверхні формувалася в період закінчення формування бобів – початок дозрівання насіння на варіанту досліду A3B6 за проведення інокуляції насіння сої, обробки насіння та посівів Аватар + Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus. Площа листкової поверхні в сприятливих для росту та розвитку сої 2016 та 2018 роках за такої комбінації застосування нанопрепаратів, склала 58,0 та 58,8 тис. м²/га відповідно. Застосування нанопрепаратів,

як для передпосівної обробки насіння так і для підживлення по листку, сприяють підвищенню стійкості рослин до абіотичних стресів. За комбінованої посухи у 2020 році посіви сої формували площу листкової поверхні від 30,6 до 44,4 тис. м^2/га, залежно від комбінацій застосування препаратів.

За обробки насіння лише інокулянтом ХайСтік, площа листкової поверхні була суттєво нижчою, як порівняти з іншими варіантами застосування нанопрепаратів. У роки проведення досліджень вона варіювала в межах 30,6–42,2 тис. м^2/га. Серед досліджуваних комбінацій нанопрепаратів для підживлення посівів сої на фоні інокуляції вищу ефективність відмічено на варіанті досліду А1В6, за поєднання інокуляції та Аватар + Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus. Площа листової поверхні між тим варіювала в межах 40,2–52,0 тис. м^2/га.

Активність симбіотичної азотфіксації (табл. 4) досягала максимуму в період їхньої найбільшої фізіологічної активності, в період цвітіння – налив бобів (ВВСН 65-70 – 75-80). До початку наливу бобів відбувалося активне формування бульбочок та наростання їхньої маси в усіх досліджуваних варіантах із наступною фазою маса почала повільно зменшуватися до повної стиглості рослин. Використання

3. Площа листової поверхні посівів сої на початку дозрівання насіння (ВВСН 78–82) залежно від обробки нанопрепаратами насіння та рослин, тис.м^2/га

Варіант досліду	Рік					Середнє за 2016-2020 рр.	r1
	2016	2017	2018	2019	2020		
А1В1	42,2	40,1	40,2	39,5	30,6	38,5	0,911
А1В2	43,4	41,2	41,8	40,5	34,3	40,2	0,949
А1В3	45,4	42,4	43,3	41,2	40,4	42,5	0,879
А1В4	44,4	42,8	42,2	41,5	36,4	41,5	0,970
А1В5	46,8	44,1	44,8	42,5	36,8	43,0	0,972
А1В6	52,0	46,4	50,4	42,5	40,2	46,3	0,972
А2В1	46,6	42,4	44,6	40,1	34,6	41,7	0,983
А2В2	48,2	43,2	46,8	41,3	36,6	43,2	0,931
А2В3	55,3	44,4	54,6	41,7	42,4	47,7	0,892
А2В4	50,2	46,5	48,8	44,8	37,8	45,6	0,979
А2В5	51,2	48,2	50,2	45,7	38,6	46,8	0,979
А2В6	56,4	49,9	56,8	46,9	42,2	50,4	0,972
А3В1	46,0	42,4	45,4	41,5	34,8	42,0	0,964
А3В2	49,4	45,3	46,1	43,5	36,8	44,2	0,976
А3В3	57,4	45,3	55,8	43,3	44,4	49,2	0,911
А3В4	48,4	46,4	47,2	44,8	38,0	45,0	0,997
А3В5	50,4	47,8	48,8	46,7	40,8	46,9	0,992
А3В6	58,0	50,8	58,8	50,2	44,4	52,4	0,981

Примітка. [1] Кореляція між урожайністю та площею листкової поверхні

для підживлення по листу комплексу нанодобрив Аватар та Супер Мікро Плюс виявилося досить ефективним для формування та діяльності симбіотичного апарату рослин сої.

Серед досліджених нами варіантів обробки насіння сої менша кількість бульбочок формувалася на кореневій системі рослин за інокуляції насіння та обробки добривом Йодис-концентра до 40,1 шт./рослину за вегетацію культури. Також треба відмітити, що посушливі погодні умови 2019 року не сприяли значному утворенню бульбочок на коренях сої й на варіанті досліду з інокуляцією насіння без додаткового підживлення посівів кількість бульбочок за вегетацію не перевищувала 12,0 шт./рослину. Обробка насіння нанодобривами

4. Кількість та маса бульбочок на кореневій системі сої сорту Хорол залежно від підживлення, середнє за 2016 – 2020 рр.

Варіант досліду		Фаза росту і розвитку рослин			
		цвітіння		налив бобів	
		кількість бульбочок, шт/рослину	маса бульбочок, мг/рослину	кількість бульбочок, шт/рослину	маса бульбочок, мг/рослину
Інокуляція насіння (А1)					
В1	Обробка насіння водою (контроль)	9,4	48	12,0	51
В2	Йодіс-концентрат	30,3	265	40,1	285
В3	Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus	30,5	284	40,0	300
В4	Аватар	52,5	515	54,2	594
В5	Аватар+Йодіс-концентрат	52,6	569	58,0	625
В6	Аватар+Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus	55,9	585	59,7	681
Інокуляція + Йодіс-концентрат (А2)					
В1	Обробка насіння водою (контроль)	12,5	258	15,1	265
В2	Йодіс-концентрат	34,2	366	42,8	414
В3	Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus	35,1	381	45,2	425
В4	Аватар	53,4	533	60,2	632
В5	Аватар+Йодіс-концентрат	56,8	580	62,1	651
В6	Аватар+Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus	58,1	696	65,5	752
Інокуляція + Аватар (А3)					
В1	Обробка насіння водою (контроль)	15,2	283	18,3	311
В2	Йодіс-концентрат	35,9	384	44,2	429
В3	Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus	36,2	424	46,6	437
В4	Аватар	55,7	615	65,3	704
В5	Аватар+Йодіс-концентрат	59,7	634	68,1	712
В6	Аватар+Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus	61,2	761	69,7	785

Аватар та Йодис-концентрат сумісно з інокуляцією й без додаткового підживлення посівів підвищувала кількість бульбочок упродовж вегетації культури на 7–11 %. Позакореневе внесення мікродобрив Аватар та нанохелатного добрива Супер Мікро Плюс сприяло зростанню кількості бульбочок культури на 11–18 %.

Основним критерієм оцінки ефективності процесів фотосинтезу, біологічної фіксації азоту та формування продуктивності рослин є показники індивідуальної продуктивності рослин та величина урожайності сої. Результати проведених досліджень дали змогу встановити позитивний вплив використання в підживлення нанодобрив Аватар, Йодис-концентрат та Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus на формування показників індивідуальної продуктивності. Урожайність сої суттєво залежала від погодних умов, змінюючись від 1,23 до 3,48 т/га залежно від погодних умов та комбінованого застосування інокуляції насіння та нанодобрив. Найсприятливіші умови для росту й розвитку сої склалися у 2016 році. Урожайність залежно від застосування комбінації препаратів коливалася від 2,27–3,48 т/га (табл. 5).

Урожайність сої в контрольному варіанті без підживлення нанодобри-

5. Урожайність сої залежно від комбінованого застосування нанопрепаратів, т/га

Варіант досліду	Рік					
	2016	2017	2018	2019	2020	Середнє за 2016-2020 рр.
A1B1	2,27	2,14	2,28	1,71	1,23	1,93
A1B2	2,36	2,22	2,34	1,86	1,40	2,04
A1B3	2,62	2,44	2,65	1,88	1,65	2,25
A1B4	2,40	2,28	2,38	2,13	1,42	2,12
A1B5	2,44	2,31	2,49	2,16	1,64	2,21
A1B6	2,84	2,52	2,88	2,18	1,74	2,43
A2B1	2,40	2,22	2,34	1,85	1,36	2,03
A2B2	2,44	2,36	2,46	2,11	1,45	2,16
A2B3	2,82	2,52	2,85	2,10	1,84	2,43
A2B4	2,54	2,44	2,52	2,22	1,49	2,24
A2B5	2,60	2,48	2,66	2,35	1,53	2,32
A2B6	2,90	2,68	2,97	2,37	1,90	2,56
A3B1	2,48	2,31	2,44	1,91	1,48	2,12
A3B2	2,62	2,40	2,56	2,12	1,51	2,24
A3B3	3,23	2,62	3,06	2,15	1,88	2,59
A3B4	2,74	2,51	2,62	2,25	1,53	2,33
A3B5	2,84	2,58	2,78	2,36	1,60	2,43
A3B6	3,48	2,76	3,38	2,39	1,92	2,79
$НІР_{05}$, т/га	0,11	0,10	0,09	0,11	0,08	0,10

вами (контроль) і за обробки насіння лише інокулянтом у середньому за 2016 – 2020 рр. склала 1,93. Передпосівна обробка насіння додатково до інокулювання препаратами Йодіс-концентрат або Аватар сприяла підвищенню урожайності на 0,10–0,19 т/га. Водночас ефективність нанопрепаратів зростала за комбінованого застосування Аватар і Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus. Урожайність сої в контрольному варіанті (А1В1) у 2019 році становила 1,71 т/га, а у варіантах із підживленням по вегетації та комбінованій передпосівній обробці насіння (А2В1; А3В1) урожайність варіювала від 1,86 до 2,36 т/га. Використання для підживлення сої комплексу нанодобрив Аватар + Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus підвищувало урожайність культури до 2,18 (на фоні А1В1); 2,37 (на фоні А2В1); 2,39 т/га (на фоні А3В1).

Найвищу урожайність в усі роки проведення дослідження соя формувала за застосування нанопрепаратів по вегетації рослин, сформованих із насіння обробленого перед сівбою інокулянтом та препаратом Аватар. Більш ефективною була комбінація з передпосівної обробки насіння інокулянтом та Аватаром (А3В1) і підживлення по вегетації Аватар + Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus (А3В6) – 2,79 т/га в середньому за 2016 – 2020 рр. за діапазону зміни урожайності за роками від 1,92 до 3,48.

Висновки.

На основі проведених досліджень встановлено, що застосування нанопрепаратів Аватар, Йодіс-концентрат та Супер Мікро Плюс для обробки насіння та в підживлення активізувало формування листкової поверхні та діяльність симбіотичного апарату рослин сої. Отримані результати підтверджують, що внесення комплексу нанодобрив Йодіс-концентрат, Аватар та Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus у підживлення сої сприяло підвищенню врожайності, що свідчить про безумовну їхню ефективність. Найвищу ефективність нанодобрива проявили за інокуляції та обробки насіння Аватаром за сумісного підживленням Аватар+ Nano Chelate fertilizer Super Micro Plus, забезпечуючи формування 52,4 тис. м^2/га площі листкової поверхні посівів сої сорту Хорол, 69,7 шт./рослину бульбочок на кореневій системі, 785 мг/рослину їхньої маси та врожайність на рівні 2,79 т/га.

References

1. Batsmanova, L., Taran, N. & Konotop, Y. et al. (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: https://doi.org/10.5513/JCEA01/21.2.2414
2. Chen, Y. W., Lee, H. V., Juan, J. C. & Phang, S. M. (2016). Production of new cellulose nanomaterial from red algae marine biomass Gelidium elegans. Carbohydrate Polymers. 151. 1210–1219. DOI: http://doi:10.1016/j.carbpol.2016.06.083
3. Dijk, V. M., Meijerink, G. W. (2014). A review of food security scenario studies: Gaps and ways forward. The Food Puzzle: Pathways to Securing Food for All. Wageningen, The Netherlands. 30–32.
4. Dubey, A., Mailapalli, D. R. (2016). Nanofertilisers, nanopesticides, nanosensors of pest and nanotoxicity in agriculture. Sustainable Agriculture Reviews. Springer; Cham, Switzerland. 19. 307–330.

5. Dwivedi, S., Saquib, Q., Al-Khedhairy, A. A., & Musarrat J. (2016). Understanding the role of nanomaterials in agriculture. Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity. Springer; New Delhi, India. March. 271–288.
6. Eremenko, O., Kalenska, S., Pokoptseva, L. & Todorova, L. (2019). The inffluence of AKM Growth Regulator on Photosynthetic Activity of Oilseed Flax Plants in the Conditions of Insufficient Humidification of the Southern Stepp of Ukraine. Modern Development Paths of agricultural production. 03 July. 703–807. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_78
7. Eremenko, O., Kalitka, V., Kalenska, S. & Malkina, V. (2018). Assessment of ecological plasticity and stability of sunflower hybrids (Helianthus annuus L.) in Ukrainian Steppe Ukraine Journal of Ecology. 8 (1). URL: http://ojs.mdpu.org.ua/index.php/biol/article/view/_214
8. Godfray, H. C. J., Beddington, J. R. & Crute, I. R. et al. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people. Science. 327:812–818. DOI: https://doi:10.1126/science.1185383
9. Gogos, A., Knauer, K. & Bucheli, T. D. (2012). Nanomaterials in plant protection and fertilization: Current state, foreseen applications, and research priorities. J. Agriculture. Food Chem. 60:9781–9792. DOI: https://doi:10.1021/jf302154y
10. He, X., Deng, H., & Hwang, H.-M. (2018). The current application of nanotechnology in food and agriculture. J. Food Drug Anal. 27:1–21. DOI: https://doi:10.1016/j.jfda.2018.12.002
11. Heffer, P., Prud'homme, M. (2012). Fertilizer Outlook 2012–2016. International Fertilizer Industry Association (IFA); Paris, France.
12. Honchar, L., Kalenska, S. & Novictska, N. et al. (2017). Influence colloidal solutions of nanomolybdenum on the efficiency of symbiotic nitrogen fixation in legumes (pea, chickpea). Agriculture & Forestry / Poljoprivreda i Sumarstvo., Vol. 63. Issue 4, 83–89. DOI: https://doi.org/10.17707/AgricultForest.63.4.09
13. Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C. & Ranganathan, J. (2019). Creating a sustainable food futurea. Menu of Solutions to Feed Nearly 10 Billion People by 2050. World resources report. Final report, july. URL: https://wrr-food.wri.org/sites/default/files/2019-07/WRR_Food_Full_Report_0.pdf
14. Kale, A. P., Gawade, S. N. (2016). Studies on nanoparticle induced nutrient use efficiency of fertilizer and crop productivity. Green Chem. Technol. Lett. 2:88–92. DOI: https://doi:10.18510/gctl.2016.226
15. Kalenska, S., Ryzhenko, A., Novytska, N. et al. (2020). Morphological features of plants and yield of sunflower hybrids cultivated in the Northern part of the Forest-Steppe of Ukraine. American journal of Plant Science. Vol. 11. No. 8, August 25. DOI: https://doi.org/10.4236/ajps.2020.118095
16. Khan, M. R., Rizvi, T. F. (2014). Nanotechnology: Scope and application in plant disease management. Plant Pathology J. 13:214–231. DOI: https://doi: 10.3923/ppj.2014.214.231.
17. Kirchmann, H., Börjesson, G. & Bolinde, M. A. et al. (2020). Soil properties currently limiting crop yields in Swedish agriculture – An analysis of 90 yield survey districts and 10 long-term field experiments. European Journal of Agronomy. V. 120, October 2020, 126–132 DOI: https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126132
18. Kou, T. J., Yu, W. W. & Lam, S. K. et al. (2018). Differential root responses in two cultivars of winter wheat (Triticum aestivum L.) to elevated ozone concentration under fully open-air field conditions. J. Agron. Crop Sci. 204:325–332. DOI: https://doi:10.1111/jac.12257.
19. Kozyrskyi, V., Zablodskiy, M., & Savchenko, V. et al. (2019). The Magnetic Treatment of Water Solutions and Seeds of Agricultural Crops. Advanced Agro-Engineering Tech-

nologies for Rural Business Development. 37 p. DOI: http://dx.doi.org/10,4018/978-1-5225-7573-3.ch010
20. Kwak, S.-Y., Wong, M. H. & Lew, T. T. S. et al. (2017). Nanosensor technology applied to living plant systems. Annu. Rev. Anal. Chem. 10:113–140. DOI: https://doi:10.1146/annurev-anchem-061516-045310
21. Lopatko, K. H., Aftandiliants, E. H, Kalenska, S. M. & Tonkha, O. L. Mother colloidal solution of metals. Patent of Ukraine for useful model. № 38459; declared 12.08.2008; published 12.01.2009, № 1. [in Ukrainian].
22. Makarenko, N. A., Kalenska, S. M. & Rudnitska, L. V. (2015). The biological efficacy and environmental safety of nanoagrochemicals. Naukovyi visnyk NUBIP Ukrainy. Seriia: Ahronomiia [Scientific Bulletin of NULES of Ukraine. Series: Agronomy]. 210. 91–96. [in Ukrainian]
23. 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 Res. 170:119–130. DOI: https://doi:10.1016/j.fcr.2014.09.016.
24. Panpatte, D. G., Jhala, Y. K., Shelat H. N. & Vyas, R. V. (2016). Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity. Springer; New Delhi, India. Nanoparticles: The next generation technology for sustainable agriculture. 289–300.
25. Prasad, R., Bhattacharyya, A., & Nguyen, Q. D. (2017). Nanotechnology in sustainable agriculture: Recent developments, challenges, and perspectives. Front. Microbiol. 8:1014. DOI: https://doi:10.3389/fmicb.2017.01014.
26. Sabir, A., Yazar, K. & Sabir, F. et al. (2014). Vine growth, yield, berry quality attributes and leaf nutrient content of grapevines as influenced by seaweed extract (Ascophyllum nodosum) and nanosize fertilizer pulverizations. Sci. Hortic. 175:1–8. DOI: https://doi:10.1016/j.scienta.2014.05.021.
27. Shcherbakova, E. N., Shcherbakov, A. V. & Andronov, E. E. et al. (2017). Combined preseed treatment with microbial inoculants and Mo nanoparticles changes composition of root exudates and rhizosphere microbiome structure of chickpea (Cicer arietinum L.) plants. Biology. Symbiosis, 73(1), 57–69. DOI: https://doi.org/10.1007/s13199-016-0472-1
28. Solanki, P., Bhargava, A. & Chhipa, H. et al. (2015). Nano-fertilizers and their smart delivery system. In: Rai M., Ribeiro C., Mattoso L., Duran N., editors. Nanotechnologies in Food and Agriculture. Springer; Cham, Switzerland. 81–101.
29. Subramanian, K. S., Manikandan, A., Thirunavukkarasu, M. & Rahale, C. S. (2015). Nano-fertilizers for balanced crop nutrition. In: Rai M., Ribeiro C., Mattoso L., Duran N., editors. Nanotechnologies in Food and Agriculture. Springer; Cham, Switzerland. 69–80.
30. Sytar, O., Novicka, N. & Taran, N. et al. (2010). Nanotechnology in modern agriculture. Fizyka zhyvoho [Phys Alive]. 3 (18). 113–116. [in Ukrainian].
31. Vermeulen, S. J., Aggarwal, P. K. & Ainslie, A. et al. (2012). Options for support to agriculture and food security under climate change. Environ. Sci. Policy. 15:136–144. DOI: https://doi:10.1016/j.envsci.2011.09.003
32. 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 Res. 183:211–224. DOI: https://doi:10.1016/j.fcr.2015.07.019
33. Worrall, E., Hamid, A. & Mody, K. et al. (2018). Nanotechnology for plant disease management. Agronomy. 8:285. DOI: https://doi:10.3390/agronomy8120285
34. Ermantraut, E. R., Gopcij, T. I. & Kalenska, S. M. et al. (2014). Metodika selekcijnogo eksperimentu (u roslinnictvi) [Method of selection experiment (in plant growing)] Harkiv. 229. [in Ukrainian]

Kalenska S. M., Novytska N. V. (2020). EFFICIENCY OF NANO PREPARATIONS IN SOYBEAN GROWING TECHNOLOGY. *PLANT AND SOIL SCIENCE, 11(3): 7–21. https://doi.org/10.31548/agr2020.03.007*

Abstract. *Nanotechnology is seen as one of the key technologies in the twenty-first century, which promises to improve traditional agricultural practices and offer sustainable development by improving management and conservation tactics by reducing agricultural resources costs. The creation and implementation of new environmentally friendly and technological nano preparation designed to increase the efficiency of plant nutrient use from mineral fertilizers and soil - is one of the ways to increase crop yields and the quality of agricultural products. The aim of the research was to determine the effect of pre-sowing seed treatment and fertilizing of sowings by nano preparation Avatar (micro fertilizer of carboxylates of natural acids), Iodis-concentrate (immunomodulator – a stimulator of growth processes), and Super Micro Plus (nanochelate fertilizer), and leaf apparatus formation of soybean Khorol variety. Field research was conducted in 2016–2020 in a stationary experiment at the NULES of Ukraine «Agronomic Research Station» in 10-field crop rotation and also in laboratory «Demonstration collection field of crops» of the Plant Science Department. As a result of the conducted researches, was established that the use of nano preparation Avatar, Iodis-concentrate, and Super Micro Plus for seed treatment and fertilizing intensified leaf surface formation and symbiotic apparatus activity of soybean plants. The obtained results confirm that the application of the complex of nano fertilizers Jodis-concentrate, Avatar, and nano-chelate fertilizer Super Micro Plus in the soybean fertilization helped to increase the yield, which indicates their unconditional effectiveness. The highest efficiency of nano fertilizers was shown by inoculation and seed treatment by Avatar with co-fertilizing Avatar +nano-chelate fertilizer Super Micro Plus, providing formation of 52.4 thousand m2/ha of leaf surface area of soybean variety Khorol, 69.7 pcs/plant tubers on the root system, 785 mg/plant of their weight and yield at the level of 2.79 t/ha.*

Keywords: *soybean, seed inoculation, fertilizing of sowings, Avatar, Jodis concentrate, nano-chelate fertilizer Super Micro Plus, leaf surface area, number and weight of tubers, yield.*