

АГРОНОМІЯ

УДК 631.95:581.1:577.4

Фізико-хімічні аспекти впливу біопрепаратів на вміст абсцизової кислоти в умовах гідротермічного стресу у сої (*Glycine max* L. Merr.): інтеграція біохімічних та агрономічних маркерів адаптаціїЧайка Т.О.¹ , Короткова І.В.² ¹ Полтавське відділення Академії наук технологічної кібернетики України² Полтавський державний аграрний університет Чайка Т.О. E-mail: chaika_ta@ukr.net

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

Chayka T., Korotkova I. 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. «Agrobiology», 2025. no. 2, pp. 233–245.

Рукопис отримано: 01.07.2025 р.

Прийнято: 16.07.2025 р.

Затверджено до друку: 27.11.2025 р.

doi: 10.33245/2310-9270-2025-199-2-233-245

Гідротермічний стрес залишається одним із ключових чинників, що обмежують продуктивність сої, особливо в умовах органічного землеробства. Представлене дослідження спрямоване на вивчення впливу біопрепаратів на вміст абсцизової кислоти, а також фізіолого-біохімічні та агрономічні показники адаптаційної здатності сої сорту Хорол за вирощування в умовах гідротермічного стресу. Польові експерименти проведено у Полтавській області у 2022–2024 роках. Передпосівну обробку насіння та обприскування посівів здійснювали біопрепаратами на основі мікоризних грибів, ризосферних і азотфіксуєчих бактерій та фітогормонів. Вивчено динаміку абсцизової кислоти, відносного вмісту води в листках, продигової провідності, концентрації проліну та малонового діальдегіду за використання біопрепаратів та їх сумішей і показаний їх зв'язок з урожайністю. Встановлено, що застосування біопрепаратів сприяло зниженню вмісту абсцизової кислоти на 8–34 %, що свідчить про послаблення стресового навантаження на рослини; підвищенню відносного вмісту води на 10–28 %, що забезпечує оптимальний водний статус клітин; покращенню продигової провідності на 19–65 % завдяки оптимізації відкриття продигових для підтримки фотосинтезу та контролю втрат води, зменшенню концентрації малонового діальдегіду на 22–48 %, що вказує на ефективний захист клітинних мембран від оксидативного стресу, і у підсумку, приводить до зростання врожайності на 13–47 %. Доведено, що в умовах водного стресу обробка біопрепаратами модулює біосинтез абсцизової кислоти та оптимізує її регуляторну функцію, що проявляється у координуваних змінах осмопротекторних механізмів, антиоксидантного захисту та водного режиму рослин. Потрійна комбінація біопрепаратів найбільш ефективно вплинула на фізіолого-біохімічні показники адаптації, забезпечуючи баланс між фітогормональною регуляцією, водним режимом, антиоксидантним захистом і продуктивністю культури сої в умовах гідротермічного стресу.

Ключові слова: пролін, малоновий діальдегід, відносний вміст води, продигова провідність, урожайність.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Останнім часом глобальні кліматичні зміни супроводжуються підвищенням частоти та інтенсивності посух [1], що призводять до змін у ґрунтовому середовищі та впливають на різноманіття ґрунтових організмів, включаючи мікроорганізми та рослини [2]. За таких умов розробка ефективних стратегій підвищення стресостійкості сільськогосподарських культур набуває пріоритетного значення, оскільки потенційні втрати врожайності можуть сягати 50 % [3]. Особливо вразливою до посухи є соя – одна з найважливіших білково-олійних культур світового землеробства [4], врожайність якої в екстремальних умовах дефіциту вологи може знижуватися до 100 %.

На світовому та українському аграрному ринку соя стабільно посідає провідні позиції не лише як експортна продукція, а також як стратегічно важлива сировина для харчової і кормової промисловості, що забезпечує продовольчу та економічну безпеку країни [5]. Соевий сегмент в Україні демонструє стабільну динаміку розвитку за ключовими показниками виробництва – від валового збору до обсягів переробки та експорту. На сьогодні Україна посідає восьме місце у світі за обсягами виробництва сої та перше в Європі [6], а за експортом органічної сої входить у трійку світових лідерів [7].

Досягнуті результати стали можливими завдяки впровадженню у виробництво сортів сої нового покоління, вдосконаленню технологій їх вирощування та зростанню попиту на сою насамперед органічну, на світовому ринку [5]. Водночас кліматичні зміни, що проявляються у поступовому підвищенні середньорічних температур та збільшенні частоти екстремальних погодних явищ, включаючи різкі температурні коливання, створюють нові виклики для агровиробництва [8].

У контексті ускладнення кліматичних умов особливої актуальності набуває вивчення фізіолого-біохімічних механізмів адаптації рослин до стресових чинників навколишнього середовища. Центральну роль у цих процесах відіграє абсцизова кислота (АБК) – ключовий фітогормон, що забезпечує захист рослин від різноманітних стресів, зокрема посухи, високх і низьких температур, засолення, важких металів і радіаційного впливу [9].

Функціональні механізми АБК охоплюють регуляцію дозрівання насіння, стану спокою, контролю динаміки продихів для управління водними ресурсами та адаптації рослин до стресових чинників довкілля. Встановлено,

що в умовах дефіциту вологи синтез АБК посилюється спочатку в коренях, після чого гормон транспортується до листя через ксилему [10]. Підвищення концентрації АБК у листках ініціює сигнальний каскад у замикаючих клітинах, модулюючи їхній тургор і впливаючи на функціонування продихів [11, 12]. Закриття продихів, опосередковане АБК, зменшує транспірацію й обмежує ріст клітин – механізм, критично важливий для виживання рослин в умовах абіотичних стресів [13].

АБК взаємодіє з іншими рослинними гормонами для координації фізіологічних реакцій в умовах стресу [14] й активує спектр біохімічних захисних механізмів, який включає біосинтез проліну, антиоксидантів, ферментів детоксикації активних форм кисню, білків теплового шоку та ненасичених жирних кислот. Крім того, АБК сприяє зміцненню кутикулярного воску, що дозволяє рослинам пом'якшувати шкідливий вплив абіотичних стресорів [15, 16].

Молекулярні та біохімічні механізми дії АБК включають регуляцію експресії стрес-індукованих генів, контроль транскрипційних факторів, модуляцію активності іонних каналів, вплив на метаболізм осмопротекторів і функціонування антиоксидантних систем [17, 18]. Проте функціональна активність АБК-залежних сигнальних шляхів може суттєво модифікуватися під впливом різних біотичних чинників, зокрема мікроорганізмів ризосфери й ендосфери, які входять до складу багатьох біопрепаратів [19, 20].

Застосування в технологіях вирощування сої біопрепаратів, що містять штами різних мікроорганізмів, відкриває перспективи для цілеспрямованої модуляції фітогормонального статусу рослин і підвищення їх адаптивного потенціалу [21]. Однак залишається недостатньо вивченим взаємозв'язок між АБК-опосередкованими сигнальними каскадами та комплексом фізіологічних маркерів стресостійкості, особливо в умовах контрастних гідротермічних режимів у польових експериментах.

Згідно з дослідженнями [22], застосування мікроорганізмів, що стимулюють ріст рослин (plant growth-promoting microorganisms, PGPM), сприяє зниженню негативного впливу водного дефіциту на рослини сої, забезпечує стійкість до абіотичних стресів завдяки синтезу фітогормонів, активації антиоксидантних механізмів і регуляції експресії генів, пов'язаних зі стресовою відповіддю [23, 24]. Використання ризобактерій, що стимулюють зростання рослин (plant growth-promoting

rhizobacteria, PGPR), також приводить до підвищення врожайності, зокрема їх вплив відбувається через прямі (регуляція гормонального й поживного балансу) та непрямі (індукція стійкості до патогенів, розчинення поживних речовин) механізми. Крім того, як зазначено в роботі [25], PGPR здатні вступати у синергетичні або антагоністичні взаємодії з іншими мікроорганізмами в ризосфері та поза нею, що додатково опосередковує покращення росту рослин. Використання мікробних інокулянтів розглядається як інноваційний підхід щодо покращення здоров'я ґрунту, активації кругообігу поживних речовин, а також підвищення стійкості рослин до несприятливих екологічних чинників, шкідників і фітопатогенів [26].

Інтеграція досліджень на різних рівнях організації – від молекулярно-біохімічних процесів до фізіологічних реакцій і агрономічних показників – дозволяє виявити ключові механізми адаптації рослин до стресових умов та обґрунтувати ефективність застосування біопрепаратів як екологічно безпечного засобу підвищення стресостійкості сільськогосподарських культур.

З огляду на зростаючу загрозу глобальних кліматичних змін для продовольчої безпеки та стабільності аграрного виробництва, дослідження інтегративних взаємозв'язків між молекулярними, фізіологічними й агрономічними маркерами адаптації рослин сої під впливом біопрепаратів різної природи відкриває можливості щодо розробки інноваційних екологічно безпечних технологій підвищення стресостійкості цієї стратегічно важливої культури.

Метою дослідження є встановлення впливу біопрепаратів різного походження (мікоризні гриби, ризо- та азотфіксуючі бактерії, фітогормони) на вміст абсцизової кислоти, а також з'ясування їх взаємозв'язків з фізіолого-біохімічними маркерами стресостійкості та продуктивністю сої за умов гідротермічного стресу в системі органічного землеробства.

Матеріал та методи дослідження. Експериментальні дослідження виконано впродовж трирічного періоду (2022–2024 рр.) в агро-екологічних умовах Лівобережного Лісостепу України на території Кременчуцького району Полтавської області. Об'єктом досліджень слугував ранньостиглий сорт сої Хорол, створений селекціонерами ТОВ «НДІ сої».

Ґрунтовий покрив експериментальних ділянок представлений чорноземом залишково-солонцюватим на лесових відкладах.

За результатами агрохімічного аналізу орного шару ґрунту (0–20 см), проведеного з використанням мультипараметричного фотометра Palintes SK500 (Palintest Ltd.), встановлено наступні показники: високий вміст гумусу (5,2 %); середній рівень забезпеченості сполуками азоту (загальний азот – 58,6 мг/кг) та фосфору (рухомий фосфор – 78,3 мг/кг); високий вміст обмінного калію (138,4 мг/кг); $pH_{KCl} = 6,3$.

Польові експерименти закладено методом рендомізованих блоків у трикратній повторності. Загальна площа експериментальної ділянки становила 0,3 га, з них облікова площа – 0,1 га. Технологія вирощування відповідає типовій для цієї агрокліматичної зони з адаптацією до вимог органічного землеробства. У структурі сівозміни попередником для сої слугував ячмінь ярий.

Оскільки соя є теплолюбною культурою, термін сівби кожного року дослідження визначали за температурою ґрунту 10–12 °С на глибині загортання насіння 5 см (20 квітня–5 травня).

Просторове розміщення рослин визначали шириною міжрядь 38 см за норми висіву 700 тис. схожих насінин на гектар, що забезпечувало формування оптимальної густоти стояння рослин у посівах для сортів цієї групи стиглості в умовах нестабільного вологозабезпечення.

Результати моніторингу метеорологічних показників за дослідний період 2022–2024 рр. свідчать про значну варіативність гідротермічного режиму, який суттєво вплинув на умови вирощування сої. Аналіз температурного режиму демонструє відносну стабільність у 2022–2023 рр. з діапазоном середньомісячних температур 14,5–21,3 °С та 15,5–22,0 °С, відповідно. Натомість 2024 рік характеризувався підвищеними показниками температури, особливо в липні та серпні, коли середньомісячні значення досягли 24,1 °С та 22,4 °С відповідно, що перевищує показники попередніх років.

Щодо режиму зволоження, спостерігалася наступна динаміка: у 2022 р. зафіксовано рівномірний розподіл опадів з місячною нормою 38–57 мм; 2023 р. відзначився дещо підвищеною кількістю атмосферних опадів (47–67 мм/місяць). Кардинально відмінною виявилася ситуація у 2024 р., коли зареєстровано безпрецедентно низькі показники опадів у критичні періоди вегетації: травень – 9 мм, липень та серпень – по 3 мм, що класифікується як екстремальна посуха.

Гідротермічний коефіцієнт у вегетаційний період 2024 р. був суттєво нижчим за оптимальні значення, що спричинило формування стресових умов для рослин сої. Особливо несприятливим чинником стало поєднання критично низької кількості атмосферних опадів із підвищеними температурами повітря в період формування генеративних органів та наливу насіння, що є найбільш чутливими фазами онтогенезу цієї культури. Тривала відсутність достатнього вологозабезпечення призвела до вираженого гідротермічного стресу, що спричинив негативний вплив на урожайність сої.

Для отримання репрезентативних даних щодо ефективності застосування біопрепаратів у вирощуванні сої за технологією органічного землеробства, обрано препарати з різним складом і різними формами симбіотичних взаємодій. Особливу увагу під час вибору препаратів приділено можливим синергетичним ефектам взаємодії між компонентами:

1. У препаратах Мікофренд-т® і Мікофренд-р® (БТУ-Центр, Україна) синергія реалізується через взаємопідсилюючу дію мікоризних грибів (*Glomus* sp., *Trichoderma harzianum*) і ризосферних бактерій (*Pseudomonas fluorescens*, *Streptomyces* sp., *Bacillus subtilis*, *B. megaterium* var. *phosphaticum*, *B. muciloginosus*, *Enterobacter* sp.). Зокрема, *Pseudomonas fluorescens* секретує метаболіти, що стимулюють розвиток гіфів грибів *Glomus* sp., тимчасом мікоризні гриби покращують доступність фосфору для бактерій роду *Bacillus*.

2. Штами *Bradyrhizobium japonicum* штам USDA442 (532 C) та *diazoefficiens* штам SEIMA 5079 і SEIMA 5080) у препараті

Profix® (Certis Velchim, Бельгія) виявляють функціональну комплементарність через різну динаміку колонізації корневих тканин і різний температурний оптимум активності нітрогенази, що забезпечує стабільну азотфіксацію в широкому діапазоні агроєкологічних умов.

3. У препараті Віолар® (ТОВ «ІК «Біоінвест-Агро», Україна) синергізм реалізується через збалансоване співвідношення фітогормонів різних класів (ауксинової, цитокинінової та гіберелінової природи), а також вільних амінокислот, ліпідів, стеролів і абсцизової кислоти), що забезпечує комплексну регуляцію ростових і адаптивних процесів у рослинному організмі.

Схема експерименту включала вісім варіантів обробки насіння та обприскування посівів у фазу ВВСН 61 (табл. 1).

Відносний вміст води (ВВВ, %) у листках сої визначали впродовж семи тижнів, починаючи з другої половини травня. Для аналізу, з кожної дослідної ділянки відбирали по одному листку з десяти репрезентативних рослин. Зразки одразу зважували для визначення їхньої свіжої маси (МС), після чого занурювали у дистильовану воду на 24 години за кімнатної температури для досягнення повного тургору. Наступного дня листки обережно осушували від надлишкової вологи та знову зважували для встановлення тургорної маси (МТ). Після цього зразки висушували до сталої маси за температури 70 °С для визначення сухої ваги (МС_у). Значення ВВВ розраховували за формулою відповідно до методики [27]:

$$ВВВ = \frac{(МС - МС_у)}{(МТ - МС_у)} \cdot 100.$$

Таблиця 1 – Опис комбінацій обробки мікробними та гормональними біопрепаратами

Варіанти	Доза	Час та спосіб обробки
Контроль (вода)	-	обробка насіння за 30 хв до посіву
Profix (Prof)	1,25 кг/500 кг	обробка насіння за 30 хв до посіву
Віолар (Vio)	0,5 л/т + 100 мл/га	обробка насіння за 1 год до посіву + обприскування посівів
Мікофренд (Muc)	1,5 л/т	обробка насіння за 1 год до посіву
Profix + Віолар (Prof+Vio)	1,25 кг/500 кг + 100 мл/га	обробка насіння за 30 хв до посіву + обприскування посівів
Мікофренд + Profix (Muc+Prof)	1,5 кг/т + 1,25 кг/500 кг	обробка насіння за 30 хв + інокуляція за 30 хв до посіву
Мікофренд + Віолар (Muc+Vio)	1,5 кг/т + 100 мл/га	обробка насіння за 30 хв до посіву + обприскування посівів
Мікофренд + Profix + Віолар (Muc+Prof+Vio)	1,5 кг/т + 1,25 кг/500 кг + 100 мл/га	обробка насіння за 30 хв + інокуляція за 30 хв до посіву + обприскування посівів

Джерело: авторська розробка.

Аналітичне визначення вмісту АБК проводили методом флуоресцентної спектроскопії за допомогою флуоресцентного спектрометра PerkinElmer LS-45. Приготування екстрактів АБК з листя сої для проведення флуориметричних вимірювань здійснювали відповідно до [28].

Продихова провідність (ПП) є прямим показником відкриття та закриття продихів рослин [29], яку вимірювали за допомогою порометра SC-1 (Decagon Devices, Inc, US) з 30-секундним інтервалом в трьох повтореннях для кожного варіанта експерименту.

Визначення концентрації проліну та малонового діальдегіду (МДА) у листових тканинах сої здійснювали у фазу ВВСН 61 відповідно до методик, наведених в роботі [30].

Продуктивність сої визначали за допомогою повного ручного збирання рослин з облікових площ після попереднього скошування надземної фітомаси. Урожайність насіння з кожної облікової ділянки перераховували на стандартну вологість 15 % та виражали в т/га.

Для кожного експериментального варіанта визначали середнє арифметичне значення (\bar{X}) та стандартну похибку середнього значення (SE). Статистичну значущість відмінностей між дослідними варіантами оцінювали методом однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) з подальшим *post hoc* тестуванням за критерієм Тьюкі HSD за рівня значущості $P < 0,05$. Візуалізацію результатів та статистичну обробку даних здійснювали у програмному забезпеченні RStudio® (R Software, R Development Core Team, Австрія, версія 4.4.3, 2025-02-28). Взаємозв'язки між дослідними параметрами оцінювали методом кореляційного аналізу з розрахунком коефіцієнтів Пірсона за рівня значущості $P < 0,05$. Статистичну обробку експериментальних даних здійснювали за допомогою програмного пакету Statistica 12.0 (StatSoft Inc., USA, 2013).

Результати дослідження та обговорення. Визначення рівня АБК є принципово важливим, оскільки цей фітогормон є ключовим регулятором стрес-індукованих сигнальних каскадів, що запускають комплекс адаптаційних механізмів рослин в умовах водного дефіциту. Інтегральний аналіз фізіологічних маркерів (ВВВ, ПП) у поєднанні з біохімічними індикаторами (пролін, МДА) забезпечує комплексне уявлення про функціональний стан рослинного організму на різних рівнях організації та дає змогу встановити кореляційні зв'язки між біохімічними процесами та кінцевою агрономічною ефективністю виро-

щування сої в умовах гідротермічного стресу (табл. 2).

На основі отриманих експериментальних даних проведено детальний аналіз впливу кліматичних чинників і різних варіантів обробки насіння та посівів на вміст АБК у рослинах сої сорту Хорол. Погодні умови чітко корелювали зі змінами рівня АБК. Зокрема, у 2024 р., незалежно від варіанта біопрепарату, спостерігали істотне підвищення вмісту АБК порівняно з 2022–2023 рр.: на контрольному варіанті вміст АБК становив 8,5 нмоль/г проти 6,8 і 6,5 нмоль/г відповідно. Зростання вмісту АБК на 25,0–30,8 % підтверджує активацію захисних механізмів рослин у відповідь на водний дефіцит, адже саме цей фітогормон є ключовим регулятором реакції рослин на посуху.

Результати досліджень показали, що застосування біопрепаратів різного складу і, відповідно, різного механізму дії, сприяло зниженню рівня АБК порівняно з контролем впродовж усіх років досліджень, що свідчить про їх позитивний вплив на формування стресостійкості рослин. Найбільше зниження вмісту АБК відносно контролю виявлено за комплексного використання Мус+Prof+Vio – на 36,9–38,2 % у 2022–2023 рр. та на 34,1 % у посушливому 2024 р. Високу ефективність також продемонструвала комбінація Мус+Vio, за дії якої рівень АБК знизився на 32,3 % у сприятливі 2022–2023 рр. та на 29,4 % у 2024 р. Серед монообробок найкращі результати продемонстрував препарат Віолар, завдяки якому спостерігали суттєве зниження вмісту АБК на 20,0–20,6 % у сприятливі роки та на 18,8 % у 2024 р.

Аналіз результатів за 2022–2024 рр. підтвердив істотний вплив кліматичних чинників на біохімічні показники адаптивної реакції рослин сої (табл. 2), з найбільш вираженими змінами у 2024 р., коли спостерігалися екстремальні погодні умови.

Показники ВВВ і ПП є базовими фізіологічними показниками, які характеризують водний статус рослин і їх здатність протистояти посусі. Взаємозв'язок між цими показниками відображає різні аспекти водного обміну, адаптаційний потенціал рослин до несприятливих умов середовища та загальну фізіологічну активність. Аналіз змін цих параметрів залежно від кліматичних умов і впливу біопрепаратів (табл. 2) є важливою основою для розроблення ефективних агротехнологічних рішень вирощування сої в умовах кліматичних змін та підвищеної посушливості.

Таблиця 2 – Вплив обробки біопрепаратами на молекулярні та фізіологічні параметри адаптації й урожайність сої в умовах гідротермічного стресу, 2022–2024 рр.

Варіант обробки	АБК, нмоль/г			Пролін, мг/г			МДА, мг/г			ВВВ, %			ПП, моль/м ² ·с			Врожайність, т/га		
	2022	2023	2024	2022	2023	2024	2022	2023	2024	2022	2023	2024	2022	2023	2024	2022	2023	2024
Контроль	6,8 ± 0,10 ^a	6,5 ± 0,10 ^a	8,5 ± 0,13 ^a	5,1 ± 0,07 ^e	5,4 ± 0,08 ^e	6,9 ± 0,10 ^e	9,4 ± 0,14 ^a	9,2 ± 0,14 ^a	17,9 ± 0,27 ^a	73,8 ± 1,09 ^e	75,1 ± 1,10 ^e	69,7 ± 1,02 ^d	0,28 ± 0,004 ^e	0,31 ± 0,005 ^g	0,19 ± 0,003 ^g	2,24 ± 0,033 ^f	2,46 ± 0,035 ^f	1,86 ± 0,029 ^g
Prof	6,1 ± 0,09 ^b	5,9 ± 0,09 ^{ab}	7,8 ± 0,11 ^b	6,2 ± 0,09 ^e	6,4 ± 0,09 ^{cd}	8,6 ± 0,13 ^c	7,2 ± 0,11 ^c	6,9 ± 0,10 ^{bcd}	13,9 ± 0,21 ^c	80,5 ± 1,18 ^{cd}	82,5 ± 1,21 ^{cd}	77,5 ± 1,14 ^c	0,32 ± 0,005 ^d	0,37 ± 0,005 ^{ef}	0,25 ± 0,004 ^f	2,50 ± 0,037 ^e	2,82 ± 0,041 ^e	2,11 ± 0,029 ^f
Vio	5,4 ± 0,08 ^{cd}	5,2 ± 0,08 ^{cd}	6,9 ± 0,10 ^c	6,8 ± 0,10 ^b	7,5 ± 0,11 ^{ab}	9,5 ± 0,14 ^b	5,9 ± 0,09 ^d	5,4 ± 0,08 ^d	11,3 ± 0,17 ^e	85,1 ± 1,25 ^{bc}	87,2 ± 1,28 ^{bcd}	84,0 ± 1,24 ^b	0,36 ± 0,005 ^{cd}	0,39 ± 0,006 ^{de}	0,28 ± 0,004 ^{de}	2,71 ± 0,039 ^d	2,93 ± 0,044 ^{de}	2,32 ± 0,035 ^e
Myc	5,6 ± 0,08 ^c	5,4 ± 0,08 ^c	7,1 ± 0,10 ^c	5,7 ± 0,08 ^d	5,9 ± 0,09 ^{de}	7,4 ± 0,11 ^e	8,2 ± 0,12 ^b	7,9 ± 0,12 ^{ab}	14,8 ± 0,22 ^b	79,2 ± 1,17 ^{de}	81,2 ± 1,20 ^{de}	77,8 ± 1,14 ^c	0,31 ± 0,005 ^d	0,35 ± 0,005 ^f	0,26 ± 0,004 ^f	2,73 ± 0,039 ^{cd}	3,01 ± 0,045 ^{de}	2,41 ± 0,036 ^{de}
Prof+Vio	5,1 ± 0,07 ^d	4,8 ± 0,07 ^e	6,7 ± 0,10 ^c	7,4 ± 0,11 ^a	7,8 ± 0,11 ^a	10,4 ± 0,15 ^a	6,1 ± 0,09 ^d	5,6 ± 0,08 ^{cd}	10,9 ± 0,16 ^c	86,3 ± 1,27 ^b	88,7 ± 1,30 ^{abc}	85,7 ± 1,26 ^b	0,36 ± 0,005 ^b	0,43 ± 0,006 ^c	0,31 ± 0,005 ^{bc}	2,91 ± 0,044 ^{bc}	3,10 ± 0,045 ^{cd}	2,53 ± 0,037 ^{cd}
Myc+Prof	5,3 ± 0,08 ^{cd}	5,0 ± 0,07 ^{de}	6,2 ± 0,09 ^d	6,1 ± 0,09 ^{cd}	6,3 ± 0,09 ^{cd}	8,0 ± 0,12 ^d	7,3 ± 0,11 ^c	6,9 ± 0,10 ^{bcd}	12,6 ± 0,19 ^d	85,4 ± 1,26 ^{bc}	87,8 ± 1,29 ^{abcd}	84,6 ± 1,25 ^b	0,35 ± 0,005 ^{bc}	0,41 ± 0,006 ^{cd}	0,29 ± 0,004 ^{cd}	2,93 ± 0,043 ^b	3,24 ± 0,048 ^{bc}	2,65 ± 0,039 ^{bc}
Myc+Vio	4,6 ± 0,07 ^e	4,4 ± 0,06 ^f	6,0 ± 0,09 ^{de}	6,3 ± 0,09 ^c	6,4 ± 0,09 ^b	8,3 ± 0,12 ^{cd}	6,9 ± 0,10 ^c	7,5 ± 1,14 ^{abc}	6,4 ± 0,09 ^e	87,1 ± 1,28 ^{ab}	89,5 ± 1,32 ^{ab}	86,7 ± 1,27 ^{ab}	0,37 ± 0,005 ^b	0,46 ± 0,007 ^b	0,32 ± 0,005 ^b	3,02 ± 0,045 ^{ab}	3,36 ± 0,050 ^{ab}	2,76 ± 0,041 ^b
Myc+Prof+Vio	4,2 ± 0,06 ^f	4,1 ± 0,06 ^f	5,6 ± 0,08 ^e	6,5 ± 0,10 ^{bc}	6,6 ± 0,10 ^{cd}	8,7 ± 0,13 ^c	6,3 ± 0,09 ^d	5,8 ± 0,09 ^{cd}	9,4 ± 0,14 ^f	92,3 ± 1,36 ^a	94,7 ± 1,39 ^a	91,9 ± 1,35 ^a	0,41 ± 0,006 ^a	0,51 ± 0,008 ^a	0,39 ± 0,006 ^a	3,15 ± 0,046 ^a	3,57 ± 0,053 ^a	2,96 ± 0,045 ^a

Примітка: значення представлені як середнє ± SE (n = 10). Різні літери в стовпцях позначають статистично значущі відмінності при P<0,05 за результатами post hoc-тесту за критерієм Тьюкі HSD.

Джерело: побудовано за результатами авторських досліджень.

На контрольних варіантах рівень ВВВ становив 73,8 % у 2022 р., 75,1 % у вологому 2023 р. та знизився до критичних 69,7 % у посушливому 2024 р. Зниження цього показника на 7,2 % у 2024 р. порівняно з 2023 р. свідчить про суттєве порушення водного балансу рослин в умовах гострого водного дефіциту. Відомо, що зниження ВВВ до рівня 70–80 % у клітинах рослин пригнічує ключові метаболічні процеси, включно з фотосинтезом і диханням, що є ознакою глибокого фізіологічного стресу та потенційно незворотних змін у структурі клітинних мембран [31].

Показник ПП на контрольних варіантах знизився на 38,7 % у вологому 2023 р. порівняно з посушливим 2024 р., що відображає активацію захисних реакцій рослин, спрямованих на зменшення втрат води завдяки закриттю продихів.

Застосування біопрепаратів суттєво покращувало водний статус рослин у всі роки досліджень, проте найбільш виражений ефект спостерігали саме за умов водного дефіциту. У сприятливому за вологозабезпеченням 2023 р. застосування Profix привело до підвищення ВВВ до 82,5 % (на 9,9 % порівняно з контролем), Віолар – до 87,2 % (на 16,1%), а Мікофренд – до 81,2 % (на 8,1 %). Поєднання біопрепаратів привело до ще більш вираженого ефекту: за використання Prof+Vio рівень ВВВ підвищився до 88,7 % (на 18,1 %), Мус+Prof – до 87,8 % (на 16,9 %), Мус+Vio – до 89,5 % (на 19,2 %). Найефективнішою виявилася комплексна обробка Мус+Prof+Vio, яка сприяла підвищенню ВВВ на 26,1 % відносно контролю, що свідчить про виражений синергічний ефект різних за механізмом дії біологічних препаратів.

В умовах гострої посухи 2024 р. вплив біопрепаратів на водний статус був ще більш помітним. Комплексне застосування Мус+Prof+Vio підвищило рівень ВВВ на 31,9 % відносно контролю, демонструючи ефективність біопрепаратів у формуванні системи водоутримання в клітинах. Показово, що навіть за гострої посухи рослини, оброблені комплексом біопрепаратів, мали ВВВ на рівні 91,9 %, що суттєво перевищувало цей показник на контрольному варіанті у сприятливих умовах 2023 р. (75,1 %). Це підтверджує високу ефективність біопрепаратів у підвищенні стресостійкості та нівелюванні негативного впливу водного дефіциту.

Застосування біопрепаратів також суттєво впливало на ПП рослин, забезпечуючи її оптимальні значення відповідно до умов вирощування. У 2023 р. обробка насіння Profix

збільшила ПП на 19,4 % порівняно з контролем, застосування препаратів Віолар та Мікофренд – на 25,8 та 12,9 %, відповідно. Найбільш виражений ефект забезпечили комбіновані обробки: за дії Prof+Vio ПП збільшилась на 38,7 %, Мус+Prof – на 32,3 %, Мус+Vio – на 48,4 %. Максимальне значення продигової провідності (0,51 моль/м²·с, +64,5 % до контролю) зафіксовано за комплексної обробки Мус+Prof+Vio, що забезпечувало високий рівень фотосинтетичної активності.

В умовах посухи 2024 р. дія біопрепаратів була спрямована не на максимальне відкриття продихів, а на їх оптимальне регулювання. Комплексна обробка препаратами Мус+Prof+Vio привела до підвищення ПП до 0,39 моль/м²·с, що у 2,1 рази вище порівняно з контролем, це забезпечило достатній рівень фотосинтезу за одночасного обмеження втрат води [32].

Також у відповідь на посуху 2024 р. спостерігалось значне підвищення вмісту проліну в рослинах у всіх варіантах досліду порівняно з 2022–2023 рр. (табл. 2). На контролі його вміст сягнув 6,9 мкг/г, що на 26,7–34,7 % вище порівняно з попередніми роками (рис. 1). Це свідчить про активацію природних захисних механізмів, оскільки пролін є важливим осмопротектором, який накопичується в клітинах рослин за умов водного дефіциту, підтримуючи осмотичний баланс. Отримані в цій роботі результати узгоджуються з нашими попередніми дослідженнями щодо ролі біопрепаратів у формуванні врожайності сої під час вирощування за умов нестійкого зволоження й органічного землеробства [33].

Максимальне накопичення проліну було зафіксовано у варіанті з комбінованим застосуванням Prof+Vio: у 2022–2023 рр. вміст проліну становив 7,4–7,8 мкг/г (на 43,9–45,1 % вище контролю), а в 2024 р. – 10,4 мкг/г (на 51,4 % вище). Цей ефект можна пояснити синергічною дією азотфіксуючих бактерій і фітогормонального комплексу у складі препаратів щодо регуляції метаболічних процесів. Комплексне застосування трьох біопрепаратів Мус+Prof+Vio також сприяло суттєвому підвищенню вмісту проліну – до 6,5–6,6 мкг/г у 2022–2023 рр. та до 8,7 мкг/г у 2024 р. (на 21,4–27,6 % вище контролю), що підтверджує ефективність інтегрованого підходу до стимуляції адаптивних механізмів.

Особливо показовими за даними табл. 2 виявилися зміни вмісту МДА, який у 2024 р. на контролі досяг 17,9 мкг/г, що майже вдвічі більше за показники 2022–2023 рр. (9,2–9,4 мкг/г).

Таке різке зростання рівня МДА вказує на активізацію процесів перекисного окиснення ліпідів у клітинних мембранах рослин внаслідок посухи, яка негативно впливає на їхню структурну цілісність і функціональність.

Комплексне застосування трьох біопрепаратів Мус+Prof+Vio виявилось найбільш ефективним щодо корегування рівня МДА в рослинах, який зменшився на 33,2–37,2 % у 2022–2023 рр. та на 47,7 % у 2024 р. Це свідчить про потужний антиоксидантний ефект і формування комплексної системи захисту клітин від оксидативного стресу. Високу ефективність також показала комбінація препаратів Мус+Vio, застосування якої привело до зниження вмісту МДА на 26,4–29,8 % у 2022–2023 рр. та на 37,8 % у 2024 р., що підтверджує значну роль мікоризоутворюючих грибів і фітогормонів у підтримці цілісності клітинних мембран під дією абіотичного стресу.

Несприятливі кліматичні умови 2024 р. зумовили суттєве зниження урожайності сої в усіх варіантах дослідження (табл. 2, рис. 2).

На контрольному варіанті урожайність становила 1,9 т/га, що на 17,0–24,4 % нижче порівняно з 2022–2023 рр. Зменшення ВВВ нижче 70 % підтверджує, що водний дефіцит є критичним чинником, що порушує фотосинтез, дихання і транспорт асимілятів, безпосередньо впливаючи на формування продуктивності культури сої.

Максимальну урожайність забезпечило комплексне застосування трьох біопрепаратів Мус+Prof+Vio в технології вирощування сої. Перевищення врожайності з контрольних ділянок за їх використання становило 40,6–45,1 % у 2022–2023 рр. та 59,1 % у 2024 році. Це підтверджено результатами статистичного аналізу та свідчить про високу ефективність інтегрованого підходу для підвищення посухостійкості та продуктивності сої. Високі показники урожайності також забезпечувала комбінація препаратів Мус+Vio (+34,8–36,6 % у 2022–2023 рр. та +48,4 % у 2024 р.), що підтверджує провідну роль мікоризації та гормональної регуляції у формуванні продуктивності сої.

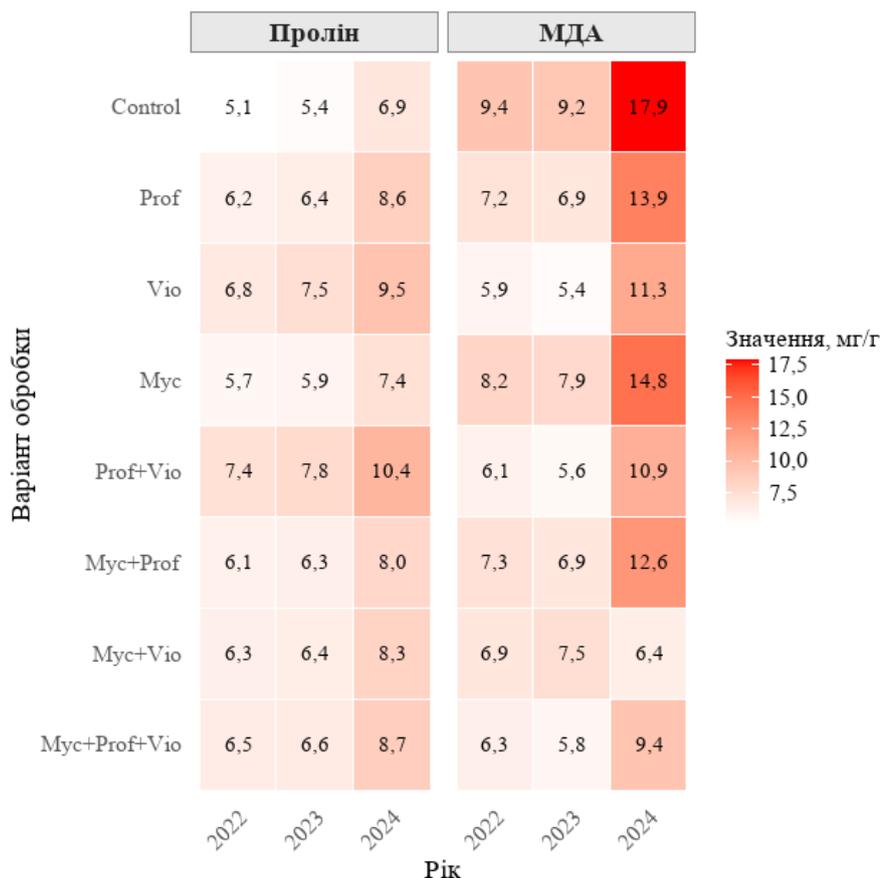


Рис. 1. Теплова карта вмісту проліну та МДА в рослинах сої за різних варіантів обробки, 2022–2024 рр.

Джерело: розраховано та побудовано авторами.

Для підтвердження встановлених закономірностей здійснено кореляційний аналіз між фізіолого-біохімічними показниками адаптації сої до гідротермічного стресу. Найбільш показовим є надзвичайно сильний негативний кореляційний зв'язок між вмістом АБК та врожайністю ($r = -0,909$), що підтверджує ключову роль цього фітогормону у зниженні продуктивності сої під дією стресу. Також високий позитивний кореляційний зв'язок між вмістом АБК та МДА ($r = 0,882$) свідчить про прямий зв'язок між активацією синтезу АБК і розвитком оксидативного стресу у рослинних тканинах.

Вміст АБК негативно корелював з продиговою провідністю ($r = -0,885$), що підтверджує фізіологічну роль АБК як основного регулятора закриття продихів у відповідь на водний дефіцит. Також зафіксовано негативну кореляцію між вмістом АБК і відносним вмістом води (ВВВ) ($r = -0,723$), що вказує на погіршення водного статусу рослин зі зростанням концентрації гормону стресу. Щодо взаємозв'язку між вмістом проліну та рівнем АБК, встановлено слабкий позитивний кореляційний зв'язок ($r = 0,306$), що свідчить про

паралельне, хоча й частково незалежне залучення цих метаболітів у стрес-адаптивних механізмах.

Значущий негативний зв'язок з коефіцієнтом кореляції $r = -0,799$ виявлено між вмістом МДА та ПП, що відображає порушення газообмінних процесів в рослинах за умов оксидативного стресу. Крім того, кореляція між вмістом МДА та ВВВ з $r = -0,574$, підтверджує негативний вплив посиленого перекисного окиснення ліпідів на водний статус рослин. Висока негативна кореляція між вмістом МДА та врожайністю ($r = -0,754$) свідчить про прямий негативний вплив оксидативного стресу на формування продуктивності сої.

Водночас сильний позитивний кореляційний зв'язок між ВВВ і ПП ($r = 0,832$) підтверджує значну роль водного режиму рослин на функціонування продихового апарату. Виявлено також високу позитивну кореляцію між ВВВ та врожайністю ($r = 0,847$), що демонструє критичну роль підтримання оптимального водного статусу для формування продуктивності культури.

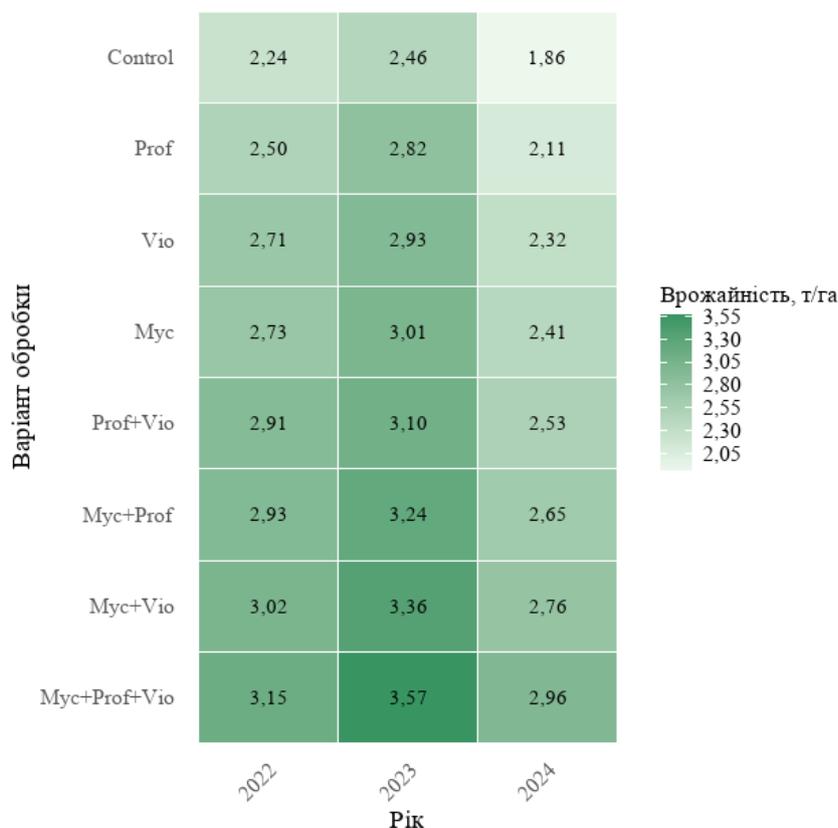


Рис. 2. Теплова карта врожайності сої за різних варіантів обробки, 2022–2024 рр.

Джерело: розраховано та побудовано авторами.

Найсильніший позитивний кореляційний зв'язок зафіксовано між ПП та врожайністю ($r = 0,955$), що підкреслює вирішальне значення стабільного функціонування продихового апарату для забезпечення високої продуктивності сої.

Отримані результати переконливо підтверджують, що застосування біопрепаратів у технологіях вирощування сої сприяє оптимізації водного режиму, зниженню інтенсивності оксидативного стресу та підтриманню продуктивності рослин в умовах гідротермічного стресу через комплексний вплив на ключові фізіолого-біохімічні механізми адаптації.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило ключову роль АБК у формуванні адаптивних реакцій рослин сої на гідротермічний стрес завдяки регуляції продихової провідності та вологозабезпечення. В умовах дефіциту опадів спостерігалось зростання концентрації АБК на 25,0–30,8 %, що свідчило про активацію захисних механізмів. Застосування біопрепаратів сприяло зниженню рівня цього гормону в середньому на 9,2–36,3 %, що підтверджує їх позитивний вплив на стресостійкість рослин сої.

У відповідь на посушливі умови 2024 р. відбулося суттєве підвищення вмісту проліну у всіх варіантах досліду, що є ознакою активації природних механізмів осморегуляції. Найбільше накопичення проліну в рослинах сої зафіксовано за використання комплексу біопрепаратів Prof+Vio – в середньому на 47,1 % порівняно з контролем.

Посушливі умови також спричинили істотне зростання концентрації малонового діальдегіду, що вказувало на посилення процесів перекисного окиснення ліпідів і порушення структурної цілісності клітинних мембран. Комплексне застосування біопрепаратів, особливо Мус+Prof+Vio, привело до зниження вмісту МДА на 15,6–41,8 % і збільшення вмісту проліну на 9,1–46,6 % порівняно з контролем, що свідчило про формування ефективної антиоксидантної системи захисту.

Встановлено, що застосування біопрепаратів суттєво покращувало водний статус рослин сої в усі роки дослідження – в середньому на 10,0–27,6 % порівняно з контролем, що підтверджує формування ефективних механізмів утримання води в клітинах і підвищення стресостійкості.

Оптимізація продихової провідності рослин під впливом біопрепаратів відбувалася не лише завдяки підвищенню провідності

(на 19,2–65,4 % порівняно з контролем), а також через формування регуляторних механізмів, що забезпечували адаптивне функціонування продихового апарату відповідно до гідротермічного режиму.

Кореляційний аналіз підтвердив ключові механізми впливу на продуктивність: встановлено сильний негативний зв'язок урожайності з вмістом АБК ($r = -0,909$) і МДА ($r = -0,754$) та сильний позитивний – з продиховою провідністю ($r = 0,955$) і відносним вмістом води ($r = 0,847$). Зниження урожайності на 17–24 % у контрольному варіанті в умовах посухи підтверджує критичну роль водного дефіциту в обмеженні продуктивності сої. Водночас застосування біопрепаратів, особливо комплексу Мус+Prof+Vio, сприяло підвищенню врожайності на 12,3–45,5 % завдяки покращенню водного режиму, зниженню концентрації АБК і МДА, що свідчить про ефективність комплексного підходу до підвищення посухостійкості культури.

Результати дослідження переконливо демонструють, що саме комплексне застосування біопрепаратів є найбільш ефективною стратегією підвищення адаптивного потенціалу органічної сої до гідротермічного стресу. Трьохкомпонентна комбінація мікоризних грибів, азотфіксуючих бактерій і фітогормонів забезпечує системну підтримку метаболічних процесів рослин і стабільну продуктивність навіть за екстремальних погодних умов. Це підтверджує доцільність розроблення адаптивних технологій органічного виробництва сої з урахуванням сучасних тенденцій кліматичних змін.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Capua G.D., Rahmstorf S. Extreme weather in a changing climate. *Environmental Research Letters*. 2023. No 18. 102001. DOI: 10.1088/1748-9326/acfb23
2. Bogati K., Walczak M. The impact of drought stress on soil microbial community, enzyme activities and plants. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. No 1. 189. DOI: 10.3390/agronomy12010189
3. Resilience of soybean cultivars to drought stress during flowering and early-seed setting stages / S. Poudel et al. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. 1277. DOI: 10.1038/s41598-023-28354-0
4. Чайка Т.О., Ляшенко В.В., Хоменко Б.С. Вплив інокуляції насіння на врожайність сої за органічної технології вирощування. *Таврійський науковий вісник. Сільськогосподарські науки*. 2023. № 133. С. 180–187. DOI: 10.32782/226-0099.2023.133.24
5. Агробіологічні основи вирощування сої та шляхи максимальної реалізації її продуктивності: монографія / Г.М. Заболотний та ін. Вінниця: ФОП Корзун Д.Ю., 2020. 276 с.

6. Soybean and meal market 2025. URL: <https://www.apk-inform.com/uk/conferences/soybean-meal-market-2025/about>.
7. Чайка Т.О. Вирощування сої та нішевих культур в Україні за органічними технологіями: перспективи, економічна ефективність і технологічні аспекти. Ресурсозберігаючі технології вирощування культурних рослин: I міжнар. наук.-практ. конф. Біла Церква: БНАУ, 2025. С. 9–13.
8. Changes in the frequency of sharp cold snaps in spring during the XXI century in Ukraine and their impact on agricultural production / V.O. Balabukh et al. *Agricultural Science and Practice*. 2024. Vol. 11. No 3. P. 3–22. DOI: 10.15407/agrisp11.03.003
9. Abscisic acid signaling and abiotic stress tolerance in plants: a review on current knowledge and future prospects / K. Vishwakarma et al. *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. 161. DOI: 10.3389/fpls.2017.00161
10. Phytohormonal signaling in plant resilience: advances and strategies for enhancing abiotic stress tolerance / S. Das et al. *Plant Growth Regulation*. 2025. Vol. 105. P. 329–360. DOI: 10.1007/s10725-025-01279-6
11. The role of ABA and MAPK signaling pathways in plant abiotic stress responses / A. Danquah et al. *Biotechnology Advances*. 2013. Vol. 32. P. 40–52.
12. Awan F.K., Khurshid M.Y., Mehmood A.J.I.I.R.B. Plant growth regulators and their role in abiotic stress management. *International Journal of Innovative Biosciences Research*. 2017. Vol. 1. P. 9–21.
13. Peleg Z., Blumwald E. Hormone balance and abiotic stress tolerance in crop plants. *Current Opinion in Plant Biology*. 2011. Vol. 14. P. 290–295. DOI: 10.1016/j.pbi.2011.02.001
14. He M., He C.Q., Ding N.Z. Abiotic stresses: general defenses of land plants and chances for engineering multistress tolerance. *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9. 1771. DOI: 10.3389/fpls.2018.01771
15. Lee S.B., Suh M.C. Advances in the understanding of cuticular waxes in *Arabidopsis thaliana* and crop species. *Plant Cell Reports*. 2015. Vol. 34. P. 557–572. DOI: 10.1007/s00299-015-1772-2
16. Abhilasha A., Choudhury S.R. Molecular and Physiological Perspectives of Abscisic Acid Mediated Drought Adjustment Strategies. *Plants (Basel)*. 2021. Vol. 10. No 12. 2769. DOI: 10.3390/plants10122769
17. Abscisic acid: emergence of a core signaling network / S.R. Cutler et al. *Annual Review of Plant Biology*. 2010. Vol. 61. P. 651–679. DOI: 10.1146/annurev-arplant-042809-112122.
18. Mathivanan S. Abiotic Stress-Induced Molecular and Physiological Changes and Adaptive Mechanisms in Plants. In: Fahad S., Saud S., Chen Y., Wu C., Wang D. *Abiotic stress in plants*. IntechOpen; London UK: 2021. DOI: 10.5772/intechopen.93367
19. The abscisic acid signaling negative regulator *OsPP2C68* confers drought and salinity tolerance to rice / B. Wang et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. 6730. DOI: 10.1038/s41598-025-91226-2
20. Potential role of root-associated bacterial communities in adjustments of desert plant physiology to osmotic stress / Z. Zhang et al. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2023. Vol. 204. 108124. DOI: 10.1016/j.plaphy.2023.108124
21. Orozco-Mosqueda M.d.C., Santoyo G., Glick B.R. Recent advances in the bacterial phytohormone modulation of plant growth. *Plants*. 2023. Vol. 12. No 3. 606. DOI: 10.3390/plants12030606
22. Yaghoobian I., Modarres-Sanavy S.A.M., Smith D.L. Plant growth promoting microorganisms (PGPM) as an eco-friendly option to mitigate water deficit in soybean (*Glycine max* L.): Growth, physio-biochemical properties and oil content. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2022. Vol. 191. P. 55–66. DOI: 10.1016/j.plaphy.2022.09.013
23. Inter-organismal signaling in the rhizosphere / M. Antar et al. In: Gupta V.V.S.R., Sharma A.K. *Rhizosphere biology: interactions between microbes and plants*. rhizosphere biology. Springer, Singapore. 2021. DOI: 10.1007/978-981-15-6125-2_13
24. *Lactobacillus helveticus* EL2006H cell-free supernatant enhances growth variables in *Zea mays* (maize), *Glycine max* L. Merrill (soybean) and *Solanum tuberosum* (potato) exposed to NaCl stress / J. Naamala et al. *Frontiers in Microbiology*. 2023. Vol. 13. 1075633. DOI: 10.3389/fmicb.2022.1075633
25. Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability -Microbial inoculants in sustainable agriculture: advancements, challenges, and future directions / A.M. Diaz-Rodriguez et al. *Plants*. 2025. Vol. 14. No 2. 191. DOI: 10.3390/plants14020191
26. Relative water content, proline, and anti-oxidant enzymes in leaves of long shelf-life tomatoes under drought stress and rewatering / C. Patané et al. *Plants*. 2022. Vol. 11. 3045. DOI: 10.3390/plants11223045
27. 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
28. Stomatal conductance is a key parameter to assess limitations to photosynthesis and growth potential in barley genotypes / Q. Jiang et al. *Plant Biology*. 2006. Vol. 8. P. 515–521. DOI: 10.1055/s-2006-923964
29. Assessing morpho-physiological and biochemical markers of soybean for drought tolerance potential / M.K. Fatema et al. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No 2. 1427. DOI: 10.3390/su15021427
30. Filipović A. Water plant and soil relation under stress situations. Meena R.S., Datta R. *Soil moisture importance*. IntechOpen. 2020. DOI: 10.5772/intechopen.93528
31. Physiological and biochemical aspects of pre-sowing treatment of soybean (*Glycine max* L. Merr.) seeds / T. Chaika et al. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2025. Vol. 21. No 2. P. 106–119. DOI: 10.31548/dopovidi/2.2025.106
32. 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

REFERENCES

1. Capua, G.D., Rahmstorf, S. (2023). Extreme weather in a changing climate. *Environmental Research Letters*. no. 18, 102001. DOI: 10.1088/1748-9326/acfb23
2. Bogati, K., Walczak, M. (2022). The Impact of Drought Stress on Soil Microbial Community, Enzyme Activities and Plants. *Agronomy*. no. 12(1), 189. DOI: 10.3390/agronomy12010189
3. Poudel, S., Vennam, R.R., Shrestha, A., Reddy, K.R., Wijewardane, N.K., Reddy, K.N., Bheemannahalli, R. (2023). Resilience of soybean cultivars to drought stress during flowering and early-seed setting stages. *Scientific Reports*. no. 13, 1277. DOI: 10.1038/s41598-023-28354-0
4. Chaika, T.O., Liashenko, V.V., Khomenko, B.S. (2023). Vplyv inokuliacii nasinnia na vrozhaunist soi za orhanichnoi tekhnolohii vyroshchuvannia [The impact of seed inoculation on soybean yield under organic cultivation technology]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Silskohospodarski nauky [Taurida Scientific Herald. Rural Sciences]*. no. 133, pp. 180–187. DOI: 10.32782/2226-0099.2023.133.24
5. Zabolotnyi, H.M., Mazur, V.A., Tsyhanska, O.I., Didur, I.M., Tsyhanskyi, V.I., Pantsyreva, H.V. (2020). Ahrobiolohichni osnovy vyroshchuvannia soi ta shliakh maksymalnoi realizatsii yii produktyvnosti: monohrafiia [Agrobiological principles of soybean cultivation and ways to maximize its productivity]. *Vynnytsia, FOP Korzun D.Yu.*, 276 p.
6. Soybean and meal market 2025. Available at: <https://www.apk-inform.com/uk/conferences/soybean-meal-market-2025/about>.
7. Chaika, T.O. (2025). Vyroshchuvannia soi ta nishevykh kultur v Ukraini za orhanichnymi tekhnolohiiamy: perspektyvy, ekonomichna efektyvnist i tekhnolohichni aspekty [Organic cultivation of soybean and niche crops in Ukraine: prospects, economic efficiency, and technological aspects]. *Resursozberihaiuchi tekhnolohii vyroshchuvannia kulturnykh roslyn: I Mizhnar. nauk.-prakt. konf. [Resource-saving technologies for cultivated crop production: international scientific and practical conference]*. Bila Tserkva, BNAU, pp. 9–13.
8. Balabukh, V.O., Malytska, L.V., Dovhal, H.P., Yahodynets, S.M., Lavrynenko, O.M. (2024). Changes in the frequency of sharp cold snaps in spring during the XXI century in Ukraine and their impact on agricultural production. *Agricultural Science and Practice*. no. 11(3), pp. 3–22. DOI: 10.15407/agrisp11.03.003
9. Vishwakarma, K., Upadhyay, N., Kumar, N., Yadav, G., Singh, J., Mishra, R.K., Kumar, V., Verma, R., Upadhyay, R.G., Pandey, M., Sharma, S. (2017). Abscisic acid signaling and abiotic stress tolerance in plants: a review on current knowledge and future prospects. *Frontiers in Plant Science*. no. 8, 161. DOI: 10.3389/fpls.2017.00161
10. Das, S., Shil, S., Rime, J., Yumkhaibam, T., Mounika, V., Singh, A.P., Kundu, M., Lalhmangaihualiet, H.P., Hazarika, T.K., Singh, A.K., Singh, S. (2025). Phytohormonal signaling in plant resilience: advances and strategies for enhancing abiotic stress tolerance. *Plant Growth Regulation*. no. 105, pp. 329–360. DOI: 10.1007/s10725-025-01279-6
11. Danquah, A., de Zelicourt, A., Colcombet, J., Hirt, H. (2013). The role of ABA and MAPK signaling pathways in plant abiotic stress responses. *Biotechnological Advances*. no. 32, pp. 40–52.
12. Awan, F.K., Khurshid, M.Y., Mehmood, A.J.I.I.R.B. (2017). Plant growth regulators and their role in abiotic stress management. *International Journal of Innovative Biosciences Research*. no. 1, pp. 9–21.
13. Peleg, Z., Blumwald, E. (2011). Hormone balance and abiotic stress tolerance in crop plants. *Current Opinion in Plant Biology*. no. 14, pp. 290–295. DOI: 10.1016/j.pbi.2011.02.001
14. He, M., He, C.Q., Ding, N.Z. (2018). Abiotic stresses: general defenses of land plants and chances for engineering multistress tolerance. *Frontiers in Plant Science*. no. 9, 1771. DOI: 10.3389/fpls.2018.01771
15. Lee, S.B., Suh, M.C. (2015). Advances in the understanding of cuticular waxes in *Arabidopsis thaliana* and crop species. *Plant Cell Reports*. no. 34, pp. 557–572. DOI: 10.1007/s00299-015-1772-2
16. Abhilasha, A., Choudhury, S.R. (2021). Molecular and physiological perspectives of abscisic acid mediated drought adjustment strategies. *Plants (Basel)*. no. 10(12), 2769. DOI: 10.3390/plants10122769
17. Cutler, S.R., Rodriguez, P.L., Finkelstein, R.R., Abrams, S.R. (2010). Abscisic acid: emergence of a core signaling network. *Annual Review of Plant Biology*. no. 61, pp. 651–679. DOI: 10.1146/annurev-arplant-042809-112122.
18. Mathivanan, S., Fahad S., Saud S., Chen Y., Wu C., Wang D. (2021). Abiotic stress-induced molecular and physiological changes and adaptive mechanisms in plants. *Abiotic stress in plants*. IntechOpen. London, UK. DOI: 10.5772/intechopen.93367
19. Wang, B., Luo, Y., Zhong, B., Xu, H., Wang, F., Li, W., Lin, M., Chen, J., Chen, L., Liang, M., Dai, X. (2025). The abscisic acid signaling negative regulator *OsPP2C68* confers drought and salinity tolerance to rice. *Scientific Reports*. no. 15, 6730. DOI:10.1038/s41598-025-91226-2
20. Zhang, Z., Chai, X., Zhang, B., Lu, Ya., Gao, Ya., Tariq, A., Li, X., Zeng, F. (2023). Potential role of root-associated bacterial communities in adjustments of desert plant physiology to osmotic stress. *Plant Physiology and Biochemistry*. no. 204, 108124. DOI: 10.1016/j.plaphy.2023.108124
21. Orozco-Mosqueda, M.d.C., Santoyo, G., Glick, B.R. (2023). Recent advances in the bacterial phytohormone modulation of plant growth. *Plants*. no. 12(3), 606. DOI: 10.3390/plants12030606
22. Yaghoubian, I., Modarres-Sanavy, S.A.M., Smith, D.L. (2022). Plant growth promoting microorganisms (PGPM) as an eco-friendly option to mitigate water deficit in soybean (*Glycine max* L.): Growth, physio-biochemical properties and oil content. *Plant Physiology and Biochemistry*. no. 191, pp. 55–66. DOI: 10.1016/j.plaphy.2022.09.013
23. Antar, M., Gopal, P., Msimbira, L.A., Naamala, J., Nazari, M., Overbeek, W., Backer, R., Smith, D.L. (2021). Inter-organismal signaling in the rhizosphere. *Rhizosphere biology: interactions between microbes and plants*. *Rhizosphere biology*. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-15-6125-2_13
24. Naamala, J., Msimbira, L.A., Subramanian, S., Smith, D.L. (2023). *Lactobacillus helveticus* EL2006H cell-free supernatant enhances growth variables in *Zea mays* (maize), *Glycine max* L. Merill

(soybean) and *Solanum tuberosum* (potato) exposed to NaCl stress. *Frontiers in Microbiology*. no. 13, 1075633. DOI: 10.3389/fmicb.2022.1075633

25. Diaz-Rodríguez, A.M., Parra, Cota F.I., Cira Chávez, L.A., García Ortega, L.F., Estrada Alvarado, M.I., Santoyo, G., de los Santos-Villalobos, S. (2025). Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability Microbial inoculants in sustainable agriculture: advancements, challenges, and future directions. *Plants*. no. 14(2), 191. DOI:10.3390/plants14020191

26. Patané, 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

27. 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

28. Jiang, Q., Roche, D., Monaco, T.A., Hole, D. (2006). Stomatal conductance is a key parameter to assess limitations to photosynthesis and growth potential in barley genotypes. *Plant Biology*. no. 8, pp. 515–521. DOI: 10.1055/s-2006-923964

29. 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/sul15021427

30. Filipović, A. Water plant and soil relation under stress situations. Soil moisture importance. *IntechOpen*. 2020. DOI: 10.5772/intechopen.93528

31. Chaika, T., Korotkova, I., Shevnikov, M., Lishenko, V., Horbenko, O. (2025). Physiological and biochemical aspects of pre-sowing treatment of soybean (*Glycine max* L. Merr.) seeds. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. no. 21(2), pp. 106–119. DOI: 10.31548/dopovidi/2.2025.106

32. Chaika, T.O., Korotkova, I.V. (2025). Vplyv predposivnoi obrobky nasinnia soi biopreparatamy na vmist fotosyntetychnykh pihmentiv i vrozhaunist 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 [Agrobiologia]*. no 1, pp. 188–198. DOI: 10.33245/2310-9270-2025-195-1-188-198

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

Chayka T., Korotkova I.

The hydrothermal stress remains one of the key factors limiting soybean productivity, especially in organic farming. This study aims to investigate the effect of biological products on the abscisic acid content, as well as physiological, biochemical and agronomic indicators of the adaptive capacity of soybeans Khorol variety when grown under hydrothermal stress conditions. Field experiments were conducted in Poltava region in 2022–2024. The pre-sowing seed treatment and crops spraying were carried out with biological products based on mycorrhizal fungi, rhizosphere and nitrogen-fixing bacteria, and phytohormones. The dynamics of abscisic acid, relative water content in leaves, stomatal conductance, proline and malondialdehyde concentrations were studied at using biological products and their mixtures, and their connection with crop yield was shown. It has been established that the use of biological products contributed to a decrease in the abscisic acid content by 8–34 %, which indicates a reduction in stress on plants; an increase in the relative water content by 10–28 %, which ensures optimal water status of cells; an improvement in stomatal conductivity by 19–65 % by optimizing stomatal opening to support photosynthesis and control water loss, a decrease in the malondialdehyde concentration by 22–48 %, which indicates the effective protection of cell membranes from oxidative stress, and ultimately leads to the yield increase by 13–47 %. It has been proven that under water stress conditions, treatment with biological preparations modulates the biosynthesis of abscisic acid and optimizes its regulatory function, which is manifested in coordinated changes in osmoprotective mechanisms, antioxidant defense, and water regime of plants. The triple combination of biological products had the most effective impact on physiological and biochemical adaptation indicators, ensuring a balance between phytohormonal regulation, water regime, antioxidant protection, and soybean crop productivity under conditions of hydrothermal stress.

Key words: proline, malondialdehyde, relative water content, stomatal conductance, crop yield.



Copyright: Чайка Т.О., Короткова І.В. © 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.

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

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

