



УДК 633.34:635.655:631.89

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.17.2026.23>

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ КРЕМНІЄВМІСНИХ МІКРОДОБРИВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СТРЕСОСТІЙКОСТІ СОЇ

Я. Г. Цицюра¹, Б. О. Кирилюк²

Представлено результати двохрічного циклу вивчення застосування кремнієвмісних мікродобрих у формі листкового підживлення на показники загальної стресостійкості рослин сої шляхом індикації цього процесу через показники індукції флуоресценції хлорофілу, динаміки вологовіддачі, тепловізаційного градієнту температури та результуючого показника урожайності. Застосовано інноваційні підходи із залученням мобільного флуорометра, теплової зорної камери та динамічних лабораторних методів щодо оцінки посухостійкості рослин на основі визначення вологовіддачі їх листків у інтервалі до 5 доби обліку у співставленні до контролю. Як варіанти було застосовано 3 види кремнієвмісних мікродобрих різного виробництва поширених на ринку України та рекомендованих до застосування на сої Chelatin Silicon – KORMIN Silicon Humate – Quantum AquaSil відповідно у три варіанти феностадійного застосування – у фазу гілкування, фазу бутонізації та за поєднання даних строків внесення. Відмічено за використання кремнієвих мікродобрих зростання водного потенціалу листя в інтервалі 16,1–20,2%, зниження загальної стресовості росту в інтервалі 9,3–13,2%, зростання загального індексу життєздатності рослин в інтервалі 19,8–26,2%. Визначено максимальні прирости урожайності сої за використання в підживлення Квантум АкваСил: у фенологічну фазу галуження 4,9%, фазу бутонізації 10,1% та в обидві фази 17,9%. Сформовано ранжирований ряд застосованих кремнієвмісних мікродобрих за порядком зростання позитивного їх впливу на стресостійкість у такому вигляді: Хелатин Кремній – КОРМІН Кремнієвий (Гумат) – Квантум АкваСил.

Ключові слова: соя, біофортифікація, стресостійкість, індукція флуоресценції хлорофілу, вологовіддача, тепловізорна оцінка, урожайність.

¹ кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри землеробства, ґрунтознавства та агрохімії
(Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця)
e-mail: yaroslavtsyura@ukr.net
ORCID: 0000-0002-9167-833X

² студент кафедри землеробства, ґрунтознавства та агрохімії
(Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця)
e-mail: bohthankiriliuk12@gmail.com
ORCID: 0009-0003-0110-3992

EFFICIENCY OF SILICON-BASED MICRONUTRIENT FERTILIZERS FOR IMPROVING SOYBEAN STRESS TOLERANCE

Y. G. Tsytsiura, B. O. Kyryliuk

The results of a two-year study on the application of silicon-containing micronutrient fertilizers as foliar feeding to improve the overall stress resistance of plants are presented. Innovative approaches were applied using a portable fluorometer, a thermal imaging camera, and dynamic laboratory methods for evaluating plant drought resistance based on leaf moisture loss over a period of up to five days of observation, compared with the control. Three types of silicon-containing micronutrient fertilizers from different manufacturers, widely available on the Ukrainian market and recommended for soybean cultivation – Chelatin Silicon, KORMIN Silicon (Humate), and Quantum AquaSil – were tested under three application regimes: at the branching stage, the budding stage, and a combination of both application timings. The use of silicon-containing micronutrient fertilizers resulted in an increase in leaf water potential by 16.1–20.2%, a reduction in overall growth stress by 9.3–13.2%, and an increase in the overall plant vitality index by 19.8–26.2%. The highest soybean yield increments were obtained with the application of Quantum AquaSil as a foliar treatment: 4.9% at the branching stage, 10.1% at the budding stage, and 17.9% when applied at both stages.

A ranking of the applied silicon-containing micronutrient fertilizers, in order of increasing positive effect on stress resistance, was established as follows: Chelatin Silicon – KORMIN Silicon (Humate) – Quantum AquaSil.

Key words: soybean, biofortification, stress resistance, chlorophyll fluorescence induction, moisture loss, thermal imaging assessment, yield.

Вступ

Сучасні світові тенденції у формуванні продовольчої безпеки світу ставлять виклики до обсягів виробництва певного виду продукції, що зумовлює необхідність постійному нарощуванні обсягів виробництва. Така динаміка з врахуванням кліматичних змін, тенденції до глобального потепління зумовлюють необхідність у забезпеченні адаптивності рослин, тобто їх стресостійкості (Deepak et al., 2023). Соя відноситься до культур з широким спектром генотипової адаптивності від-селектованої відповідно до груп стиглості сортів. Проте кліматичні ризики, які складаються в останні періоди за рахунок тривалих періодів дефіциту зволоження, особливо в весняний та ранньолітній періоди елімінує продуктивність сучасних генотипів та рівень їх урожайності (Jianing et al., 2022). Окреслені агротехнологічні ризики зумовлюють необхідність і застосуванні ефективних важелів регулювання стресостійкості рослин сої (Chennakesavulu et al., 2021).

Одним із таких важелів за висновками багатьох досліджень є використання халатних форм мікроелементів у формі біофортифікації (Cohen et al., 2021). При цьому актуальним залишаються питання строків такого застосування з огляду на відповідні феностадійні критичні періоди сої (Hatfield & Dold, 2019).

Разом із тим, з огляду на загальне зростання абіотичних і біотичних ризиків, що впливають на реалізацію біопродуктивного потенціалу рослин, система біофортифікації забезпечує стабу врожайності за збереження високої адаптивності та стресостійкості сортів та гібридів (Agyenim-Boateng et al., 2023; Zapletalová et al., 2025). Розроблені регуляторні рішення щодо оптимізації регіональних систем удобрення культур на основі біофортифікації суттєво поглиблюють розуміння фізіолого-біохімічних механізмів стійкості рослин до стресових чинників (Genc et al., 2005; Thavarajah et al., 2008; Ducsay et al., 2021; Korobko et al., 2024).

При цьому термін «біофортифікація» розглядається у контексті двох підходів: селективного з генетичною системою рекомбінацій та агротехнологічний за рахунок використання системи удобрення (Dai et al., 2020; Agyenim-Boateng et al., 2023; Mrština et al., 2024). Завдання біофортифікації з огляду на сучасне бачення (Makdoh et al., 2025): формування передумов до підвищення стресостійкості рослин за рахунок формування якісної структури мікроелементного балансу, який визначає основи стресової адаптивності клітин та рослинного організму в цілому. У цьому плані агромічна біофортифікація передбачає можливість застосування відповідних агрохімікатів за вирощування сої за їх ґрунтового внесення,

передпосівної обробки насіння та позакореневих підживлень (Zapletalová et al., 2025). Загальний позитивізм антистресової біофортифікації базується на: формуванні передумов збалансованого живлення та у підсумку передумов до оптимізованої фізіологічної реакції на стресові фактори (Agyenim-Boateng et al., 2023); доцільній інтеграції ґрунтового та листкового живлення рослин у критичні феностадії росту рослин з позиції чутливої реакції на індуковані стреси (Abd El-Aal et al., 2018; Han et al., 2024).

У плані найбільш поширених практик біофортифікації за вирощування сої є система позакореневих підживлень, що дозволяє істотно підвищити процеси депонування необхідних мікроелементів у відповідних частинах рослини (Bouis & Welch, 2010; Choudhary et al., 2014; Agyenim-Boateng et al., 2023; Cuesta et al., 2023; Zapletalová et al., 2025). Наголошується також, що у технології вирощування сої, біофортифікація окремими мікроелементами як бор, селен, кремній, магній сприяють не лише істотному поліпшенню продовольчої цінності врожаю, але й забезпечують підвищення посухостійкості, жаростійкості, стійкості до низьких температур (Hansch & Mendel, 2010; Agyenim-Boateng et al., 2023).

Дослідження, проведені в європейських країнах, свідчать про те, що кремній у зернобобових посилює стійкість стеблостою до вилягання, підвищує резистентність рослин до посухи та їхню біологічну продуктивність (Jumrani & Bhatia, 2019; Agyenim-Boateng et al., 2023; Kumar et al., 2025; Manimaran et al., 2025; Wadas & Kondraciuk, 2025). Відмічається, що кремній у формі активного хелатного компонента формує передумови для гармонізації функціонування дихальних і транспіраційних систем з позиції економного використання вологи, зниження інтенсивності її балансу за тривалого стану посушливості (Zargar et al., 2019; Katam et al., 2020; Verma et al., 2024; Wang et al., 2025).

З огляду на висвітлені вище аргументи та узагальнення – дослідження ефективності застосування комплексу хелатних мікродобрив, які декларуються як можливі біофортифікатори у технологіях вирощування сої є актуальною метою з кінцевою ціллю не лише істотної стабілізації та зростання урожайності культури, але й розробки адаптивних технологій її вирощування, які мають стійкі риси адаптивності та гнучкої стресостійкості.

Матеріал і методи

Дослідження охоплювали період 2024–2025 рр. та проводились на дослідному полі Вінницького національного аграрного університету (N 49°11'31", E 28°22'16") на сірих лісових ґрунтах. За агрохімічним складом ґрунтовий покрив мав середній потенціал ґрунтової родючості з такими показниками: вміст гумусу: 2,68%, легкогідролізованого азоту 84, рухомого фосфору 149, обмінного калію 107 мг/кг ґрунту при $pH_{\text{ккл}}$ 5,8.

У дослідженнях було використано сорт сої Титан. *Титан*. Сорт внесений в державний реєстр в 2020 році. Тривалість періоду вегетації складає 112–123 діб. Висота рослини 66,7–80,6 см. Стійкість до вилягання 8–9 балів. Стійкість до обсіпання 7–9 балів. Стійкість до посухи 7–8 балів. Стійкість проти основних хвороб 7–9 балів. Вміст білка 37,7–42,3%. Вміст олії 20,9–23,5%. Урожайність в зональному сортовипробуванні 2,95–3,37 т/га.

Сою висівали у першій декаді травня, кількісною нормою 550–600 тис схожих насінин на га з міжряддям 45 см. Схема польового блоку представлена в табл. 1. Загальна площа дослідної ділянки 36 м², облікової 27 м² за 4-х разової повторності.

Квантум АкваСил – комплексне хелатне кремнієве мікродобриво для листового підживлення. Містить спеціальну формуляцію кремнію та калію та гумінові сполуки для кращого засвоєння. Склад: SiO₂ 20% (200 г/л) та K₂O 10% (100 г/л), гумінові речовини. Густина 1,20–1,25 кг/л.

Хелатин Кремній – мікродобриво з хелатним кремнієм. Склад: SiO₂ 10% (100 г/л) та K₂O 11,5% (115 г/л), гумінові сполуки (до 2,0%). Густина 1,14–1,18 кг/л, pH 11,5.

КОРМІН Кремнієвий (Гумат) – органо-мінеральне кремнієво-калійне добриво. Склад: калій (K₂O) 8,9%, кремній (SiO₂) 14,0%, гумінові та фульвові кислоти 5,5%, pH 12,0–12,5, густина 1,14–1,18 г/см³.

Всі елементи вирощування сої були однотиповими в усіх варіантах досліду за виключенням факторів поставлених на вивчення. Облік урожайності сої було проведено відповідно до загальноприйнятої методики для зернобобових (Кобизева та ін., 2016).

Фізіологічну антистресову ефективність застосованих кремнієвих мікродобрив досліджували застосовуючи широкоапробовану методику аналізу кривої індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ) за використання вітчизняного портативного флуоро-

Таблиця 1

Загальна схема дослідження ефективності антистресової біофортифікації сої сорту Титан за рахунок використання лінійки мікродобрив, 2024–2025 рр. (за фонового мінерального живлення $N_{30}P_{45}K_{45}$)

Фаза внесення (чинник А)	Мікродобрива застосовані у системі біофортифікації (чинник В)
A ₁ Початок галушення (ВВСН 21–23)	B ₁ Контроль (обробка водою)
A ₂ Бутонізація (ВВСН 50–52)	B ₂ Квантум АкваСил (1 л/га)
A ₃ Початок галушення (ВВСН 21–23) + Бутонізація (ВВСН 50–52)	B ₃ Хелатин Кремній (1 л/га)
	B ₄ КОРМІН Кремнієвий (Гумат) (1 л/га)

метра Флоратест (Romanov et al., 2011) (рис. 1) відповідно до європейських стандартизованих протоколів визначення (Brestic & Zivcak, 2013; Kalaji et al., 2017) та адаптовану методику (Цицюра & Томчук, 2023) застосовуючи індикативні формули калькуляції похідних показників (табл. 2).

Оцінку стресостійкості було проведено також за показником швидкості вологовіддачі листя активного фізіологічного ярусу рослин (Григорчук та ін., 2017), а також у дослідженнях було використано тепловізорне дослідження посівів на 10 добу після застосування мікродобрив за використання тепловізора НТ-А2.

Статистична обробка результатів передбачала використання дисперсійного багатofакторного аналізу, відповідно до факторної системи досліду (Wong, 2018).

Результати

Враховуючи антистресову оцінку біофортифікації слід коротко оцінити власне рівень стресовості вегетаційного періоду сої за вказаний інтервал досліджень та оцінок. Результати такої оцінки представлено на рис. 2.

За результатами оцінки гідротермічного режиму періоду вегетації сортів сої рік 2024 оцінено як помірно стресовий з коефіцієнтом варіації (C_v) для кількості опадів 29,7%, а для середньодобової температури 32,8%. Умови 2025 року оцінено як стресові де аналогічні показники були на рівні 52,3% та 40,8% відповідно. В цілому за період вегетації вивчаємих сортів сої у 2024 році сума опадів склаала за період вегетації 445,6 мм за середньодобової температури за період 19,48 °С.

У 2025 році дані показники були на рівні 337,4 мм та 14,24 °С. У підсумку гідротермічні умови були в цілому відносно сприятливими для росту і розвитку рослин сої за вираженого рівня стресовості у період другої декади липня – другої декади серпня в обидва роки оцінки. Критичним був також режим аномально високих температур у другій декаді серпня у 2024 році та аномально прохолодного періоду квітня – другої декади травня у 2025 році.

Результати індикативної оцінки застосованих кремнієвих мікродобрив (як заявлений згідно робочої гіпотези досліджень

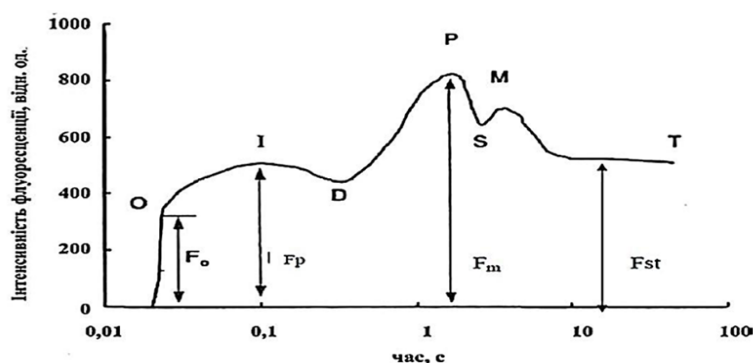


Рис. 1. Типологічна крива індукції флуоресценції хлорофілу та її базові параметри:

F_0 – початкове значення індукції флуоресценції; F_p (або F_{pl}) – зона «плато»;

F_m – максимальний рівень індукції; F_{st} – стаціонарне значення індукції.

Позиція справа – прилад Флоратест (Kalaji et al., 2017; Цицюра & Томчук, 2023)

Основні показники аналізу кривої індукції флуоресценції хлорофілу
(Цицюра & Томчук, 2023)

Прямі та похідні індекси на основі ключових параметрів кривої ІФХ	Спосіб калькуляції*
Зростання флуоресценції	$dF_{pl} = F_{pl} - F_0$
Максимальна змінна флуоресценції	$F_v = F_m - F_0$
Індекс впливу екзогенних та ендогенних факторів	$\frac{dF_{pl}}{F_v}$
Фотохімічна (квантова) ефективність (EP)	$EP = \frac{F_v}{F_m}$
Фотохімічне гасіння (Q_{ue})	$Q_{ue} = \frac{F_0}{F_v}$
Водний потенціал листка (L_{wp})	$L_{wp} = \frac{F_m}{F_0}$
Індекс життєздатності рослин (RF_d)	$RF_d = \frac{F_m - F_{st}}{F_{st}}$
Індикатор ендогенних (стресових) факторів (K_{ef})	$K_{ef} = \frac{F_{st}}{F_m}$
Величина фотохімічного гасіння флуоресценції (QP)	$QP = \frac{F_m - F_{st}}{F_m - F_0}$
Індекс ефективності первинних реакцій фотосинтезу (K_{pp})	$K_{pp} = \frac{F_v}{F_0}$
Коефіцієнт згасання флуоресценції (K_{fd})	$K_{fd} = \frac{F_m}{F_{st}}$
Відносна зміна флуоресценції в момент часу t (V_t)	$V_t = \frac{F_{st} - F_0}{F_m - F_0}$

*У формулах відповідні параметри кривої ІФХ (F_0 , F_{pl} , F_m , F_{st} (рис. 1))

мікроелемент, який виступає як біофортіфікатор підвищення стресостійкості рослин сої) підтвердили припущення про його вплив на діяльність фотосистеми рослин сої обох сортів (табл. 2, рис. 3). За результатами застосування індикативного інструменту індукції флуоресценції хлорофілу визначено що використання кремнієвмісних мікродобрив за вирощування сої у формі листового живлення у всіх застосованих варіантах досліду змінює ефективність функціонування фотосистеми рослин. При цьому вплив різних добрив мав істотні відмінності. У випадку застосування Квантум АкваСил усереднено по фенологічній періодизації його застосування у співставленні до контролю відмічено зростання показника початкової флуоресценції F_0 на 10,7 відносних одиниць еталона флуоресценції хлорофілу, флуоресценції зони плато F_{pl} на 37,3 одиниці, максимальної флуоресценції (F_m) на 265,3 одиниці а стаціонар-

ної флуоресценції (F_{st}) на 17,3 одиниці. Для варіанту застосування Хелатин Кремній зростання відмічено для параметрів F_0 , F_{pl} та F_m у значенні 5,3, 42,7 та 85,3 одиниць відповідно за зниження параметру F_{st} на 16 одиниць.

При застосуванні мікродобрива КОРМІН Кремнієвий (Гумат) відмічено специфічно відмінну реакцію фото системи рослин за зменшення параметрів F_0 , F_{pl} та F_{st} відповідно 10,7, 16 та 5,3 одиниці на фоні істотно збільшення параметру максимальної флуоресценції (F_m) на 138,7 одиниці. Такий характер позитивно співвідноситься з графіками індукції флуоресценції хлорофілу (рис. 3) та формує різну площу графіка над віссю абсцис, що, відповідно, формує різну інтенсивність та адаптивну пристосованість фотосистеми рослин у формі реакції на біофортіфікацією кремнієм за листового живлення за різних варіантів його застосування.

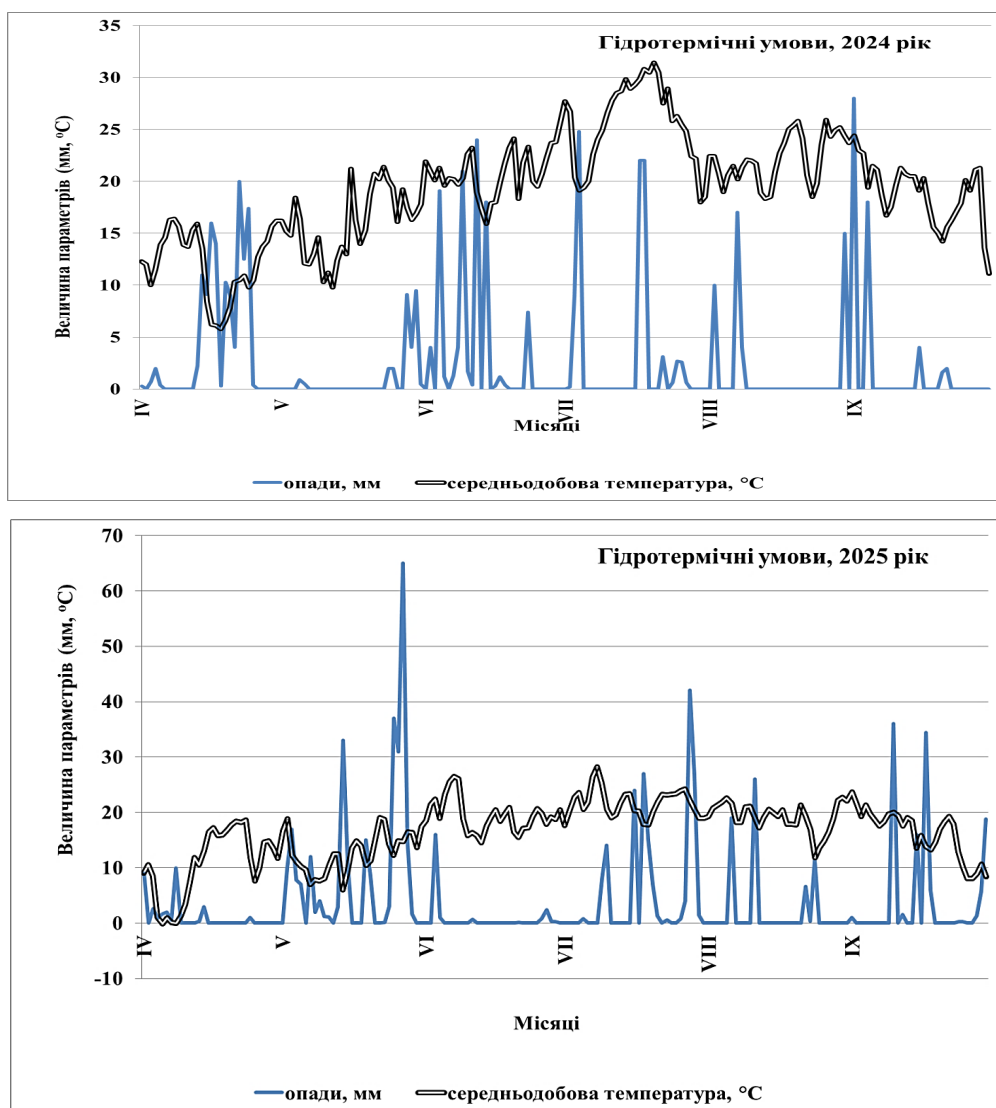


Рис. 2. Гідротермічні умови періоду вегетації сортів сої, 2024–2025 рр. (за даними датчиково-логерної метеостанції (WMO_ID=33562) (49°14'60" пн. ш. 28°31'60" сх. д. на висоті 295 метрів над рівнем моря)

Таблиця 2

Індикативний аналіз кривої індукції флуоресценції хлорофілу у сої сорту Титан залежно від варіантів підживлення, відносних одиниць еталона флуоресценції хлорофілу (середнє за 2024–2025 рр.) *

Фаза внесення (В)	Варіант підживлення (С)	F_0	F_{pl}	F_m	F_{st}	dF_{pl}	F_v	dF_{pl}/F_v	EP
В ₁	С ₁	208	400	1040	432	192	832	0,231	0,800
	С ₂	176	352	1296	512	176	1120	0,157	0,864
	С ₃	224	448	1152	384	224	928	0,241	0,806
	С ₄	208	400	1216	448	192	1008	0,190	0,829

Продовження таблиці 2

B ₂	C ₁	272	512	1440	480	240	1168	0,205	0,811
	C ₂	320	608	1584	480	288	1264	0,228	0,798
	C ₃	240	448	1456	512	208	1216	0,171	0,835
	C ₄	240	432	1584	512	192	1344	0,143	0,848
B ₃	C ₁	256	464	1440	528	208	1184	0,176	0,822
	C ₂	272	528	1836	500	256	1564	0,164	0,852
	C ₃	288	608	1568	496	320	1280	0,250	0,816
	C ₄	256	496	1536	464	240	1280	0,188	0,833
B	C	L _{wp}	Q _{ue}	RF _d	K _{ef}	QP	K _{прп}	K _{fd}	V _t
B ₁	C ₁	5,00	0,250	1,407	0,415	0,731	4,000	2,407	0,269
	C ₂	7,36	0,157	1,531	0,395	0,700	6,364	2,531	0,300
	C ₃	5,14	0,241	2,000	0,333	0,828	4,143	3,000	0,172
	C ₄	5,85	0,206	1,714	0,368	0,762	4,846	2,714	0,238
B ₂	C ₁	5,29	0,233	2,000	0,333	0,822	4,294	3,000	0,178
	C ₂	4,95	0,253	2,300	0,303	0,873	3,950	3,300	0,127
	C ₃	6,07	0,197	1,844	0,352	0,776	5,067	2,844	0,224
	C ₄	6,60	0,179	2,094	0,323	0,798	5,600	3,094	0,202
B ₃	C ₁	5,63	0,216	1,727	0,367	0,770	4,625	2,727	0,230
	C ₂	6,75	0,174	2,672	0,272	0,854	5,750	3,672	0,146
	C ₃	5,44	0,225	2,161	0,316	0,838	4,444	3,161	0,163
	C ₄	6,00	0,200	2,310	0,302	0,838	5,000	3,310	0,163
HIP ₀₅ **F ₀		A 5,21; B 4,24; C 4,24; AB 7,32; AC 7,32; BC 6,15; ABC 10,55							
F _{pl}		A 5,12; B 4,12; C 4,12; AB 7,15; AC 7,15; BC 5,81; ABC 10,12							
F _m		A 9,68; B 7,91; C 7,91; AB 13,75; AC 13,75; BC 11,23; ABC 14,52							
F _{st}		A 3,52; B 2,88; C 2,88; AB 4,98; AC 4,98; BC 4,07; ABC 7,15							

*Примітка. А – чинник умов року. Розшифровка індексів варіантів у таблиці 1.

Це підтверджується поступовим та сталим зростанням показника максимальної змінної флуоресценції (F_v) та показника фотохімічної ефективності (EP) фотосинтеми рослин за варіанту внесення мікродобрив у дві фенофази з приростом на рівні 3,5–4,8% у абсолютному значенні даних параметрів у співставленні до одинарного застосування мікродобрив у фазу галушення та бутонізації. У підсумку визначена динаміка вплинула позитивно і на характер адаптивних реакцій асиміляційної фотосинтеми рослин.

Так встановлено, що водний потенціал листків рослин (L_{wp}), який визначає в цілому рівень посухостійкості рослин у середньому прирістному виразі по застосованих феностадіях зріс на 20,2% при застосуванні Квантум АкваСил, на 16,1% при застосуванні КОРМІН Кремнієвий (Гумат) та на 4,7% у варіанті внесення Хелатин Кремній. Такі результати позитивно корелюють з концентрацією кремнію у застосованому добриві.

Слід відмітити з позиції біофортифікаційної ефективності кремнієм і приріст

показника індексу життєздатності рослин сої (RF_d) з максимальною позитивною прирістною динамікою у середньому по застосованих мікродобривах за внесення у фазу галушення та поєданого внесення у фазу галушення та бутонізації у значенні 24,3% та 37,9% до контролю. Це узгоджується з рівнем зниження стресовості функціонування рослин за показником індикатора ендогенних (стресових) факторів (K_{ef}) який у результаті усередненні по всіх застосованих строках внесення вивчаємих мікродобрив мав понижуючі коефіцієнтні значення у співставленні до контролю у значенні 0,868 при застосуванні Квантум АкваСил, 0,907 при застосуванні Хелатин Кремній та 0,893 у варіанті внесення КОРМІН Кремнієвий (Гумат). За рахунок такої динаміки індекс ефективності первинних реакцій фотосинтезу (K_{прп}) за тієї ж системи співставлення мав відносні показники приросту у значенні 25,1% за внесення Квантум АкваСил, 5,9% за внесення Хелатин Кремній та 19,9% за внесення КОРМІН Кремнієвий (Гумат).

Відмічене зростання стресостійкості рослин також підтверджено у дослідженнях

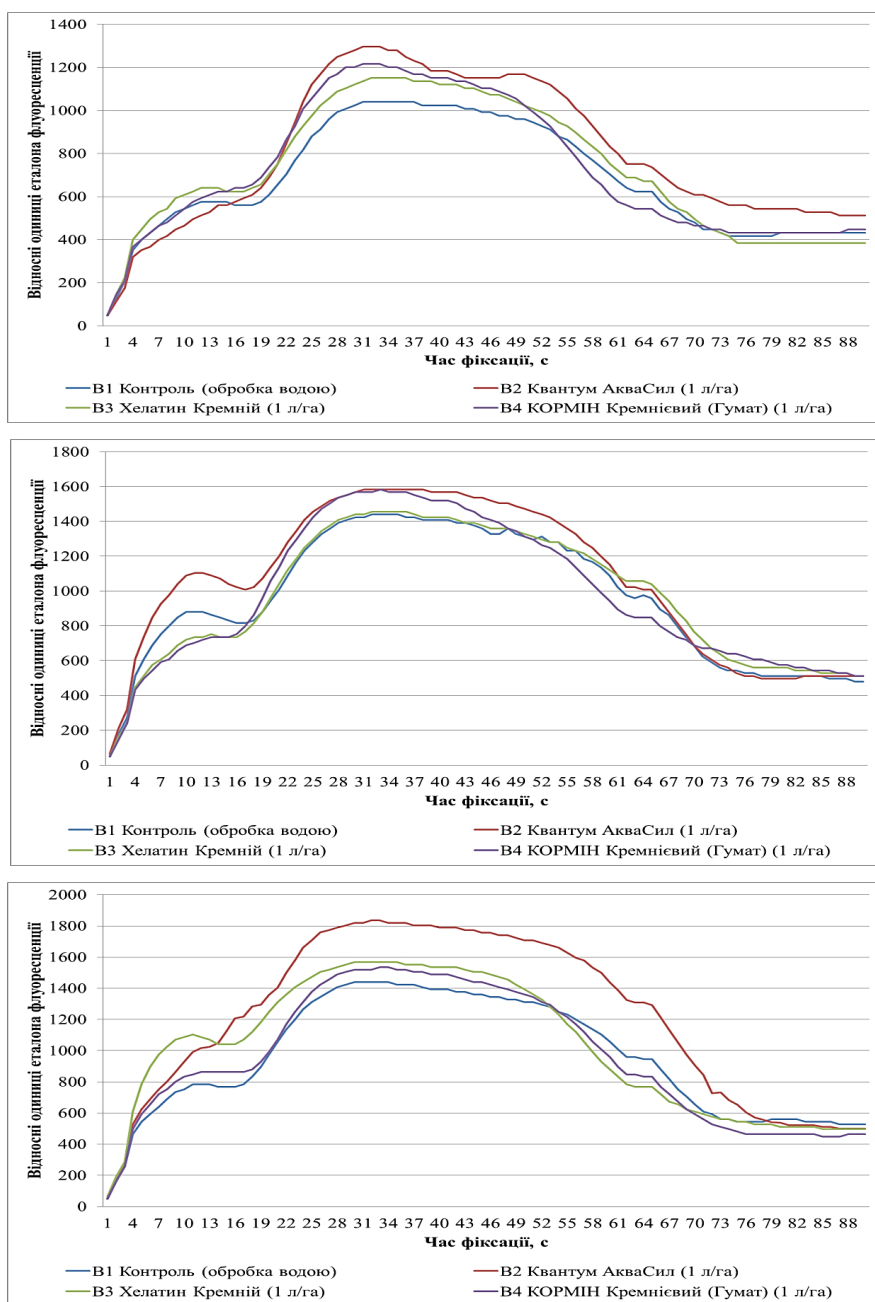


Рис. 3. Крива індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ) у сорту сої Титан залежно від застосованих варіантів досліду (крива на основі середньобагаторічних показників за 2024–2025 рр. у відносних одиницях еталона флуоресценції). Верхня позиція – початок галушення (BBCH 21–23), середня – бутонізація (BBCH 50–52), нижня – поєднання двох фаз внесення

параметрами коефіцієнт згасання флуоресценції (K_{fd}) та відносною зміною флуоресценції в момент часу t (V_t). Усереднене по варіантах застосування мікродобрив зростання першого показника в інтервалі 11,8–16,6% за зменшення другого в інтервалі 9,1–17,9% формує позитивні передумови для інтенсифікації первинних реакцій фотосинтезу в часі та створення адаптивного пристосу-

вання до інтенсифікації хронометражного гасіння вторинних фотохімічних реакцій фотосистеми рослин.

Слід зауважити, що на підставі представлених оцінок варіант застосування Квантум АкваСил був для всіх строків листового підживлення істотно більш ефективним, а самі вивчаємі мікродобрива можна розмістити у такий ранжований ряд по зрос-

танню ефективності біофортифікації стресостійкості з позиції функціонування та адаптації фотоситеми рослин сої: Хелатин Кремній – КОРМІН Кремнієвий (Гумат) – Квантум АкваСил. Вказані висновки було підтверджено застосуванням методу оцінки посухостійкості рослин за динамікою вологовіддачі листя (табл. 3).

Отримані результати такої оцінки засвідчили вплив застосованих мікродобрив на динаміку вологовіддачі листків сої, що підтверджує попередньо зроблені висновки щодо оптимізацію параметрів посухостійкості рослин за варіантів біофортифікації кремнієвмісними мікродобривами. Так, при застосуванні мікродобрив на фазу галузнення відмічено зниження вологовтрат листя на 1 та 2 добу оцінки на 11,1–14,3% відповідно за внесення Квантум АкваСил, 2,7–4,4% за внесення Хелатин Кремній та 6,7–10,8% за внесення КОРМІН Кремнієвий (Гумат). За внесення мікродобрив у фазу бутонізації аналогічні цифри становили інтервали зниження 5,9%–9,3%, 0,6–3,0% та 5–7%, відповідно. Максимальна редукція відмічена за бінарного внесення мікродобрив у значенні 5,7–12,0% для варіанту добрива Квантум АкваСил, 2,8–4,5% за внесення Хелатин кремній, 5,1–9,0% за

внесення КОРМІН Кремнієвий (Гумат). При цьому, динаміка вологовіддачі була зміщена на 4–5 добу аналізу з приростами відносного показника втрат вологи на рівні 6,7–10,4% залежно від мікродобрива. Такий характер зміщення вказує на позитивний вплив застосованих мікродобрив на індикацію посухостійкості рослин, оскільки листковий апарат рослин є першим рубежем ефективності стрес-реакцій та адаптивних механізмів пристосування рослин до екстремальних умов посушливості та тривалості дії такого стресу. Враховуючи, що максимальне зміщення було відмічено у варіанті внесення саме Квантум АкваСил за бінарного застосування у дві визначені феностадії росту і розвитку сої, саме даний варіант мав найбільш істотний вплив на зміну темпів водорегуляції і водного балансу листкового апарату.

Позитивний вплив застосованих мікродобрив було підтверджено і тепловізійним дослідженням агроценозів відповідних варіантів сої (рис. 4) у поліспектрі зйомки.

Зокрема, інтенсивність температурного балансу рослин сої на дату максимальної сонячної активності у період максимальних середньодобових температур індукованих за їх наростанням та тривалості експліка-

Таблиця 3

Динаміка інтенсивності вологовіддачі листків сої сорту Титан зібраних через 10 діб після варіантів біофортифікації кремнієвмісними мікродобривами, середнє за 2024–2025 рр., %

Фаза внесення (чинник А)	Мікродобрива застосовані у системі біофортифікації (чинник В)	Втрати вологи листям на відповідну добу після відбору, %				
		1	2	3	4	5
А ₁ Початок галузнення (ВВСН 21–23)	В ₁ Контроль	35,9±2,9	40,2±2,6	15,8±1,9	6,3±2,1	1,8±0,9
	В ₂ Квантум АкваСил	24,8 ± 2,1	25,9±3,2	28,5±2,1	11,9±1,5	8,9±1,1
	В ₃ Хелатин Кремній	33,2±3,8	35,8±3,5	17,9±2,3	8,2±2,1	4,9±2,0
	В ₄ КОРМІН Кремнієвий (Гумат)	29,2 ± 4,1	29,4 ± 2,1	30,1 ± 2,5	7,5 ± 2,4	3,8 ± 1,9
А ₂ Бутонізація (ВВСН 50–52)	В ₁ Контроль	37,5±3,7	33,4±2,9	20,2±2,8	7,1±2,8	1,8±1,5
	В ₂ Квантум АкваСил	28,2±4,1	27,5±3,8	21,4±3,7	16,8±2,2	6,1±1,8
	В ₃ Хелатин Кремній	34,5±3,5	32,8±3,4	21,9±2,5	7,3±2,5	3,5±1,1
	В ₄ КОРМІН Кремнієвий (Гумат)	30,5 ± 2,8	28,4 ± 3,2	21,2 ± 2,1	14,2 ± 1,5	5,7 ± 0,9
А ₃ Початок галузнення (ВВСН 21–23) + Бутонізація (ВВСН 50–52)	В ₁ Контроль	36,3 ± 2,7	32,5 ± 2,3	21,7 ± 2,4	7,5 ± 1,2	2,0 ± 1,5
	В ₂ Квантум АкваСил	24,3 ± 3,1	26,8 ± 2,9	22,7 ± 2,5	17,9 ± 2,2	8,3 ± 1,9
	В ₃ Хелатин Кремній	31,8±3,7	29,7±2,4	20,6±3,1	10,9±2,5	7,0±1,4
	В ₄ КОРМІН Кремнієвий (Гумат)	27,3 ± 2,3	27,4 ± 2,7	23,3 ± 2,1	15,8 ± 1,9	6,2 ± 1,5

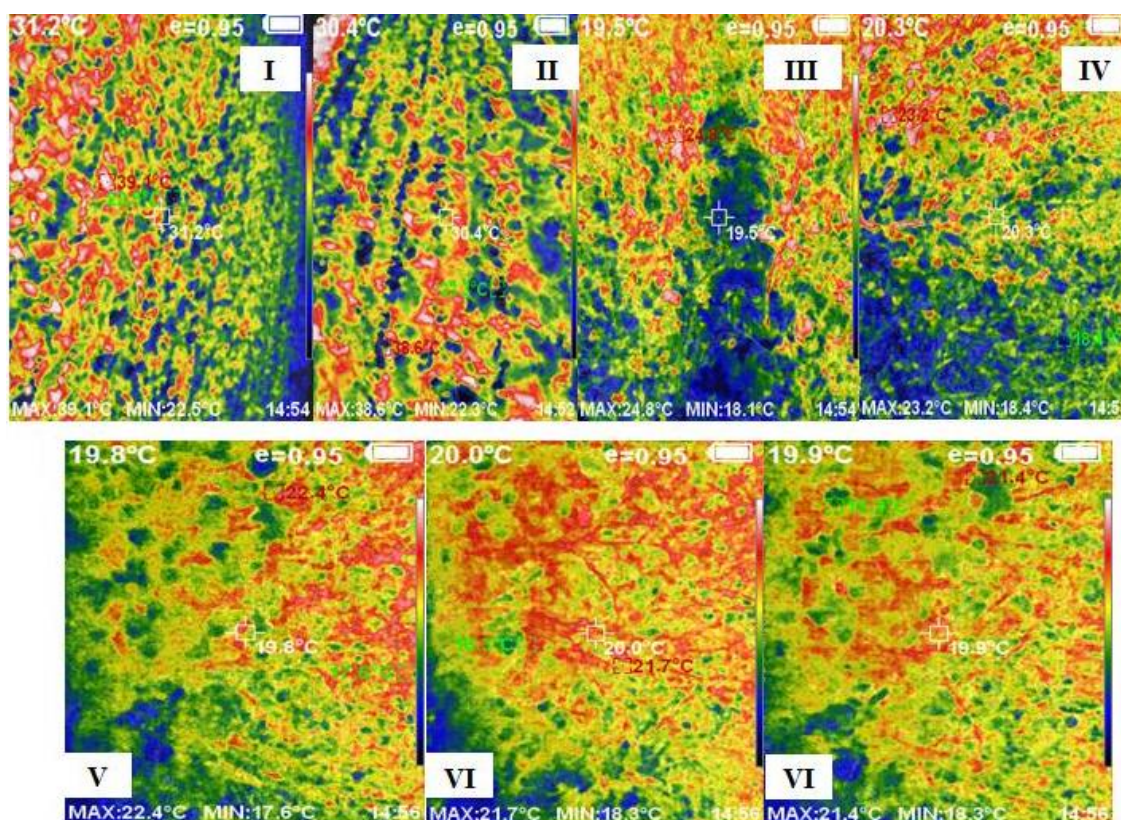


Рис. 4. Тепловізійна індикація посіву сої сорту Титан за різних варіантів застосування кремнієвмісних добрив за бінарного їх внесення (початок галушення (ВВСН 21–23) + бутонізація (ВВСН 50–52)) у пік денної температури повітря (I – Контроль; II – Квантум АкваСил; III – Хелатин Кремній; IV – КОРМІН Кремнієвий (Гумат); VI–VII – деталізація варіанту внесення Квантум АкваСил)), 2024 рік

ції. На підставі такого обстеження підтверджено істотні відмінності у середньому градієнті температурного прогрівання асиміляційної поверхні, враховуючи одно типовий час фіксації згідно індикативних даних теплові зорного обстеження.

У підсумку, оцінка такого підходу дозволила встановити, що усереднений градієнт температури асиміляційної поверхні сої у співставленні до контролю у середньому за період дослідження становив за внесення Квантум АкваСил становив зниження $-5,7$ °C, за внесення Хелатин Кремній – $-2,5$ °C та за внесення КОРМІН Кремнієвий (Гумат) – $-4,2$ °C.

Такі результати підтвердили наші попередні узагальнення щодо позитивної діє застосованих кремнієвмісних мікродобрив на оптимізацію теплового балансу рослин на фоні пікових денних температур та тривалості їх дії. В цьому плані особливо слід відмітити мікродобриво Квантум АкваСил. В цілому слід відмітити, що біофортифікація розглядається як надійний інноваційний

важель не лише формування кінцевого продукту відповідної якості, але й через призму надання рослині набутих позитивних адаптивних рис, з позиції пристосування до змінних чинників довкілля – зумовлює загальне зростання біопродуктивності рослин та реалізації їх урожайності (табл. 4).

Встановлено, що використання мікродобрив в усі фенологічні фази було ефективним. При цьому ефективність різних мікродобрив була істотно різною. Максимальні прирости у відносному виразі було відмічено за використання в підживлення Квантум АкваСил відповідно за внесення у фенологічну фазу галушення $4,9\%$, за внесення у фазу бутонізації $10,1\%$ та за внесення в обидві фази $17,9\%$. Другим по ефективності, як і у випадку показників оцінки стресостійкості було застосування мікродобрива КОРМІН Кремнієвий (Гумат) з аналогічними показниками приростів за застосування у ті ж фенофази $5,3\%$, $8,8\%$ та $16,4\%$ відповідно. Відповідно третю градаційну позицію займало мікродобриво

Таблиця 4

Урожайність сої сорту Титан залежно від варіантів біофортифікації кремнієвмісними мікродобривами, 2024–2025 рр., т/га

Фаза внесення (чинник А)	Мікродобрива застосовані у системі біофортифікації (чинник В)	2024	2025	Середнє	+/- до контролю
А ₁ Початок галушення (ВВСН 21–23)	В ₁ Контроль	2,58	2,44	2,51	–
	В ₂ Квантум АкваСил	2,72	2,56	2,64	0,13
	В ₃ Хелатин Кремній	2,63	2,52	2,58	0,07
	В ₄ КОРМІН Кремнієвий (Гумат)	2,69	2,61	2,65	0,14
А ₂ Бутонізація (ВВСН 50–52)	В ₁ Контроль	2,60	2,41	2,51	–
	В ₂ Квантум АкваСил	2,85	2,72	2,79	0,28
	В ₃ Хелатин Кремній	2,72	2,58	2,65	0,15
	В ₄ КОРМІН Кремнієвий (Гумат)	2,80	2,68	2,74	0,24
А ₃ Початок галушення (ВВСН 21–23) + Бутонізація (ВВСН 50–52)	В ₁ Контроль	2,60	2,49	2,55	–
	В ₂ Квантум АкваСил	3,17	3,03	3,10	0,56
	В ₃ Хелатин Кремній	3,02	2,85	2,94	0,39
	В ₄ КОРМІН Кремнієвий (Гумат)	3,12	2,97	3,05	0,50
НІР ₀₅ , т/га (Додаток 6)		0,12	0,10	–	–

Хелатин Кремній де прирістний ряд за внесення у згадувані фенофази складало ряд 2,7%, 5,7% та 13,3% відповідно. Отримані результати позитивно узгоджуються із отриманими оцінками функціонування фотосистеми рослин, водоутримуючої здатності листкового апарату та результатами тепло-візійної індикації посівів у досліді.

Обговорення

Відмічені особливості біофортифікаційної реакції рослин сої на хелатну форму кремнію, відповідає визначеним особливостям його ролі в формуванні адаптивних та захисних реакцій, зокрема на дефіцит вологи, інтенсивне наростання середньодобових температури, або ж навпаки холодний стрес (Agyenim-Boateng et al., 2023). У цьому плані, відмічається також, що фотосистема рослин першою реагує на такі стреси, а тому негативні зміни у первинних та вторинних реакціях фотосинтезу зумовлюють фізіологічні зміни у рослинному організмі, які у підсумку ведуть до зниження як адаптації, так і урожайності рослин (Chennakesavulu et al., 2021; Cohen et al., 2021). Це підтверджується встановленими змінами у базових показниках кривої індукції флуоресценції (ІФХ) у варіантах досліді у співставленні до контролю. Зокрема, визначено зростання у відносному виразі всіх ключових чинників кривої у варіантах застосування кремнієвмісних мікродобрів: початкового значення індукції флуоресценції (F_0)

на 12,5–18,9%; F_p (або F_{pl}) – флуоресценції зона «плато» на 15,6–20,9%, максимального рівня індукції флуоресценції (F_m) на фоні зниження стаціонарне значення індукції флуоресценції хлорофілу (F_{st}) на 8,7–12,9%. Це формує більшу ординатну площу графіка та вказує на загальну інтенсифікацію первинних фотохімічних перетворень, що забезпечує за загальними оцінками (Brestic & Zivcak, 2013) гнучку систему віддалених реакцій на стресове подразнення організму. У продовження цих висновків, спираючись на критерій максимальної індукції флуоресценції (F_m), який розглядається як головний індикатор впливу компонента технології на ефективність та інтенсивність асиміляції (Цицюра & Томчук, 2023) – комбіноване внесення мікродобрів у дві фенофази було найбільш ефективним та доцільним.

Відмічено, що такі зміни у базових критеріях кривої ІФХ забезпечують якісні зміни у важливих індикативних параметрах стану організму, зокрема таких як водний потенціал листка (L_{wp} , визначає стан тургору листкового апарату та потенційну стійкість до інтенсивної вологовіддачі при дефіциті зволоження (Kalaji et al., 2017)), індекс життєздатності рослин (RF_d , визначає потенційний рівень збереження активних фізіологічних функцій рослини за відповідної дії одинарних чи комбінованих стресів (Цицюра & Томчук, 2023)), індикатор ендогенних (стресових) факторів (K_{ef} ,

формує стійку індикацію рівня стресовості асиміляційної поверхні рослин (Brestic & Zivcak, 2013)), індекс ефективності первинних реакцій фотосинтезу ($K_{\text{пр}}$, сигналізує зміни у динаміці перебігу основних фотохімічних перетворень у процесі фотосинтезу з огляду на стан стресовості рослини в цілому (Romanov et al., 2011; Kalaji et al., 2017)). Визначені якісні зміни цих показників у напрямку оптимізації стану фотосистеми рослин у всіх варіантах досліду, а особливо у варіанті застосування добрива Квантум АкваСил свідчить про доцільність використання кремнієвмісних мікродобрив у варіанті листкового підживлення для біофортифікаційної корекції стресостійкості рослин сої. Це позитивно узгоджується з аналогічними оцінками реакції асиміляційної поверхні рослин інших видів за внесення різних варіантів як макро і мікродобрив, так і регуляторів росту, рістстимулюючих біологічних компонентів, пестицидів тощо (Mrština et al., 2024; Makdoh et al., 2025; Manimaran et al., 2025).

Відмічено, що кремній у халатній формі забезпечує позитивну регуляцію процесів транспірації та складових водного балансу листкового апарату рослин (Verma et al., 2024). Такий характер формує позитивний вплив як на зростання загальної оводненості тканин листка у формі тургорного показника та у формі вільної вологи (Wadas & Kondraciuk, 2025). Разом із зростанням оводненості тканин знижуються і зворотні процеси вологовіддачі листка, сповільнюються темпи його висихання (Wang et al., 2025). Вказані результати узгоджуються із оцінкою динаміки вологовіддачі листків сої зі зміщенням інтенсивності темпів висихання на 2–3 доби у порівнянні з варіантом без застосування кремнієвмісних мікродобрив. За рахунок окреслених процесів середньодобові втрати вологи на варіантах застосування мікродобрив було істотно нижчими ніж на контролі, зокрема на контролі даний показник становив у усереднено по строках застосування мікродобрив на контролі 6,94% /добу, при застосуванні Квантум АкваСил 3,60 %/добу, Хелатин Кремній 5,61 %/добу та КОРМІН Кремнієвий (Гумат) 4,75%/добу.

Результати тепловізійного обстеження посівів сої після певного періоду застосування досліджуваних мікродобрив, також підтверджено і в інших оцінках (Hatfield & Dold, 2019) де радіаційний баланс агроценозу певної культури виступає загальним

індикатором фізіологічного стану рослини через призму вмісту води, тургорного та осмотичного тиску, активних процесів водного транспорту та динаміки транспірації. При цьому, рослини з кращою адаптивністю у пікові літні температури демонструють меншу амплітуду теплового балансу тканин та, відповідно, більш «холодний» спектр у тепловізійному знімку (Григорчук та ін., 2017; Cohen et al., 2021; Deepak et al., 2023). З огляду на ці дослідження і було проведено ідентифікацію кращого варіанту застосування кремнієвмісного мікродобрива та проведено оцінку градації впливу варіантів вивчаємих добрив на оптимальність стану агроценозу на одну й туж дату фіксації.

Багатьма дослідженнями підтверджено також загальний результируючий позитивний вплив мікродобрив з кремнієм на формування урожайності ряду культур в тому числі і сої (Choudhary et al., 2014; Abd El-Aal et al., 2018; Chennakesavulu et al., 2021). Такий результат було пояснено з позиції впливу такого виду добрив саме на оптимізації фізіологічних систем рослинного організму на фоні різних та мінливих чинників довкілля як фонового стрес-середовища (Dai et al., 2020). При цьому, прирістна система урожайності від таких варіантів листкового живлення мала досить широкий інтервал значень від 5,5% до 30,9% (Ducsay et al., 2021; Deepak et al., 2023), що цілком узгоджується з позитивними результатами у наших кращих варіантах досліду, що в свою чергу доводить ефективність застосування як кращого варіанту підживлення рослин кремнієвмісним добривом Квантум АкваСил нормою 1 л/га у дві фенологічні фази початок галузнення (ВВСН 21–23) та бутонізації (ВВСН 50–52).

Висновки

Оцінка впливу кремнієвмісних мікродобрив у різні критичні феностадії росту та розвитку сої засвідчила як їх загальний так і виражений специфічний позитивний вплив на оптимізацію функціонування фотосистеми рослин у виразі зростання водного потенціалу листа в інтервалі 16,1–20,2%, зниження загальної стресовості росту в інтервалі 9,3–13,2%, зростання загального індексу життєздатності рослин в інтервалі 19,8–26,2%, що у підсумку гармонізує та оптимізує адаптивний потенціал та стресостійкість рослинного організму за рахунок позитивних змін у інтенсивності первинних реакцій фотосинтезу та значень

фотохімічного їх гасіння. Встановлено позитивний вплив застосованих кремнієвмісних добрив на водоутримуючу здатність листя зі зміщенням піку вологовтрата з 1–2 доби на 4–5 добу порівняно з контролем. Визначено загальний позитивний вплив застосованих мікродобрив на показники урожайності сої з максимальним приростом за використання в підживлення Квантум АкваСил:

за внесення у фенологічну фазу галушення 4,9%, фазу бутонізації 10,1% та в обидві фази 17,9%.

У підсумку, ранжирований ряд у порядку зростання позитивного впливу на стресостійкість рослин було розміщено у наступному порядку застосованих мікродобрив: Хелатин Кремній – КОРМІН Кремнієвий (Гумат) – Квантум АкваСил.

Список використаної літератури

- Кобизєва Л. Н., Безугла О. М., Силенко С. І., Колотилов В. В., Сокол Т. В., Докукіна К. І., Василенко А. О., Безуглий І. М., Вус Н. О. Методичні рекомендації з вивчення генетичних ресурсів зернобобових культур. НААН, Інститут рослинництва ім. В. Я. Юр'єва. Харків, 2016. 84 с.
- Григорчук Н.Ф., Донцова Ю.І., Якубенко О.В. Оцінка сортів сої на посухостійкість. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2017. № 24. С. 59–67.
- Цицюра Я.Г., Томчук О.М. Індикація системи живлення ріпаку озимого за показниками індукції флуоресценції хлорофілу. *Аграрні інновації*. 2023. № 21. С. 110–118. <http://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.21.17>
- Abd El-Aal, M. M. M., Eid R. S. M. Effect of foliar spray with lithovit and amino acids on growth, bioconstituents, anatomical and yield features of soybean plant. *Plant Biotechnology*. 2018. Vol. 56. P. 187–202. <https://doi.org/10.21608/assjm.2018.65137>
- Agyenim-Boateng K.G., Zhang S., Shohag M.J.I., Shaibu A.S., Li J., Li B., Sun J. Folate biofortification in soybean: Challenges and prospects. *Agronomy*. 2023. Vol. 13. 241. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010241>
- Brestic M, Zivcak M. PSII fluorescence techniques for measurement of drought and high temperature stress signal in plants: protocols and applications. In: Rout GR, Das AB (eds.) *Molecular stress physiology of plants*. Springer Dordrecht 2013. P. 87–131. http://doi.org/10.1007/978-81-322-0807-5_4
- Chennakesavulu K., Singh H., Trivedi P. K., Jain M., Yadav S. R. State-of-the-art in CRISPR technology and engineering drought, salinity, and thermo-tolerant crop plants. *Plant Cell Reports*. 2021. Vol. 41. P. 815–831. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02681-w>
- Choudhary P., Jhajharia A., Kumar R. Influence of sulphur and zinc fertilization on yield, yield components and quality traits of soybean (*Glycine max* L.). *Bioscan*. 2014. Vol. 9. P. 137–142.
- Cohen I., Zandalinas S. I., Huck C., Fritschi F. B., Mittler R. Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield and yield components. *Physiologia Plantarum*. 2021. Vol. 171. P. 66–76. <https://doi.org/10.1111/ppl.13203>
- Cuesta N. N., Carciocchi W., Wyngaard N., Rozas H. S., Silva S., Salvagiotti F. Zinc fertilization strategies in soybean: plant uptake, yield, and seed concentration. *Plant Nutrition*. 2023. Vol. 46. P. 1134–1144. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2067059>
- Dai H., Wei S., Twardowska I. Biofortification of soybean (*Glycine max* L.) with Se and Zn, and enhancing its physiological functions by spiking these elements to soil during flowering phase. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 740. 139648. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139648>
- Deepak S.B., Mahadev C.R., Ganesh N.C., Nikam, T. D. Improvement of Soybean Crop for Yield, Stress Tolerance, and Value-Added Products Using a Transgenic Approach. *Advances in Agriculture*. 2023. 8166928. <https://doi.org/10.1155/2023/8166928>
- Ducsay L., Zapletalová A., Slepčan M., Vicianová M., Hozlár P., Bušo R. Selenium effect on wheat grain yield and quality applied in different growth stages. *Plant, soil and environment*. 2021. Vol. 67. Iss. 3. P. 147–153. <https://doi.org/10.17221/589/2020-PSE>
- Genc Y., Humphries J. M., Lyons G. H., Graham R. D. Exploiting genotypic variation in plant nutrient accumulation to alleviate micronutrient deficiency in populations. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2005. Vol. 18. № 4. P. 319–24. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.02.005>
- Han Ş., Sönmez İ., Qureshi M., Güden B., Gangurde S.S., Yol E. The effects of foliar amino acid and Zn applications on agronomic traits and Zn biofortification in soybean (*Glycine max* L.). *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 15. 1382397. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1382397>
- Hansch R., Mendel R. R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology*. 2009. Vol. 12. P. 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.05.006>

- Hatfield J. L., Dold C. Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 10. 103. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>
- Jianing G., Yuhong G., Yijun G., Rasheed A., Qian Z., Zhiming X., Mahmood A., Shuheng Z., Zhuo Z., Zhuo Z., Xiaoxue W., Jian W. Improvement of heat stress tolerance in soybean (*Glycine max* L), by using conventional and molecular tools. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol.13. 993189. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.993189>
- Jumrani K., Bhatia V. S. Interactive effect of temperature and water stress on physiological and biochemical processes in soybean. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2019. Vol. 25. P. 667–681. <https://doi.org/10.1007/s12298-019-00657-5>
- Kalaji H.M., Goltsev V.N., Žuk–Golaszewska K., Zivcak M., Brestic M. Chlorophyll Fluorescence. Understanding Crop Performance: Basics and Applications. CRC Press, Boca Raton. 2017. 222 p.
- Katam R., Shokri S., Murthy N., Singh S. K., Suravajhala P., Khan M. N. Proteomics, physiological, and biochemical analysis of cross tolerance mechanisms in response to heat and water stresses in soybean. *PLoS One*. 2020. Vol. 15. e0233905. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233905>
- Korobko A., Kravets R., Mazur O., Mazur O., Shevchenko N. Nitrogen-fixing capacity of soybean varieties depending on seed inoculation and foliar fertilization with biopreparations. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. Vol. 25, Issue 4. P. 23–37. <https://doi.org/10.12911/22998993/183497>
- Kumar A., Choudhary A., Kaur H. Exploring the role of silicon in enhancing sustainable plant growth, defense system, environmental stress mitigation and management. *Discover Applied Sciences*. 2025. Vol. 7. 406. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06866-w>
- Makdoh B., Singh A.P., Zhiipao R.R. Zinc-based agronomic bio-fortification strategies for soybean in the North Eastern Himalayas of India. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. 36152. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17007-z>
- Manimaran G., Duraisamy S., Subramaniam S., Rangasamy A., Alagarsamy S., James P., Selvamani P., Perumal D., Veerappan M., Arunan Y.E. Silicon-driven approaches to salinity stress tolerance: Mechanisms, uptake dynamics, and microbial transformations. *Plant Stress*. 2025. Vol. 16. 100825. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100825>
- Mrština T., Praus L., Száková J., Kaplan L., Tlustoš P. Foliar selenium biofortification of soybean: the potential for transformation of mineral selenium into organic forms. *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 15. 1379877. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1379877>
- Romanov V.O., Artemenko D.M., Braiko Y.O. Family of portable devices ‘Floratest’: preparation for serial production. *Computer tools, networks and systems*. 2011. № 10. P. 85–93.
- Thavarajah D., Ruszkowski J., Vandenberg A. High potential for selenium biofortification of lentils (*Lens culinaris* L.). *Agricultural & Food Chemistry*. 2008. Vol. 56. № 22. P. 10747–10753. <https://doi.org/10.1021/jf802307h>
- Verma K.K., Song X.P., Liang Q., Huang H.-R., Bhatt R., Xu L., Chen G.L., Li Y.R. Unlocking the role of silicon against biotic stress in plants. *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 15.1430804. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1430804>
- Wadas W., Kondraciuk T. The Role of Foliar-Applied Silicon in Improving the Growth and Productivity of Early Potatoes. *Agriculture*. 2025. Vol. 15. №5. 556. <https://doi.org/10.3390/agriculture15050556>
- Wang Z., Hussain B., Wang X., Hamid Y., Zhang J., Khan M.B., He Z., Yang X. Synergistic Effects of Selenium and Silicon Nanoparticles on Peach Quality Enhancement and Se Biofortification Through Foliar Application. *Plants*. 2025. Vol. 14. 3669. <https://doi.org/10.3390/plants14233669>
- Wong J. Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications (Second Edition). Academic Press, 2018. 589 p. <http://doi.org/10.1016/C2012-0-06451-4>
- Zapletalová A., Kolenčík M., Ducsay L., Vicianová M., Vician T., Černý I., Bušo R. Approach to Selenium Application in Different Soil Concentrations for Encouraged Yield, Distribution, and Biofortification of Common Buckwheat Seeds (*Fagopyrum esculentum* Moench). *Agriculture-Basel*. 2025. Vol. 15. Iss. 8. 891 <https://doi.org/10.3390/agriculture15080891>
- Zargar S.M., Mahajan R., Bhat J.A., Nazir M., Deshmukh R. Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system. *3 Biotech*. 2019. Vol. 9. № 3. 73. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1613-z>

References

- Kobyziyeva, L. N., Bezuhla, O. M., Sylenko, S. I., Kolotylov, V. V., Sokol, T. V., Dokukina, K. I., Vasylenko, A. O., Bezuhlyi, I. M., & Vus, N. O. (2016). Metodychni rekomendatsii z vyvchennia henetychnykh resursiv zernobobovykh kultur [Guidelines for the study of genetic resources of grain legume crops]. NAAN, Instytut roslynnytstva im. V. Ya. Yurieva. Kharkiv [in Ukrainian].

Hryhorchuk, N.F., Dontsova, Yu.I., & Yakubenko, O.V. (2017). Otsinka sortiv soi na posukhostiikist [Evaluation of soybean varieties for drought resistance]. *Naukovo-tehnichniyi biuleten Instytutu oliinykh kultur NAAN [Scientific and Technical Bulletin of the Institute of Oilseed Crops of NAAS]*. 24, 59–67 [in Ukrainian].

Tsytsiura, Ya.H., & Tomchuk, O.M. (2023). Indykatsiia systemy zhyvlennia ripaku ozymoho za pokaznykamy induktsii fluorestsentsii khlorofilu [Indication of the life system of winter rapeseed by chlorophyll fluorescence induction indicators]. *Ahrarni innovatsii [Agrarian Innovations]*. 21, 110–118. <http://doi.org/10.32848/ahrar.innov.2023.21.17> [in Ukrainian].

Abd, El-Aal, M. M. M., & Eid, R. S. M. (2018). Effect of foliar spray with lithovit and amino acids on growth, bioconstituents, anatomical and yield features of soybean plant. *Plant Biotechnology*. 56, 187–202. <https://doi.org/10.21608/assjm.2018.65137> [in English].

Agyenim-Boateng, K.G., Zhang, S., Shohag, M.J.I., Shaibu, A.S., Li J., Li, B., & Sun, J. (2023). Folate biofortification in soybean: Challenges and prospects. *Agronomy*. 13, 241. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010241> [in English].

Brestic, M., & Zivcak, M. (2013). PSII fluorescence techniques for measurement of drought and high temperature stress signal in plants: protocols and applications. In: Rout GR, Das AB (eds.) *Molecular stress physiology of plants*. Springer Dordrecht, 87–131. http://doi.org/10.1007/978-81-322-0807-5_4 [in English].

Chennakesavulu, K., Singh, H., Trivedi, P. K., Jain, M., & Yadav, S. R. (2021). State-of-the-art in CRISPR technology and engineering drought, salinity, and thermo-tolerant crop plants. *Plant Cell Reports*. 41, 815–831. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02681-w> [in English].

Choudhary, P., Jhaharia, A., & Kumar, R. (2014). Influence of sulphur and zinc fertilization on yield, yield components and quality traits of soybean (*Glycine max* L.). *Bioscan*. 9, 137–142 [in English].

Cohen, I., Zandalinas, S. I., Huck, C., Fritschi, F. B., & Mittler, R. (2021). Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield and yield components. *Physiologia Plantarum*. 171, 66–76. <https://doi.org/10.1111/ppl.13203> [in English].

Cuesta, N. N., Carciochi, W., Wyngaard, N., Rozas, H. S., Silva, S., & Salvagiotti, F. (2023). Zinc fertilization strategies in soybean: plant uptake, yield, and seed concentration. *Plant Nutrition*. 46, 1134–1144. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2067059> [in English].

Dai, H., Wei, S., & Twardowska, I. (2020). Biofortification of soybean (*Glycine max* L.) with Se and Zn, and enhancing its physiological functions by spiking these elements to soil during flowering phase. *Science of the Total Environment*. 740, 139648. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139648> [in English].

Deepak S.B., Mahadev C.R., Ganesh N.C., & Nikam, T. D. (2023). Improvement of Soybean Crop for Yield, Stress Tolerance, and Value-Added Products Using a Transgenic Approach. *Advances in Agriculture*. 8166928. <https://doi.org/10.1155/2023/8166928> [in English].

Ducsay, L., Zapletalová, A., Slepčan, M., Vicianová, M., Hozlár, P., & Bušo, R. (2021). Selenium effect on wheat grain yield and quality applied in different growth stages. *Plant, soil and environment*. 2021. 67(3), 147–153. <https://doi.org/10.17221/589/2020-PSE> [in English].

Genc, Y., Humphries, J. M., Lyons, G. H., & Graham, R. D. (2005). Exploiting genotypic variation in plant nutrient accumulation to alleviate micronutrient deficiency in populations. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 18(4), 319–324. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.02.005> [in English].

Han, Ş., Sönmez, İ., Qureshi, M., Güden, B., Gangurde, S.S., & Yol, E. (2024). The effects of foliar amino acid and Zn applications on agronomic traits and Zn biofortification in soybean (*Glycine max* L.). *Frontiers in Plant Science*. 15, 1382397. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1382397> [in English].

Hansch, R., & Mendel, R. R. (2009). Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology*. 12, 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.05.006> [in English].

Hatfield, J. L., & Dold, C. Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science*. 2019. 10, 103. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103> [in English].

Jianing, G., Yuhong, G., Yijun, G., Rasheed, A., Qian, Z., Zhiming, X., Mahmood, A., Shuheng, Z., Zhuo, Z., Zhuo, Z., Xiaoxue, W., & Jian, W. (2022). Improvement of heat stress tolerance in soybean (*Glycine max* L), by using conventional and molecular tools. *Frontiers in Plant Science*. 13, 993189. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.993189> [in English].

Jumrani, K., & Bhatia, V. S. (2019). Interactive effect of temperature and water stress on physiological and biochemical processes in soybean. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 25, 667–681. <https://doi.org/10.1007/s12298-019-00657-5> [in English].

Kalaji, H.M., Goltsev, V.N., Żuk–Golaszewska, K., Zivcak, M., Brestic, M. (2017). Chlorophyll Fluorescence. Understanding Crop Performance: Basics and Applications. CRC Press, Boca Raton [in English].

Katam, R., Shokri, S., Murthy, N., Singh, S. K., Suravajhala, P., Khan, M. N. (2020). Proteomics, physiological, and biochemical analysis of cross tolerance mechanisms in response to heat and water stresses in soybean. *PLoS One*. 15, e0233905. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233905> [in English].

Korobko, A., Kravets, R., Mazur, O., Mazur, O., & Shevchenko, N. (2024). Nitrogen-fixing capacity of soybean varieties depending on seed inoculation and foliar fertilization with biopreparations. *Journal of Ecological Engineering*. 25(4), 23–37. <https://doi.org/10.12911/22998993/183497> [in English].

Kumar, A., Choudhary, A., & Kaur, H. (2025). Exploring the role of silicon in enhancing sustainable plant growth, defense system, environmental stress mitigation and management. *Discover Applied Sciences*. 7, 406. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06866-w> [in English].

Makdoh, B., Singh, A.P., & Zhiipao, R.R. (2025). Zinc-based agronomic bio-fortification strategies for soybean in the North Eastern Himalayas of India. *Scientific Reports*. 15, 36152. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17007-z> [in English].

Manimaran, G., Duraisamy, S., Subramaniam, S., Rangasamy, A., Alagarsamy, S., James, P., Selvamani, P., Perumal, D., Veerappan, M., & Arunan, Y.E. (2025). Silicon-driven approaches to salinity stress tolerance: Mechanisms, uptake dynamics, and microbial transformations. *Plant Stress*. 16, 100825. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100825> [in English].

Mrština, T., Praus, L., Száková, J., Kaplan, L., Tlustoš, P. (2024). Foliar selenium biofortification of soybean: the potential for transformation of mineral selenium into organic forms. *Frontiers in Plant Science*. 15, 1379877. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1379877> [in English].

Romanov, V.O., Artemenko, D.M., & Braiko, Y.O. (2011). Family of portable devices 'Floratest': preparation for serial production. *Computer tools, networks and systems*. 10, 85–93 [in English].

Thavarajah, D., Ruszkowski, J., & Vandenberg, A. (2008). High potential for selenium biofortification of lentils (*Lens culinaris* L.). *Agricultural & Food Chemistry*. 56(22), 10747–10753. <https://doi.org/10.1021/jf802307h> [in English].

Verma, K.K., Song, X.P., Liang, Q., Huang, H.-R., Bhatt, R., Xu, L., Chen, G.L., & Li, Y.R. (2024). Unlocking the role of silicon against biotic stress in plants. *Frontiers in Plant Science*. 15, 1430804. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1430804> [in English].

Wadas, W., & Kondraciuk, T. (2025). The Role of Foliar-Applied Silicon in Improving the Growth and Productivity of Early Potatoes. *Agriculture*. 15(5), 556. <https://doi.org/10.3390/agriculture15050556> [in English].

Wang, Z., Hussain, B., Wang, X., Hamid, Y., Zhang, J., Khan, M.B., He, Z., & Yang, X. (2025). Synergistic Effects of Selenium and Silicon Nanoparticles on Peach Quality Enhancement and Se Biofortification Through Foliar Application. *Plants*. 14, 3669. <https://doi.org/10.3390/plants14233669> [in English].

Wong, J. (2018). Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications (Second Edition). Academic Press. <http://doi.org/10.1016/C2012-0-06451-4> [in English].

Zapletalová, A., Kolenčík, M., Ducsay, L., Vicianová, M., Vician, T., Černý, I., & Bušo, R. (2025). Approach to Selenium Application in Different Soil Concentrations for Encouraged Yield, Distribution, and Biofortification of Common Buckwheat Seeds (*Fagopyrum esculentum* Moench). *Agriculture-Basel*. 15(8), 891 <https://doi.org/10.3390/agriculture15080891> [in English].

Zargar, S.M., Mahajan, R., Bhat, J.A., Nazir, M., & Deshmukh, R. (2019). Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system. *3 Biotech*. 9(3), 73. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1613-z> [in English].

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

