


## АГРОНОМІЯ

УДК 633.34:631.847:631.559:631.582

**Вплив біопрепаратів на врожайність та якісні показники насіння сої за гідротермічного стресу в умовах органічного землеробства**Чайка Т.О.<sup>1</sup> , Короткова І.В.<sup>2</sup> , Ляшенко В.В.<sup>2</sup> , Лотиш І.І.<sup>1</sup> <sup>1</sup> ВСП «Аграрно-економічний фаховий коледж Полтавського державного аграрного університету»<sup>2</sup> Полтавський державний аграрний університет Чайка Т.О. E-mail: chaika\_ta@ukr.net

Чайка Т.О., Короткова І.В., Ляшенко В.В., Лотиш І.І. Вплив біопрепаратів на врожайність та якісні показники насіння сої за гідротермічного стресу в умовах органічного землеробства. «Агробіологія», 2026. № 1. С. 198–209.

Chaika T., Korotkova I., Liashenko V., Lotysh I. Effects of biopreparations on soybean yield and seed quality under hydrothermal stress in organic farming systems. «Agrobiology», 2026. no. 1, pp. 198–209.

Рукопис отримано: 04.03.2026 р.

Прийнято: 19.03.2026 р.

Затверджено до друку: 19.05.2026 р.

doi: 10.33245/2310-9270-2026-203-1-198-209

ISSN 2310-9270

В умовах органічного виробництва та посилення гідротермічних коливань актуальним є пошук біологічних засобів підвищення продуктивності сої та забезпечення якості насіння. Метою дослідження було визначити ефективність комплексного застосування біопрепаратів різної функціональної дії – арбускулярних мікоризних грибів, азотфіксуючих бактерій і фітогормональних регуляторів – у формуванні врожайності та біохімічного складу насіння сої за змінних погодних умов. Польові дослідження проводили у 2022–2024 рр. у Лівобережному Лісостепу України на ранньостиглому сорті сої Хорол за системи органічного землеробства. Дослід включав вісім варіантів застосування біопрепаратів: контроль, Профіх, Віолар, Мікофренд та їх різні комбінації. Вміст білка й олії визначали методом ближньої інфрачервоної спектроскопії, а фізіолого-біохімічні показники (відносний вміст води (ВВВ) у листках, продихову провідність (ПП), вміст абсцизової кислоти (АБК) і малонового діальдегіду (МДА)) оцінювали у фазу цвітіння (ВВСН 61). Статистичну обробку результатів здійснювали із застосуванням дисперсійного аналізу (ANOVA), тесту Тьюкі HSD, кореляційного аналізу Пірсона й аналізу головних компонентів. Найбільш ефективним виявилось поєднане застосування трьох біопрепаратів, яке забезпечило врожайність 2,96–3,57 т/га, що на 40,6–59,1 % перевищувало контроль. Підвищення врожайності було зумовлене насамперед збільшенням кількості насінин на рослину (до 130 шт.), тимчасом маса 1000 насінин змінювалася незначно. Зафіксовано також зростання вмісту білка (до 5,7 відсоткових пунктів) і підвищення олійності насіння до 19,3 %. У посушливіших умовах 2024 р. комбіновані обробки сприяли підтриманню вищого водного статусу рослин (до 91,9 %), зниженню вмісту МДА (на 47,7 % відносно контролю) й АБК (на 34,1 %). Встановлено тісний позитивний зв'язок між ВВВ та врожайністю ( $r = 0,92$ ) і сильну обернену кореляцію між вмістом АБК та ПП ( $r = -0,98$ ). Отримані результати свідчать, що використання комплексної системи біопрепаратів у технології органічного вирощування сої сприяє стабілізації продуктивності та підвищенню поживної цінності насіння за контрастних гідротермічних умов.

**Ключові слова:** *Glycine max* L., арбускулярні мікоризні гриби, азотфіксуючі бактерії, фітогормональні регулятори, вміст білка, олійність насіння, відносний вміст води, продихова провідність, абсцизова кислота, малоновий діальдегід.

**Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень.** Сільськогосподарська галузь наразі перебуває під подвійним впливом комплексних абіотичних стресорів і зростання населення світу. Абіотичні стресори становлять постійну загрозу для продуктивності сільського господарства, що призводить до потенційного скорочення врожайності до 70 % [1]. При цьому соя є основною олійною культурою світового виробництва зі стабільною динамікою зростання [2], що пояснюється можливістю універсального використання насіння, особливо для харчових та кормових цілей [3]. Зростаючий попит і поява нових сортів зі стабільною врожайністю та якісним насінням сприяють подальшому розширенню площ вирощування сої у світі [4]. Проте реалізація продуктивного потенціалу культури дедалі більше обмежується передусім гідротермічною нестабільністю вегетаційного сезону.

Мікробні біостимулятори на основі арбускулярних мікоризних грибів (АМГ), ризобій, ризосферних бактерій, що сприяють росту рослин (PGPR), і фітогормонів розглядаються як перспективний інструмент підвищення продуктивності та стресостійкості сої [5, 6]. Симбіотичні взаємодії з АМГ покращують поглинання фосфору і води, активують антиоксидантні ферменти та знижують інтенсивність перекисного окиснення ліпідів, стабілізуючи клітинні мембрани за посухи [7, 8]. Асоціації з *Bradyrhizobium japonicum* забезпечують біологічну фіксацію атмосферного азоту і стимулюють розвиток кореневої системи, однак інтенсифікація азотного живлення може супроводжуватися перерозподілом асимілятів з ліпідної фракції на користь білкової [9, 10]. Спільна інокуляція *B. japonicum* і АМГ підвищувала врожайність, поліпшувала водний статус рослин і знижувала оксидативне пошкодження мембран за умов польового водного дефіциту [11, 12]. Застосування трикомпонентних мікробних консорціумів додатково покращувало вміст білка та олії в насінні, причому ефект зростав пропорційно до ускладнення складу консорціуму [13].

Фітогормональні біостимулятори доповнюють мікробні інокулянти через регуляцію балансу між ростовими процесами і захисними реакціями. Абсцизова кислота (АБА) відіграє центральну роль у контролі продигової провідності та активації антиоксидантних систем за водного дефіциту [14, 15], тимчасом ауксини, цитокініни й гібереліни здатні оптимізувати фітогормональний баланс і посилювати стресостійкість рослин [16, 17].

Інтеграція таких метаболітів з АМГ і ризобіями забезпечує синергетичні ефекти на ключові фізіолого-біохімічні процеси, сприяючи підвищенню продуктивності культур за несприятливих умов вирощування [18].

Незважаючи на значний масив лабораторних даних, інформація про порівняльну ефективність моно- та багатокомпонентних систем мікробних і фітогормональних біостимуляторів щодо врожайності, структурних компонентів урожаю та якісних показників насіння сої (вміст білка, олії, загального азоту) за варіабельних гідротермічних умов у польових дослідках органічного землеробства Лівобережного Лісостепу України залишається обмеженою.

**Метою дослідження** є оцінка впливу мікробних біостимуляторів на основі АМГ (*Glomus* sp., *Trichoderma harzianum* + PGPR), азотфіксуючого інокулянта (*Bradyrhizobium japonicum*) та фітогормонального препарату на врожайність, структурні компоненти врожаю, якість насіння та фізіолого-біохімічний стан рослин сої за варіабельних гідротермічних умов в органічній системі виробництва.

**Матеріал та методи дослідження.** Польові дослідження виконували протягом 2022–2024 рр. у агроєкологічних умовах Лівобережного Лісостепу України (Кременчуцький район Полтавської області). Об'єктом дослідження був ранньостиглий сорт сої Хорол (оригінація – ТОВ «Науково-дослідний інститут сої»).

Ґрунт дослідних ділянок – чорнозем залишково-солонцюватий на лесових відкладах. За результатами агрохімічного аналізу орного шару (0–20 см), проведеного на мультипараметричному фотометрі Palintest SK500 (Palintest Ltd., UK), встановлено: рНКСІ 6,3 (слабокисла реакція); гумус – 5,2 % (високий); загальний азот і рухомий фосфор – відповідно 58,6 мг/кг і 78,3 мг/кг (середній рівень забезпечення); обмінний калій – 138,4 мг/кг (високий).

Дослід закладено методом рандомізованих блоків у чотирикратній повторності. Загальна площа становила 0,3 га, облікова – 0,1 га.

Агротехнічні заходи відповідали зональним вимогам органічної технології вирощування [19] і включали: 1) осінню оранку оборотним плугом після попередника (ячмінь ярий); 2) весняне боронування важкою шлейфовою бороною для закриття вологи; 3) передпосівну культивування стерньовим культиватором; 4) досходове (фаза «білої ниточки») та післясходове боронування сітчастою бороною Striegel; 5) дві міжрядні культивування.

Сівбу проводили в оптимальні для кожного року строки (20 квітня – 5 травня) на глибину 5 см. Ширина міжрядь – 38 см, норма висіву – 700 тис. схожих насінин/га.

Спостереження за погодними умовами та динамікою опадів здійснювали щорічно протягом вегетаційного періоду (травень–серпень), що дало змогу оцінити ступінь зволоження з використанням гідротермічного коефіцієнта (ГТК) Г. Т. Селянінова [20]. Погодні умови вегетаційного періоду сої протягом 2022–2024 рр. характеризувалися значною варіабельністю гідротермічного режиму (рис. 1), що дозволило класифікувати їх як: 2022 р. – сприятливий; 2023 р. – надзвичайно сприятливий; 2024 р. – стресовий (гідротермічний дефіцит) [21].

Для оцінки ефективності застосування біологічних засобів в органічному виробництві сої відібрано три препарати з різними механізмами дії та потенціалом синергетичних взаємодій: 1) Мікофренд® (БТУ-Центр, Україна) – комплекс мікоризних грибів (*Glomus* sp., *Trichoderma harzianum*) і ризосферних бактерій (*Pseudomonas fluorescens*, *Streptomyces* sp., *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*, *B. muciloginosus*, *B. subtilis*, *Enterobacter* sp.); 2) Profix® (Certis Belchim, Бельгія) – містить три штами бульбочкових бактерій: *Bradyrhizobium japonicum* USDA442 (532 C) та *B. diazoefficiens* SEIMA 5079 і SEIMA 5080; 3) Віолар® (ТОВ «ІК «Біоінвест-Агро»,

Україна) – фітогормональний препарат, що містить ауксини, цитокініни, гібереліни, абсцизову кислоту, вільні амінокислоти, ліпіди та стероли.

Схема дослідження включала вісім варіантів застосування біопрепаратів, наведених у попередньому дослідженні [18]: схема 1 – контроль (вода); схема 2 – Profix; схема 3 – Віолар; схема 4 – Мікофренд; схема 5 – Profix + Віолар; схема 6 – Мікофренд + Profix; схема 7 – Мікофренд + Віолар; схема 8 – Мікофренд + Profix + Віолар. Обробку насіння проводили перед посівом (за 30–60 хв) із дотриманням рекомендованих норм витрати, обприскування посівів – у фазу ВВСН 61 (початок цвітіння).

Відносний вміст води (ВВВ) у листках визначали щотижня впродовж семи тижнів за стандартною формулою [22]; детальний опис процедури наведено в [18].

Вміст абсцизової кислоти (АБК) у листках визначали методом флуоресцентної спектроскопії на спектрометрі PerkinElmer LS-45; підготовку екстрактів виконували за протоколом [23].

Продихову провідність (ПП) вимірювали порометром SC-1 (Decagon Devices, Inc., США) з інтервалом вимірювань 30 с у чотирьох повторностях на варіант.

Концентрацію малонового діальдегіду (МДА) у листових тканинах визначали у фазу ВВСН 61 за методикою [24].



Рис. 1. Динаміка опадів, середньомісячної температури та гідротермічного коефіцієнту впродовж вегетаційного періоду вирощування сої, 2022–2024 рр.

Джерело: розраховано та побудовано авторами.

Вміст білка у насінні сої визначали у фазу повної стиглості (R8) після збирання врожаю методом ближньої інфрачервоної спектроскопії (NIR) на аналізаторі AgriCheck Plus (Bruins Instruments, Німеччина) з використанням калібрувальної моделі для сої. Результат виражали у відсотках від сухої речовини.

Вміст загального азоту (N, %) розраховували за формулою:

$$N = \frac{\text{Вміст білка, \%}}{5,71},$$

де 5,71 – коефіцієнт перерахунку для сої [25].

Вміст олії у насінні сої визначали у фазу повної стиглості (R8) після збирання врожаю методом NIR на аналізаторі AgriCheck Plus (Bruins Instruments, Німеччина) із застосуванням калібрування, валідованого для сої. Показники подано у відсотках від сухої речовини.

Масу 1000 насінин визначали у фазу повної стиглості (R8) на очищеному насінні. Для кожної повторності відліковували 1000 насінин та зважували їх, після чого показник перераховували до стандартної вологості 14,0 % для забезпечення порівнянності між варіантами та роками.

Кількість насінин з рослини визначали у фазу повної стиглості (R8) перед збиранням врожаю. У кожній повторності випадково відбирали 10 рослин із центральної частини ділянки для уникнення крайового ефекту. Рослини зрізали на рівні ґрунту, підсушували та обмолочували вручну, після чого підраховували кількість насінин і обчислювали середнє значення на одну рослину.

Рослини збирали вручну з облікових ділянок після попереднього скошування надземної маси; урожайність перераховували на стандартну вологість 14 % і виражали в т/га.

Для кожного року окремо розраховано середнє значення ( $\bar{x}$ ) та стандартну похибку (SE) для кожного варіанта. Відмінності між варіантами в межах року оцінено однофакторним дисперсійним аналізом (one-way ANOVA) з подальшим *post hoc*-тестом Тьюкі HSD ( $P < 0,05$ ). Для інтегральної оцінки взаємозв'язків застосовано аналіз головних компонент (PCA) на основі стандартизованих даних. Кореляційні зв'язки оцінювали за коефіцієнтом Пірсона ( $r$ ) на основі  $\bar{x}$  для кожної комбінації «рік × варіант» ( $n = 24$ ) із визначенням статистичної значущості за  $P < 0,05$ . Статистичну обробку та візуалізацію виконано в RStudio® (R Core Team, version 4.4.3).

**Результати дослідження та обговорення.** Аналіз результатів підтвердив істотну залежність урожайності, що наведена у [18], та біохімічного складу насіння від гідротермічних умов року і системи біологічної інокуляції (рис. 2). Найбільш контрастні відмінності між варіантами спостерігалися у 2024 р., який характеризувався гідротермічним дефіцитом (рис. 1).

На контролі (схема 1) врожайність становила 2,24 т/га у 2022 р., 2,46 т/га у 2023 р. та 1,86 т/га у 2024 р. (зменшення на 24,4 % порівняно з 2023 р.). Монопрепарати (схеми 2–4) забезпечували приріст 0,26–0,56 т/га залежно від року, причому найбільший абсолютний приріст спостерігався у 2023 р. Комбіновані обробки формували виражений комбінований ефект, а схема 8 (Мікофренд + Profix + Віолар) демонструвала найвищі показники в усі роки – 3,15; 3,57 та 2,96 т/га відповідно, що перевищувало контроль на 40,6–59,1 %. Відносна перевага комбінованого варіанта була максимальною саме у стресовому 2024 р.

Середнє за три роки значення врожайності варіювало від 2,19 т/га (контроль) до 3,23 т/га (схема 8), тобто приріст становив 1,04 т/га (47,5 %). Ранжування варіантів за рівнем урожайності залишалось стабільним у всі роки досліджень.

Вміст білка зростав за застосування біопрепаратів. За схеми 1 показник становив 35,63–38,14 %, тимчасом за схем 5–7 – 41,66–42,56 % (залежно від комбінації та року). Максимальні значення зафіксовано за схеми 8 (43,17 % у 2022 р., 43,85 % у 2023 р. та 40,66 % у 2024 р.), що перевищувало схему 1 на 5,0–5,7 в.п. Навіть у посушливому 2024 р. відносна перевага комбінованих обробок зберігалася.

Вміст олії характеризувався іншим типом реакції. За схеми 2 (Profix) дещо знижувалась олійність (17,0–17,5 %), що відображає перерозподіл асимілятів на користь білкового синтезу. Схема 3 (Віолар) сприяла підвищенню олійності до 18,0–18,6 %. Найвищі значення знову отримано за схеми 8 (18,8–19,3 %), що на 1,0–1,2 в.п. перевищувало схему 1. У 2024 р. загальна частка жиру мала тенденцію до зростання, що узгоджується з типовою реакцією сої на водний дефіцит; водночас у комбінованих варіантах зберігався високий вміст білка без вираженого антагонізму між показниками.

Отже, відносна перевага комбінованих обробок за всіма показниками була найбільш вираженою саме у стресовому 2024 р., що свідчить про посилення синергетичного ефекту консорціуму за умов гідротермічного дефіциту.

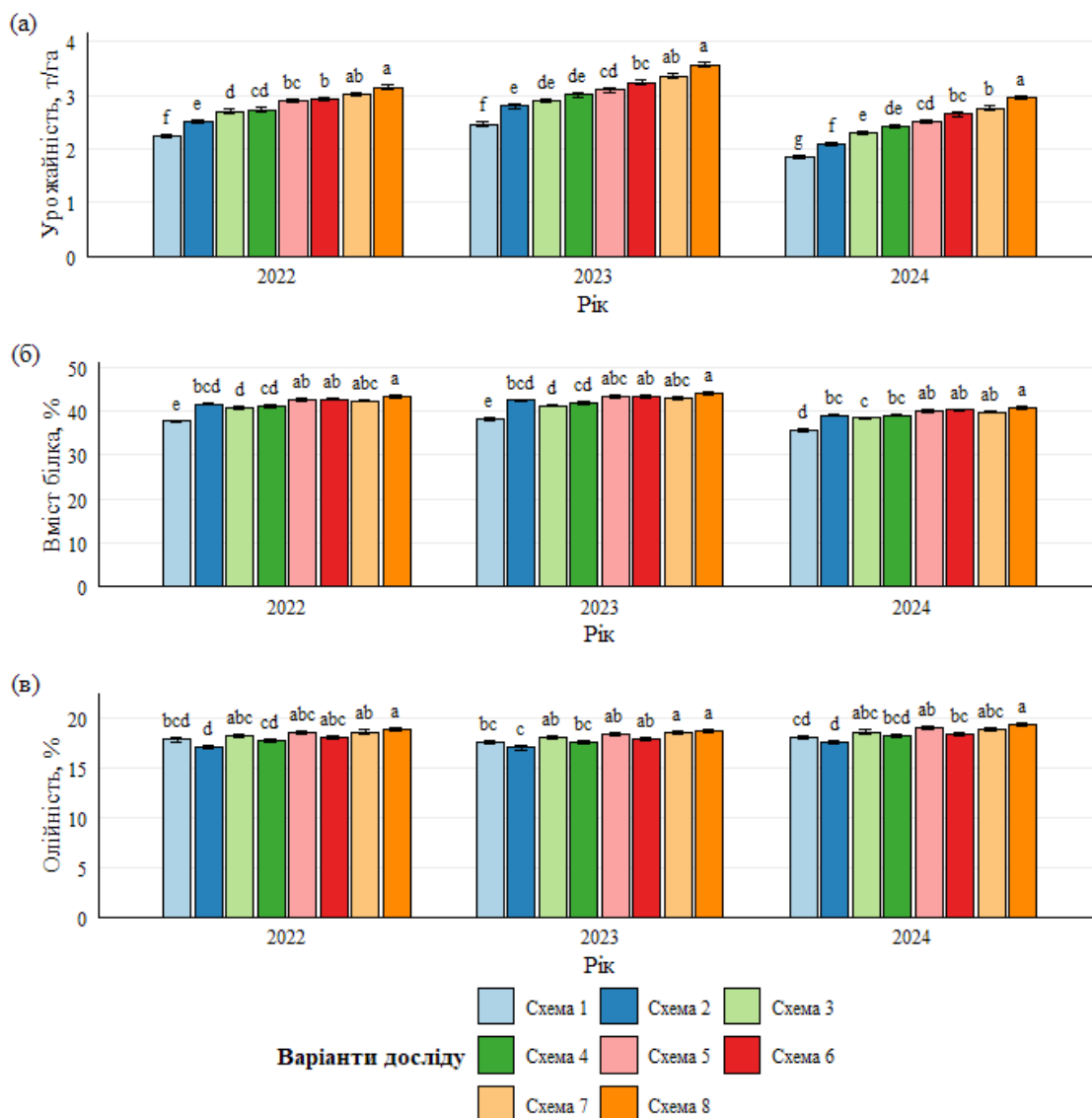


Рис. 2. Вплив мікробної та гормональної обробки насіння на (а) врожайність, (б) вміст білка в насінні та (с) вміст олії в насінні сої в умовах органічного землеробства, 2022–2024 рр.

Джерело: розраховано та побудовано авторами.

**Примітка:** Значення представлені як  $\bar{x} \pm SE$  ( $n = 10$ ). Різні літери вказують на значну різницю між обробками згідно з тестом HSD Тьюкі ( $P < 0,05$ ). Схема 1 – контроль; схема 2 – Profix; схема 3 – Віолар; схема 4 – Мікофренд; схема 5 – Profix + Віолар; схема 6 – Мікофренд + Profix; схема 7 – Мікофренд + Віолар; схема 8 – Мікофренд + Profix + Віолар.

Варіативність урожайності переважно асоціювалася зі змінами кількості насінин з рослини, тимчасом маса 1000 насінин змінювалася в меншому діапазоні (рис. 3).

За схеми 1 кількість насінин становила 62, 69 та 55 шт. у 2022–2024 рр. відповідно. Біологічні обробки суттєво підвищували цей показник, особливо на комбінованих схемах 5–7 (92–117 шт.). Найвищі значення зафіксовано за схеми 8 – 117, 130 та 103 шт., що перевищувало контроль на 48–61 насінину

залежно від року. У 2024 р. саме зменшення кількості насінин з рослини було основним чинником зниження врожайності в усіх варіантах дослідів.

Маса 1000 насінин змінювалася у межах 168–171 г за схеми 1 та зростала до 172–179 г за схем 5–7. Максимальні значення відзначено за схеми 8 (179, 181 та 176 г), що на 8–10 г перевищувало контроль. Міжрічна мінливість цього показника була менш вираженою порівняно з варіацією кількості насінин.

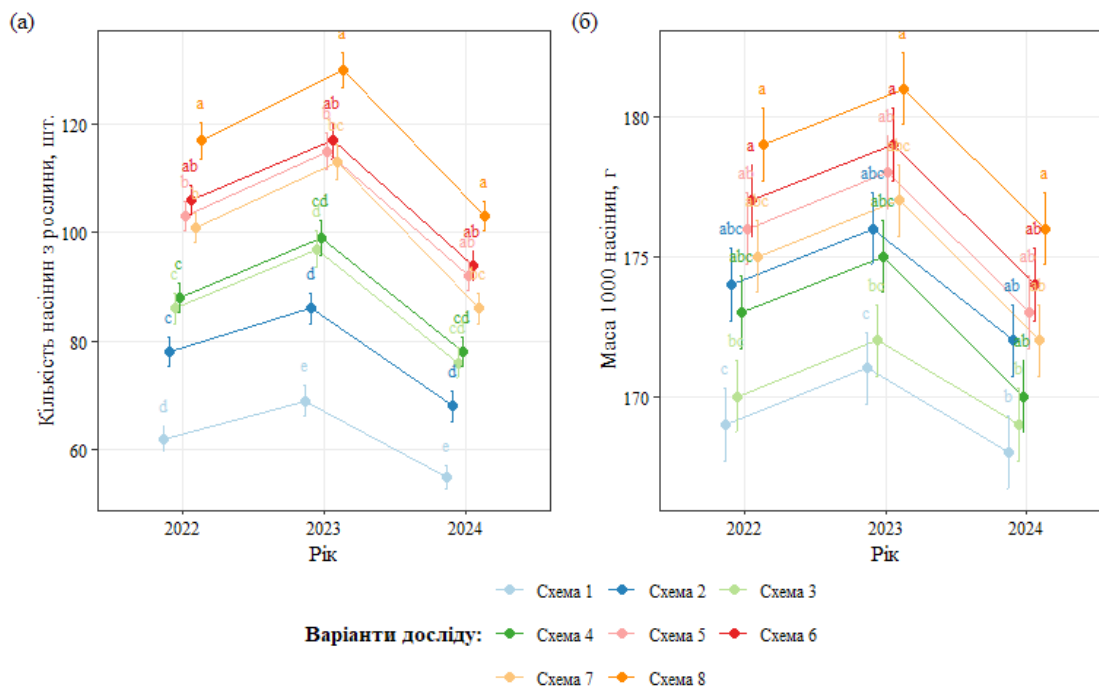


Рис. 3. Вплив мікробної та гормональної обробки насіння на (а) кількість насінин на рослину та (б) масу 1000 насінин сої в умовах органічного землеробства, 2022–2024 рр.

Джерело: розраховано та побудовано авторами.

**Примітка:** Значення представлені як  $\bar{x} \pm SE$  ( $n = 10$ ). Різні літери вказують на значну різницю між обробками згідно з тестом HSD Тьюкі ( $P < 0,05$ ). Схема 1 – контроль; схема 2 – Profix; схема 3 – Віолар; схема 4 – Мікофренд; схема 5 – Profix + Віолар; схема 6 – Мікофренд + Profix; схема 7 – Мікофренд + Віолар; схема 8 – Мікофренд + Profix + Віолар.

Отже, приріст урожайності визначався насамперед підвищенням репродуктивного компонента врожайності (кількість насінин з рослини), тимчасом маса 1000 насінин виконувала стабілізуючу функцію.

Вміст загального азоту залежав як від року, так і від схеми застосування біопрепаратів (рис. 4). Максимальні значення зафіксовано у 2023 р., мінімальні – у 2024 р.

За схеми 1 показник загального вмісту азоту становив 6,60; 6,68 та 6,24 % у 2022–2024 рр. відповідно. Біологічні препарати підвищували його до 6,84–7,52 %, причому найбільші значення отримано за схеми 8 (7,56; 7,68 та 7,12 %). Перевага над контролем становила 0,88–1,00 в.п.

У 2024 р. зниження вмісту азоту за схеми 1 було більш вираженим, тимчасом у комбінованих схемах 5–8 його рівень залишався відносно стабільним, що свідчить про часткове пом'якшення впливу водного дефіциту. Динаміка змін загального азоту узгоджувалася зі змінами вмісту білка, що вказує на синхронну реакцію азотного метаболізму на дію біопрепаратів.

Інтегральний аналіз взаємозв'язків між фізіологічними параметрами, що наведені у [18], та врожайністю за допомогою аналізу головних компонент (РСА) виявив чітку диференціацію варіантів залежно від гідротермічних умов року (рис. 5). Перша головна компонента (Dim1, 84,7 %) відображала градієнт «водний баланс – оксидативний стрес»: вектори ВВВ, ПП і врожайності були спрямовані в одному квадранті, тимчасом АБК та МДА – у протилежному.

У 2024 р., який характеризувався гідротермічним дефіцитом, на контролі спостерігалось підвищення вмісту АБК до 8,5 нмоль/г і МДА до 17,93 мкг/г, зниження ВВВ до 69,7 % і ПП до 0,19 моль/м<sup>2</sup>·с, що супроводжувалося зменшенням урожайності до 1,86 т/га. За схеми 8 ці показники залишалися суттєво кращими: АБК – 5,6 нмоль/г, МДА – 9,37 мкг/г (зменшення на 47,7 % порівняно з контролем), ВВВ – 91,9 % (зростання на 22,2 в.п.), ПП – 0,39 моль/м<sup>2</sup>·с. У сприятливі 2022–2023 рр. міжваріантні відмінності були менш контрастними, однак ранжування варіантів залишалося стабільним.

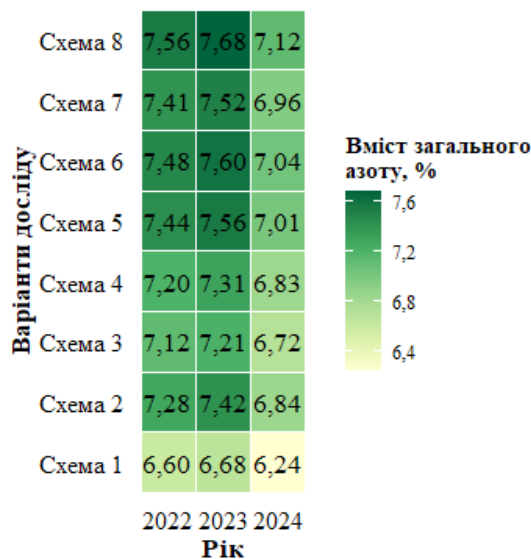


Рис. 4. Теплова карта впливу мікробної та гормональної обробки насіння на загальний вміст азоту в насінні сої в умовах органічного землеробства, 2022–2024 рр.

**Джерело:** розраховано та побудовано авторами.

**Примітка:** Значення представлені як  $\bar{x}$  ( $n = 10$ ). Схема 1 – контроль; Схема 2 – Profix; Схема 3 – Віолар; Схема 4 – Мікофренд; Схема 5 – Profix + Віолар; Схема 6 – Мікофренд + Profix; Схема 7 – Мікофренд + Віолар; Схема 8 – Мікофренд + Profix + Віолар.

Кореляційний аналіз кількісно підтвердив ці взаємозв'язки (рис. 5): встановлено сильний позитивний зв'язок між ВВВ та врожайністю ( $r = 0,92$ ;  $P < 0,001$ ), негативний між МДА та врожайністю ( $r = -0,67$ ;  $P < 0,001$ ) і дуже тісну негативну кореляцію між АБК і ПП ( $r = -0,98$ ;  $P < 0,001$ ), що свідчить про ключову роль АБК-залежних механізмів у регуляції транспірації за гідротермічного стресу.

Отже, стабілізація водного статусу й обмеження оксидативного ушкодження є визначальними механізмами підтримання продуктивності сої в умовах дефіциту вологи.

Отримані результати узгоджуються з даними про синергетичний ефект мікробних консорціумів на продуктивність сої. Дослідження [13] показало, що трикомпонентна інокуляція підвищувала врожайність на 20,5% і вміст білка й олії на 8,78 і 10,52% відповідно, причому ефект зростав із ускладненням складу консорціуму. Моноінокуляція ризобіями супроводжувалася нижчою олійністю, що відображає класичну антагоністичну динаміку між накопиченням білка й олії за інтенсифікації азотного живлення [9, 10]. Водночас спільна інокуляція ризобій з АМГ здатна частково нівелювати цей антагонізм через синергію азотного, фосфорного та водного живлення [11].

Встановлена закономірність відповідає сучасним уявленням про те, що за водного

дефіциту найбільш уразливими є процеси цвітіння, запилення та формування бобів [24, 26]. Встановлено [6], що подвійна інокуляція АМГ і *V. japonicum* за посухи підвищувала кількість бобів на 28–34% і насінин на 30–36%, що супроводжувалося приростом урожайності на 25–32%. Також підтверджено [11], що приріст продуктивності за спільної інокуляції реалізувався переважно через збільшення маси насіння з рослини, а не через суттєве зростання індивідуальної маси насінини. Отже, біопрепарати підтримують репродуктивний потенціал рослин насамперед через оптимізацію численних компонентів структури врожаю.

Підвищення вмісту загального азоту в насінні безпосередньо пояснює зростання білковості, оскільки білок сої є функцією накопичення та реутилізації азоту у репродуктивний період [9]. У дослідженні [13] показано, що трикомпонентна інокуляція підвищувала азотне живлення рослин на 7,33%, що корелювало зі зростанням врожайності. Автори [27] підтвердили, що інокуляція *Bradyrhizobium* збільшувала поглинання N і підвищувала врожайність до 125% порівняно з контролем. Відносна стабільність вмісту азоту в комбінованих схемах 5–8 у посушливому 2024 р. свідчить про часткове пом'якшення негативного впливу водного дефіциту на симбіотичну азотфіксацію завдяки синергетичній дії АМГ і ризобій.

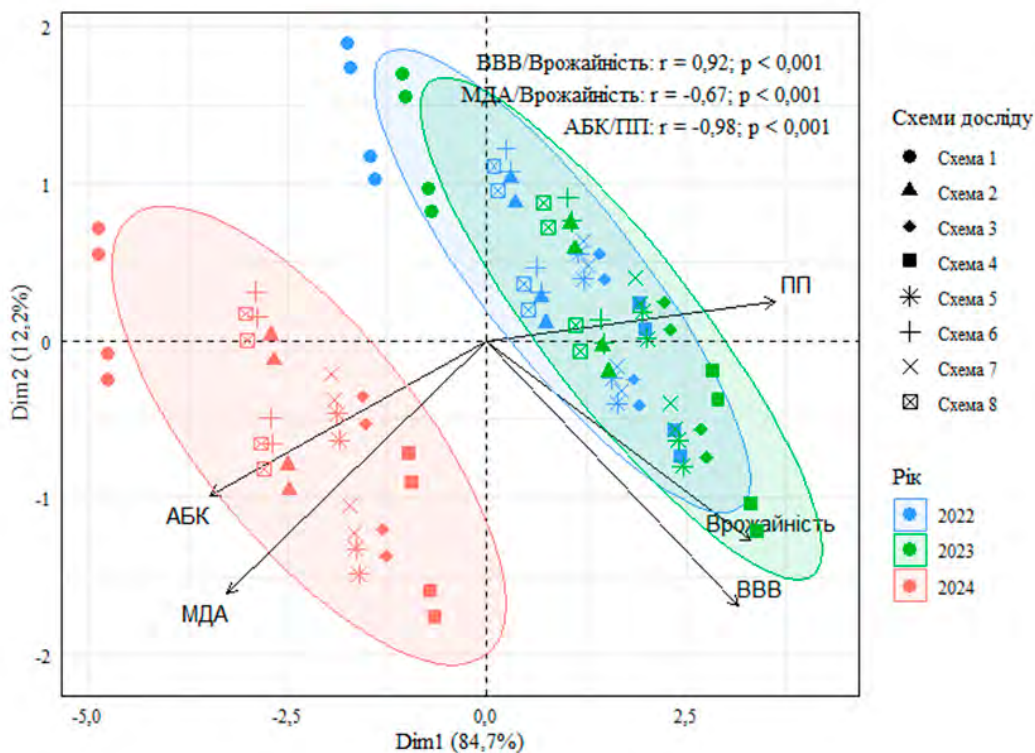


Рис. 5. Аналіз головних компонентів фізіологічних ознак (АБК, МДА, ВВВ, ПП) та врожайності сої, 2022–2024 рр.

**Джерело:** розраховано та побудовано авторами.

**Примітка:** Dim1 та Dim2 пояснюють 84,7 % та 12,2 % загальної дисперсії відповідно. Вектори позначають навантаження змінних. Наведено коефіцієнти кореляції Пірсона ( $r$ ) та пов'язані з ними значення  $P$ . Схема 1 – контроль; схема 2 – Profix; схема 3 – Віолар; схема 4 – Мікофренд; схема 5 – Profix + Віолар; схема 6 – Мікофренд + Profix; схема 7 – Мікофренд + Віолар; схема 8 – Мікофренд + Profix + Віолар.

Виявлені закономірності узгоджуються з літературними даними щодо ролі біостимуляторів у підтриманні водного статусу й обмеженні оксидативного пошкодження за посухи. Автори [12, 28] показали, що інокуляція АМГ або її спільна інокуляція з *Bradyrhizobium* сприяла зростанню ВВВ на 8–12 % та зменшенню МДА на 20–37%. У [7, 8] встановлено, що АМГ підвищують активність каталази і супероксиддисмутази, знижуючи вміст МДА на 30–50 %. Тісна негативна кореляція між АБК і продиговою провідністю ( $r = -0,98$ ;  $P < 0,001$ ) підтверджує ключову роль АБК-залежних сигнальних каскадів у регуляції транспірації за гідротермічного стресу [14, 15]. Модуляція гормональних сигналів забезпечувала оптимальний компроміс між обмеженням транспірації та збереженням фотосинтетичної активності, що проявлялося у стабілізації ВВВ і зниженні інтенсивності перекисного окиснення ліпідів [17].

Отже, стабілізація водного статусу та обмеження оксидативного ушкодження є визначальними механізмами підтримання продуктивності сої в умовах дефіциту вологи.

**Висновки.** Трирічні польові дослідження засвідчили, що комплексне застосування біопрепаратів Мікофренд + Profix + Віолар в умовах органічного землеробства забезпечувало найвищу врожайність сої сорту Хорол у всі роки досліджень – 3,15–3,57 т/га, що перевищувало контроль на 40,6–59,1 %. Приріст врожайності визначався переважно збільшенням кількості насінин з рослини до 103–130 шт. проти 55–69 шт. на контролі, тимчасом маса 1000 насінин зростала в меншому діапазоні (176–181 г проти 168–171 г).

Комплексна інокуляція підвищувала вміст білка в насінні до 40,66–43,85 % (на 5,0–5,7 в.п. до контролю) та олії до 18,8–19,3 % (на 1,0–1,2 в.п.), а також загального азоту на 0,88–1,00 в.п. На відміну від моноінокуляції

ризобіями, яка супроводжувалася зниженням олійності, комбіновані варіанти частково нівелювали антагоністичну динаміку між білковою та ліпідною фракціями.

За умов гідротермічного дефіциту 2024 р. трикомпонентна схема підтримувала ВВВ на рівні 91,9 % (на 22,2 в.п. до контролю), знижувала накопичення МДА на 47,7 % і рівень АБК до 5,6 нмоль/г, зберігаючи вищу ПП (0,39 моль/м<sup>2</sup>·с). Встановлено тісні кореляції між ВВВ і врожайністю ( $r = 0,92$ ) та між АБК і ПП ( $r = -0,98$ ), що підтверджує визначальну роль водного статусу і АБК-залежної регуляції транспірації у формуванні продуктивності за стресових умов.

Комплексне застосування Мікофренд + Профікс + Віолар рекомендується як ефективна біологічна стратегія підтримання врожайності й якості насіння сої в органічних системах виробництва за умов гідротермічної нестабільності.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Erofeeva E.A. Hormetic effects of abiotic environmental stressors in woody plants in the context of climate change. *Journal of Forestry Research*. 2023. Vol. 34. P. 7–19.
2. United States Department of Agriculture. World agricultural production. Foreign Agricultural Service. 2024. URL: <https://apps.fas.usda.gov/psonline/circulars/production.pdf>
3. Jarecki W., Migut D. Comparison of yield and important seed quality traits of selected legume species. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. 2667. DOI: 10.3390/agronomy12112667
4. Prusiński J. Cultivation, origin and use of grain legume cultivars in Poland. *Polish Journal of Agronomy*. 2020. Vol. 41. P. 20–28.
5. Plant growth-promoting rhizobacteria eliminate the effect of drought stress in plants: a review / H.M. Ahmad et al. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. 875774. DOI: 10.3389/fpls.2022.875774
6. Research progress in soybean by phytohormone modulation and metal chelation over the past decade / S. Shaffique et al. *Agriculture*. 2023. Vol. 13. No 7. 1325. DOI: 10.3390/agriculture13071325
7. Mirshad P.P., Puthur J.T. Arbuscular mycorrhizal association enhances drought tolerance potential of promising bioenergy grass (*Saccharum arundinaceum* Retz.). *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016. Vol. 188. No 7. 425 p. DOI: 10.1007/s10661-016-5428-7
8. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate drought stress in C3 *Leymus chinensis* and C4 *Hemarthria altissima* grasses via altering antioxidant enzyme activities and photosynthesis / J. Li et al. *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 10. 499 p. DOI: 10.3389/fpls.2019.00499
9. Soybean yield, biological N<sub>2</sub> fixation and seed composition responses to additional inoculation in

the United States / W.D. Carciocchi et al. *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. No 1. 19908. DOI: 10.1038/s41598-019-56465-0

10. Jarecki W. Effect of soybean seed inoculation with symbiotic bacteria. *Legume Research – An International Journal*. 2024. Vol. 47. No 1. P. 89–94. DOI: 10.18805/LRF-757

11. Iggehon N.O., Babalola O.O., Cheseto X., Torto B. Effects of rhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi on yield, size distribution and fatty acid of soybean seeds grown under drought stress. *Microbiological Research*. 2021. Vol. 242. 126640. DOI: 10.1016/j.micres.2020.126640

12. Physiological and biochemical responses of soybean plants inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi and *Bradyrhizobium* under drought stress / M.S. Sheteiwy et al. *BMC Plant Biology*. 2021. Vol. 21. 195 p. DOI: 10.1186/s12870-021-02949-z

13. Tripartite microbial augmentation of *Bradyrhizobium diazoefficiens*, *Bacillus* sp. MN54 and *Piriformospora indica* on growth, yield, and nutrient profiling of soybean (*Glycine max* L.) / M. Rafique et al. *Frontiers in Microbiology*. 2025. Vol. 15. 1437489. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1437489

14. Mechanisms of abscisic acid-mediated control of stomatal aperture / S. Munemasa et al. *Current Opinion in Plant Biology*. 2015. Vol. 28. P. 154–162. DOI: 10.1016/j.pbi.2015.10.010

15. The regulatory role of phytohormones in plant drought tolerance / Z. Liao et al. *Planta*. 2025. Vol. 261. No 5. 98 p. DOI: 10.1007/s00425-025-04671-8

16. Verma V., Ravindran P., Kumar P.P. Plant hormone-mediated regulation of stress responses. *BMC Plant Biology*. 2016. Vol. 16. 86 p. DOI: 10.1186/s12870-016-0771-y

17. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: revisiting the crucial role of a universal defense regulator / M. Hasanuzzaman et al. *Antioxidants*. 2020. Vol. 9. No 8. 681 p. DOI: 10.3390/antiox9080681

18. Чайка Т.О., Короткова І.В. Фізико-хімічні аспекти впливу біопрепаратів на вміст асцизової кислоти в умовах гідротермічного стресу у сої (*Glycine max* L. Merr.): інтеграція біохімічних та агрономічних маркерів адаптації. *Агробіологія*. 2025. № 2. С. 233–245. DOI: 10.33245/2310-9270-2025-199-2-233-245

19. Чайка Т.О., Короткова І.В. Вплив передпосівної обробки насіння сої біопрепаратами на вміст фотосинтетичних пігментів і врожайність за умов нестійкого зволоження й органічного землеробства. *Агробіологія*. 2025. № 1. С. 188–198. DOI: 10.33245/2310-9270-2025-195-1-188-198

20. Koval I.M., Bräuning A. The effect of climate change on the radial growth of *Pinus sylvestris* L. and *Quercus robur* L. in the stands of Kharkiv green zone. *Man and Environment. Issues of Neoeology*. 2024. No 41. P. 130–142. DOI: 10.26565/1992-4224-2024-41-10

21. Chaika T., Lotysh I. The effect of biopreparations on the adaptive properties of soybean in organic

farming under hydrothermal stress. Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science. 2025. Vol. 29. No 2. P. 34–49. DOI: 10.56407/bs.agrarian/2.2025.34

22. Patanè C., Cosentino S.L., Romano D., Toscano S. Relative water content, proline and antioxidant enzymes in leaves of long shelf-life tomatoes under drought stress and rewatering. *Plants*. 2022. Vol. 11. 3045. DOI: 10.3390/plants11223045

23. Interference-free determination of abscisic acid and gibberellin in plant samples using excitation-emission matrix fluorescence based on oxidation derivatization coupled with second-order calibration methods / Y.-N. Li et al. *Analytical Methods*. 2009. Vol. 1. P. 115–122. DOI: 10.1039/B9AY00048H

24. Assessing morpho-physiological and biochemical markers of soybean for drought tolerance potential / M.K. Fatema et al. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No 2. 1427 p. DOI: 10.3390/su15021427

25. Food energy – methods of analysis and conversion factors. FAO Food and Nutrition Paper 77. Rome: FAO, 2003. 97 p.

26. Resilience of soybean cultivars to drought stress during flowering and early-seed setting stages / S. Poudel et al. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. No 1. 1277. DOI: 10.1038/s41598-023-28354-0

27. Soybean seed chemical composition as influenced by Bradyrhizobium inoculation in soils with elevated nickel concentrations / O. Stajković-Srbinić et al. *Applied Soil Ecology*. 2020. Vol. 153. 103576. DOI: 10.1016/j.apsoil.2020.103576

28. Arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* alleviates drought stress in soybean with overexpressing the *GmSPL9d* gene by promoting photosynthetic apparatus and regulating the antioxidant system / N. Begum et al. *Microbiological Research*. 2023. Vol. 273. 127398. DOI: 10.1016/j.micres.2023.127398

## REFERENCES

1. Erofeeva, E.A. (2023). Hormetic effects of abiotic environmental stressors in woody plants in the context of climate change. *Journal of Forestry Research*. no. 34, pp. 7–19.

2. United States Department of Agriculture. World agricultural production. Foreign Agricultural Service. 2024. Available at: <https://apps.fas.usda.gov/psonline/circulars/production.pdf>

3. Jarecki, W., Migut, D. (2022). Comparison of yield and important seed quality traits of selected legume species. *Agronomy*. no. 12, 2667. DOI: 10.3390/agronomy12112667

4. Prusiński, J. (2020). Cultivation, origin and use of grain legume cultivars in Poland. *Polish Journal of Agronomy*. no. 41, pp. 20–28.

5. Ahmad, H.M., Fiaz, S., Hafeez, S., Zahra, S., Shah, A.N., Gul, B., Aziz, O., Mahmood-Ur-Rahman, Fakhra, A., Rafique, M., Chen, Y., Yang, S.H., Wang, X. (2022). Plant growth-promoting rhizobacteria eliminate the effect of drought stress in plants: a review. *Frontiers in Plant Science*. no. 13, 875774. DOI: 10.3389/fpls.2022.875774

6. Shaffique, S., Kang, S.M., Hoque, M.I.U., Imran, M., Khan, M.A., Lee, I.J. (2023). Research progress in soybean by phytohormone modulation and metal chelation over the past decade. *Agriculture*. no. 13(7), 1325. DOI: 10.3390/agriculture13071325

7. Mirshad, P.P., Puthur, J.T. (2016). Arbuscular mycorrhizal association enhances drought tolerance potential of promising bioenergy grass (*Saccharum arundinaceum* Retz.). *Environmental Monitoring and Assessment*. no. 188(7), 425 p. DOI: 10.1007/s10661-016-5428-7

8. Li, J., Meng, B., Chai, H., Yang, X., Song, W., Li, S., Lu, A., Zhang, T., Sun, W. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate drought stress in C3 *Leymus chinensis* and C4 *Hemarthria altissima* grasses via altering antioxidant enzyme activities and photosynthesis. *Frontiers in Plant Science*. no. 10, 499 p. DOI: 10.3389/fpls.2019.00499

9. Carciocchi, W.D., Moro Rosso, L.H., Secchi, M.A., Torres, A.R., Naeve, S., Casteel, S.N., Kovács, P., Davidson, D., Purcell, L.C., Archontoulis, S., Ciampitti, I. (2019). Soybean yield, biological N<sub>2</sub> fixation and seed composition responses to additional inoculation in the United States. *Scientific Reports*. no. 9(1), 19908. DOI: 10.1038/s41598-019-56465-0

10. Jarecki, W. (2024). Effect of soybean seed inoculation with symbiotic bacteria. *Legume Research – An International Journal*. no. 47(1), pp. 89–94. DOI: 10.18805/LRF-757

11. Igiehon, N.O., Babalola, O.O., Cheseto, X., Torto, B. (2021). Effects of rhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi on yield, size distribution and fatty acid of soybean seeds grown under drought stress. *Microbiological Research*. no. 242, 126640. DOI: 10.1016/j.micres.2020.126640

12. Sheteiwy, M.S., Kang, S.M., Hoque, M.I.U., Imran, M., Khan, M.A., Lee, I.J. (2021). Physiological and biochemical responses of soybean plants inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi and *Bradyrhizobium* under drought stress. *BMC Plant Biology*. no. 21, 195 p. DOI: 10.1186/s12870-021-02949-z

13. Rafique, M., Naveed, M., Mumtaz, M. Z., Niaz, A., Alamri, S., Rehman, S.U., Siddiqui, M.H., Mustafa, A. (2025). Tripartite microbial augmentation of *Bradyrhizobium diazoefficiens*, *Bacillus* sp. MN54 and *Piriformospora indica* on growth, yield, and nutrient profiling of soybean (*Glycine max* L.). *Frontiers in Microbiology*. no. 15, 1437489. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1437489

14. Munemasa, S., Hauser, F., Park, J., Waadt, R., Brandt, B., Schroeder, J.I. (2015). Mechanisms of abscisic acid-mediated control of stomatal aperture. *Current Opinion in Plant Biology*. no. 28, pp. 154–162. DOI: 10.1016/j.pbi.2015.10.010

15. Liao, Z., Chen, B., Boubakri, H., Farooq, M., Mur, L.A.J., Urano, D., Teo, C.H., Tan, B.C., Hassan, M.M., Aslam, M.M., Tahir, M.Y., Fan, J. (2025). The regulatory role of phytohormones in plant drought tolerance. *Planta*. no. 261(5), 98 p. DOI: 10.1007/s00425-025-04671-8

16. Verma, V., Ravindran, P., Kumar, P.P. (2016). Plant hormone-mediated regulation of stress

responses. BMC Plant Biology. no. 16, 86 p. DOI: 10.1186/s12870-016-0771-y

17. Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M.H.M.B., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S.M., Mahmud, J.A., Fujita, M., Fotopoulos, V. (2020). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: revisiting the crucial role of a universal defense regulator. Antioxidants. no. 9(8), 681 p. DOI: 10.3390/antiox9080681

18. Chaika, T.O., Korotkova, I.V. (2025). Fizyko-khimichni aspekty vplyvu biopreparativ na vmist absycyzovoi kysloty v umovakh hidrotermichnoho stresu u soi (*Glycine max* L. Merr.): intehratsiia biokhimichnykh ta ahronomichnykh markeriv adaptatsii [Physico-chemical aspects of biological products influence on the abscisic acid content under conditions of hydrothermal stress in soybean (*Glycine max* L. Merr.): integration of biochemical and agronomic markers of adaptation]. Ahrobiolohiia [Agrobiology]. no. 2, pp. 233–245. DOI: 10.33245/2310-9270-2025-199-2-233-245

19. Chaika, T.O., Korotkova, I.V. (2025). Vplyv peredposivnoi obrobky nasinnia soi biopreparatamy na vmist fotosyntetychnykh pihmentiv i vrozhainist za umov nestiikoho zvolozhennia y orhanichnoho zemlerobstva [Effect of pre-sowing treatment of soybean seeds with biopreparations on the content of photosynthetic pigments and yield under unstable moisture conditions and organic farming]. Ahrobiolohiia [Agrobiology]. no. 1, pp. 188–198. DOI: 10.33245/2310-9270-2025-195-1-188-198

20. Koval, I.M., Bräuning, A. (2024). The effect of climate change on the radial growth of *Pinus sylvestris* L. and *Quercus robur* L. in the stands of Kharkiv green zone. Man and Environment. Issues of Neocology. no. 41, pp. 130–142. DOI: 10.26565/1992-4224-2024-41-10

21. Chaika, T., Lotysh, I. (2025). The effect of biopreparations on the adaptive properties of soybean in organic farming under hydrothermal stress. Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science. no. 29(2), pp. 34–49. DOI: 10.56407/bs.agrarian/2.2025.34

22. Patanè, C., Cosentino, S.L., Romano, D., Toscano, S. (2022). Relative water content, proline and antioxidant enzymes in leaves of long shelf-life tomatoes under drought stress and rewatering. Plants. no. 11, 3045. DOI: 10.3390/plants11223045

23. Li, Y.-N., Wu, H.-L., Nie, J.-F., Li, S.-F., Yu, Y.-J., Zhang, S.-R., Yu, R.-Q. (2009). Interference-free determination of abscisic acid and gibberellin in plant samples using excitation-emission matrix fluorescence based on oxidation derivatization coupled with second-order calibration methods. Analytical Methods. no. 1, pp. 115–122. DOI: 10.1039/B9AY00048H

24. Fatema, M.K. Mamun, M.A.A., Sarker, U., Hossain, M.S., Mia, M.A.B., Roychowdhury, R., Ercisli, S., Marc, R.A., Babalola, O.O., Karim, M.A. (2023). Assessing morpho-physiological and biochemical markers of soybean for drought tolerance potential. Sustainability. no. 15(2), 1427. DOI: 10.3390/su15021427

25. FAO. Food energy – methods of analysis and conversion factors. FAO Food and Nutrition Paper 77. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2003.

26. Poudel, S., Vennam, R.R., Shrestha, A., Reddy, K.R., Wijewardane, N.K., Reddy, K.N., Bheem-anahalli, R. (2023). Resilience of soybean cultivars to drought stress during flowering and early-seed setting stages. Scientific Reports. no. 13(1), 1277. DOI: 10.1038/s41598-023-28354-0

27. Stajković-Srbinović, O., De Meyer, S.E., Kuzmanović, D., Dinić, Z., Delić, D., Willems, A. (2020). Soybean seed chemical composition as influenced by *Bradyrhizobium* inoculation in soils with elevated nickel concentrations. Applied Soil Ecology. no. 153, 103576. DOI: 10.1016/j.apsoil.2020.103576

28. Begum, N., Xiao, Y., Wang, L., Li, D., Irshad, A., Zhao, T. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* alleviates drought stress in soybean with overexpressing the *GmSPL9d* gene by promoting photosynthetic apparatus and regulating the antioxidant system. Microbiological Research. no. 273, 127398. DOI: 10.1016/j.micres.2023.127398

### Effects of biopreparations on soybean yield and seed quality under hydrothermal stress in organic farming systems

Chaika T., Korotkova I., Liashenko V., Lotysh I.

Under organic farming conditions and increasing hydrothermal variability, the development of biological approaches to enhance soybean productivity and ensure high seed quality is of growing importance. The aim of this study was to evaluate the effectiveness of the combined application of biopreparations with different functional roles – arbuscular mycorrhizal fungi, nitrogen-fixing bacteria, and phytohormonal regulators – in shaping soybean yield and seed biochemical composition under variable weather conditions.

Field experiments were conducted in 2022–2024 in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine using the early-maturing soybean cultivar *Khorol* under an organic farming system. The experimental design included eight treatment variants: control, Profix, Violar, Mycofriend, and their various combinations.

Seed protein and oil contents were determined by near-infrared spectroscopy (NIRS). Physiological and biochemical parameters – relative water content (RWC) in leaves, stomatal conductance (gs), abscisic acid (ABA), and malondialdehyde (MDA) – were assessed at the flowering stage (BBCH 61). Statistical analysis included analysis of variance (ANOVA), Tukey's honestly significant difference (HSD) test, Pearson correlation analysis, and principal component analysis (PCA).

The combined application of all three biopreparations was the most effective, resulting in yields of 2.96–3.57 t/ha, which exceeded the control by 40.6–59.1 %. The increase in yield was primarily associated with a higher number of seeds per plant

(up to 130), whereas the thousand-seed weight showed only minor variation.

An increase in seed protein content (by up to 5.7 percentage points) and oil content (up to 19.3 %) was also observed. Under the drier conditions of 2024, combined treatments contributed to maintaining higher plant water status (up to 91.9 %), reducing MDA content (by 47.7 % compared to the control), and decreasing ABA accumulation (by 34.1 %).

A strong positive correlation was found between RWC and yield ( $r = 0.92$ ), whereas a strong negative

correlation was observed between ABA content and stomatal conductance ( $r = -0.98$ ).

The results demonstrate that the integrated use of biopreparations in organic soybean cultivation enhances productivity stability and improves seed nutritional quality under contrasting hydrothermal conditions.

**Key words:** *Glycine max* (L.), arbuscular mycorrhizal fungi, nitrogen-fixing bacteria, phytohormonal regulators, protein content, seed oil content, relative water content, stomatal conductance, abscisic acid, malondialdehyde.



Copyright: Чайка Т.О. та ін. © This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.



ORCID iD:

Чайка Т.О.

Короткова І.В.

Ляшенко В.В.

Лотиш І.І.

<https://orcid.org/0000-0002-5980-7517>

<https://orcid.org/0000-0003-0577-9634>

<https://orcid.org/0000-0003-0177-6209>

<https://orcid.org/0000-0003-0373-6630>