

УДК 633.11"324":632.11:631.53.01

## Управління продуктивністю пшениці озимої за діагностування стресу через флуоресценцію хлорофілу за змінних погодних умов та інокуляцію насіння

 Р. В. Сонько,  С. М. Каленська

Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна, e-mail: sonkoroman@gmail.com, svitlana.kalenska@gmail.com

**Мета.** Установити особливості фотосинтетичної активності посівів пшениці озимої в стресових умовах, спричинених високими максимальними температурами повітря та нестачею опадів; діагностувати стан рослин за показниками інтенсивності індукції флуоресценції хлорофілу та визначити ефективність застосування біоінокулянта насіння для зниження стресу рослин. **Методи.** Польові та лабораторні дослідження проведені впродовж 2020–2022 рр. Польові досліді закладали в стаціонарній сівозміні кафедри рослинництва у Відокремленому підрозділі НУБІП України «Агрономічна дослідна станція» на чорноземі типовому малогумусному крупнопилувато-легкосуглинковому. Досліджували ефективність різних норм препарату Різомакс – від 1 до 3 л/т за інокуляції насіння на фоні внесення добрива Актібіон (100 кг/га). Інтенсивність індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ) визначали за допомогою портативного флуорометра «Флоратест». Площу листової поверхні рослин визначали за методом «висічок». **Результати.** Площа листової поверхні в роки проведення досліджень тісно корелювала з погодними умовами, та також залежала від добрив і мікоризного інокулянту насіння, який застосовували в різних нормах. Середня площа листової поверхні посівів пшениці озимої впродовж 2020–2022 рр. становила від 34,4 тис. м<sup>2</sup>/га в контрольному варіанті у фазі ВВСН 56–58 до 53,6 тис. м<sup>2</sup>/га у ВВСН 64–66. Погодні умови весняно-літнього періоду вегетації пшениці озимої в різні роки суттєво різнилися між собою. Максимальні температури повітря в травні – липні коливалися від 17,1 °С ( III декада травня 2020 р.) до 34,6 °С ( III декада червня 2021 р.). Погодні умови 2022 року були вкрай критичними як щодо відсутності опадів, так і дуже високих температур, що обумовило формування рослин з критично низькою площею листової поверхні і самої низької врожайності пшениці у 2021/2022 в. р. Розрахунки максимальної фотохімічної ефективності фотосистеми II дають змогу зробити висновок щодо можливості моніторингу ефективності живлення та стресових факторів, які впливають на рослини, у реальному часі та без руйнування зразка. Співвідношення Fv/Fm в умовах 2022 року в мікростадіях ВВСН 56–58 становило 0,56–0,59; ВВСН 64–66 – 0,58–0,64; ВВСН 72–74 – 0,56–0,63, що було значно нижчим порівняно з відповідними мікростадіями розвитку у 2020 та 2021 рр. У мікростадії ВВСН 64–66 в умовах найбільш сприятливого 2021 року співвідношення Fv/Fm в контрольному варіанті склало 0,71; за внесення Актібіон – 0,71; за інокуляції насіння Різомаксом – 0,82–0,86. Ефект стресостійкості зростав за збільшення норми застосування Різомаксу. **Висновки.** Різомакс за комбінованого застосування на фоні добрива Актібіон підвищує стійкість до стресів (посуха, перепади температур), активізує формування площі листової поверхні, підвищенню врожайності пшениці озимої. Визначення інтенсивності індукції флуоресценції хлорофілу може слугувати швидким неруйнівним методом для моніторингу статусу живлення сільськогосподарських культур.

**Ключові слова:** площа листової поверхні; інтенсивність індукції флуоресценції хлорофілу; урожайність.

### Вступ

Продуктивність пшениці озимої формується завдяки використанню внутрішнього стану та потенціалу рослин, які можливо своєчасно діагностувати на всіх мікростадіях розвитку. Це відкриває

**Як цитувати:** Сонько Р. В., Каленська С. М. Управління продуктивністю пшениці озимої за діагностування стресу через флуоресценцію хлорофілу за змінних погодних умов та інокуляцію насіння. *Новітні агротехнології*. 2026. Т. 14, № 1. <https://doi.org/10.47414/na.14.1.2026.354980>



© The Author(s) 2026. Published by Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the NAAS of Ukraine. This is an open access article distributed under the terms of the license CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

додаткові можливості для оптимізації технологій вирощування [1–3]. Нові формуляції добрив та біопрепарати для інокуляції насіння є важливими компонентами розробки інноваційних технологій вирощування зернових культур [4–6].

Ефективність рослинництва залежить від багатьох процесів, що відбуваються на рівні хлоропластів, листків та всього посіву [7, 8]. Зокрема, David W. Lawlor [9] зазначає, що для збільшення накопичення сухої речовини, тобто валової продукції, необхідно або подовжити вегетаційний період, або підвищити ефективність поглинання та перетворення світла рослинами; останнє найдоцільніше досягати шляхом збільшення площі листової поверхні.

Активність фотосинтетичних процесів, темпи наростання листової поверхні та дихання безпосередньо впливають на оптимальний ріст і розвиток рослин, що визначає швидкість накопичення органічної маси та рівень показників структури врожаю [10, 11]. Фотосинтез є єдиним процесом у біосфері, завдяки якому засвоюється енергія Сонця, що забезпечує існування як рослин, так і всіх гетеротрофних організмів [12]. Він також забезпечує енергією всі процеси росту та обміну в рослині.

Погодними умовами неможливо керувати, проте до них можливо адаптуватися з метою досягнення максимального інтегрального результату [13–15]. Посухи порушують фізіологічні процеси в рослинах, насамперед фотосинтез, знижують метаболізм і викликають передчасне старіння, що призводить до зниження врожайності [16–18]. Посуха прискорює деградацію фотосинтетичних компонентів (хлорофілу, Rubisco, фотосистеми II тощо) у прапорцевих листках зернових культур [19–21].

Пігментний комплекс рослин є однією з найчутливіших систем до умов довкілля [11, 22]. При зменшенні водозабезпечення та дії високих температур відбувається деструкція хлоропластів, підвищується гідролітична активність хлорофілази, порушується синтез хлорофілу *a* та *b*, а також змінюється стабільність хлорофіл-білково-ліпідного комплексу пластид. Через це вміст пігментів у фотосинтезуючих тканинах рослин і міцність зв'язку хлорофілу з ліпопротеїдним комплексом використовуються фітофізіологами як одна з найбільш показових характеристик адаптації фотосинтетичного апарату до несприятливих умов, зокрема до посухи [16, 23].

Залежність між інтенсивністю фотосинтезу та вмістом хлорофілу в листках є складною, проте загальна врожайність рослин значною мірою визначається вмістом пігментів у всіх фотосинтезуючих органах та тривалістю і інтенсивністю їхньої роботи [24]. Своєчасна діагностика стану рослин під впливом стресових чинників, зокрема посух, дозволяє управляти їхнім станом за допомогою технологічних факторів [25–27]. Актуальним напрямом є розроблення надійних методів експрес-оцінки функціонального стану польових культур протягом вегетації. Стан фотосинтетичного апарату є одним із ключових показників, що безпосередньо впливає на якість і кількість кінцевого врожаю [28].

Виявлення реакцій фотосинтетичного апарату на специфічну дію посухи дозволяє більш повно оцінити ознаки стійкості рослин до несприятливих факторів середовища [29]. Застосування методу індукції флуоресценції хлорофілу дає змогу досліджувати й аналізувати ефективність фотохімічних реакцій у фотосистемі II, яка вважається найбільш чутливою до впливу зовнішніх факторів [24, 30].

*Мета досліджень* – установити особливості фотосинтетичної активності посівів пшениці озимої в стресових умовах, спричинених високими максимальними температурами повітря та нестачею опадів; діагностувати стан рослин за показниками інтенсивності індукції флуоресценції хлорофілу та визначити ефективність застосування біоінокулянта насіння для зниження стресу рослин.

### **Матеріали та методика досліджень**

Польові та лабораторні дослідження проведено впродовж 2020–2022 рр. Польові досліді заклали в стаціонарній сівозміні кафедри рослинництва у Відокремленому підрозділі НУБІП України «Агрономічна дослідна станція» відповідно до наявних методик [31]. Грунт дослідного поля – чорнозем типовий малогумусний крупнопилувато-легкосуглинковий.

Досліджували ефективність органічного біостимулятора, інокулянту насіння Різемакс (Фертчем), який застосовували при передпосівній обробці насіння. Вносили добриво Актібіон, в дозі 100 кг/га, яке було фоном в усіх варіантах із застосуванням різних норм Різемаксу. Схема польового дослідження передбачала застосування різних норм препарату Різемакс – від 1 до 3 л/т для інокуляції насіння (табл. 1)

*Актібіон (Actibion)* (Фертчем) – комплексне добриво у вигляді водорозчинних гранул, яке містить: B, 0,1 %; Fe, 0,5 %; K<sub>2</sub>O, 12 %; MgO, 2 %; Mn, 0,01 %; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 20 %; SO<sub>3</sub>, 15 %; Zn, 0,01 %.

*Різомакс (RhizoMax)* (Фертчем) – спеціалізований мікоризний інокулянт насіння, біостимулятор (іноді класифікується як добриво-антистресант), який містить живі гриби *Glomus* spp., що утворюють симбіоз з корінням, вільні амінокислоти – 6 % та азот – N – 2 %. Амінограма представлена 18 амінокислотами: Gl, Al, Arg, As, Fe, Glu, Hrp, Hi, Is, Le, Ls, Me, Pr, Se, Tir, Va, Tr і Cis. Завдяки наявності комплексу Efisoil покращує життєдіяльність мікроорганізмів, що знаходяться в ризосфері. Вільні амінокислоти покращують процес формування кореневої системи. Збалансований ферментний комплекс сприяє мобілізації насінневих запасів для початку циклу проростання, а наявність карбонових кислот покращує доступність елементів живлення на ранніх стадіях росту.

За певними макро- або мікростадіями відбирали проби в двох несуміжних повтореннях з 0,33 погонного метра, в яких визначали масу сирої проби, вміст сухої речовини, площу листової поверхні. Відокремлювали всі листки з проби і зважували. Площу листової поверхні рослин визначали за методом «висічок». Відбирали 10 листків, щільно їх складали разом, лабораторним пробовідбірником з визначеним діаметром і розрахованою площею робили 10 проколів – відборів 100 «висічок», які відразу зважували. За пропорційним співвідношенням визначали площу листової поверхні відібраної проби і робили перерахунок на гектар.

*Інтенсивність індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ)* визначали за допомогою портативного флуорометра «Флоратест», розробленого в Інституті кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України [32, 33]. Вимірювання проводилося на листках середнього ярусу, в режимі 3 хв, тобто визначали швидку та повільну фазу флуоресценції хлорофілу (ФХ). Виміри здійснювали в трикратній повторності. В якості фізіологічних показників рослин на кривій ІФХ реєстрували такі показники та параметри: «фоновий» рівень флуоресценції ( $F_0$ );  $F_m$  – максимальний рівень флуоресценції, максимальна флуоресценція після застосування насичуючого імпульсу у темновідновленому стані (непохитна пікова флуоресценція PSII);  $F_v/F_0$  – показник фотохімічної активності ФС II ;  $F_v/F_m$  – потенційний квантовий вихід фотосинтезу; «index vitality» – індекс життєдіяльності зазвичай є зведеним показником, що вимірює рівень енергії та загальний стан рослини. який представляє собою співвідношення максимальної флуоресценції до інтенсивності флуоресценції в стаціонарній фазі ( $F_m/F_{st}$ ) може служити відносним показником енергетичного стану фотосистеми 2 (PSII);  $F_s$  (або  $F_{st}$ ) – стаціонарна флуоресценція у дії освітлення (після певної постійної або імпульсної освітленості).

Сівбу проводили сівалкою Грейт Плейнз, ширина захвату 1,4 м. Норма висіву – 5 млн схожих насінин на 1 га. Попередником пшениці озимої була соя. Дослід закладався у чотирикратному повторенні. Облікова площа ділянки становила 25 м<sup>2</sup>. Структуру врожаю визначали шляхом відбору та аналізування «пробних снопів». Облік врожаю здійснювали методом суцільного обмолочування зерна з облікової ділянки з наступним перерахунком на 100 % чистоту та 14 % вологість [31].

## Результати досліджень

У досліді з визначення ефективності органічного біостимулятора Різомакс, який застосовували для передпосівної обробки насіння, як фонове добриво використовували Актібіон у дозі 100 кг/га. Встановлено їх достатньо ефективне поєднання щодо підвищення польової схожості насіння – 92–93 % проти 86–88 % у контрольних варіантах. Це забезпечило формування посівів у фазі повних сходів із більшою густотою рослин.

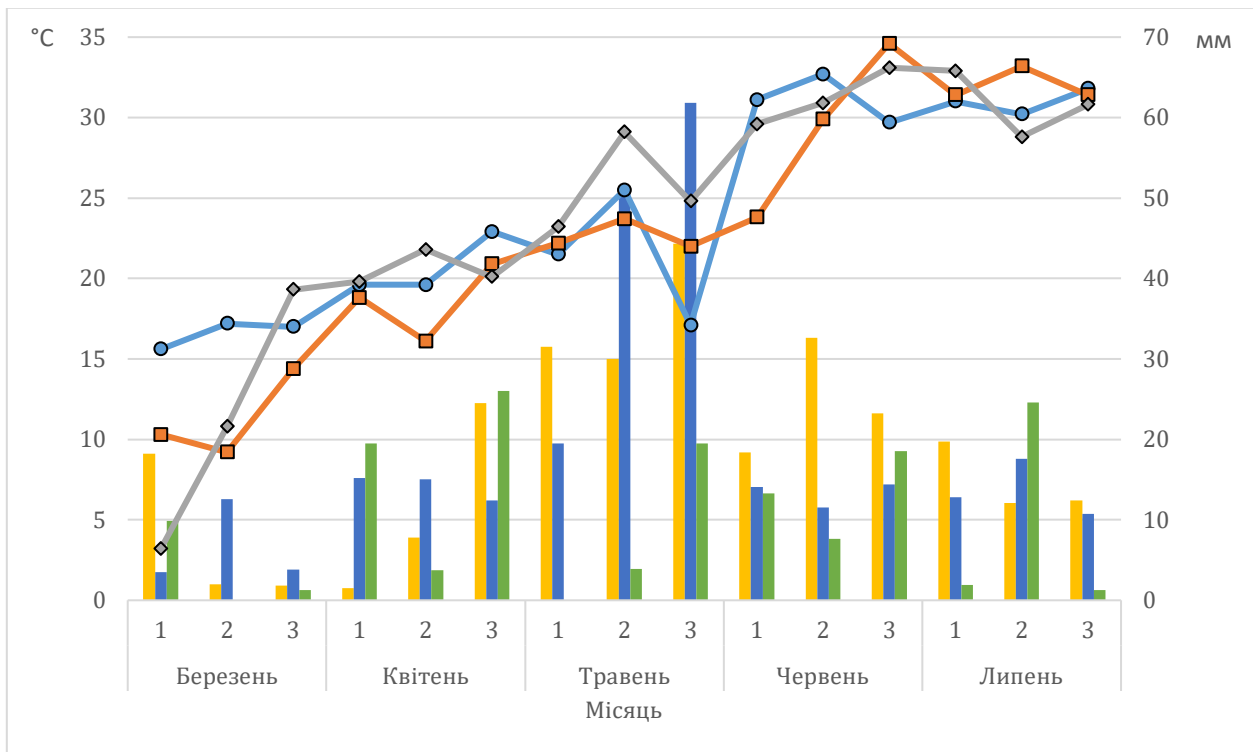
Різомакс сприяє підвищенню засвоєння поживних речовин, що, у свою чергу, забезпечує більш інтенсивний розвиток рослин. Ефект посилюється завдяки синергічній дії компонентів, які впливають на ростові процеси на ранніх етапах органогенезу.

Погодні умови весняно-літнього періоду вегетації пшениці озимої в різні роки суттєво відрізнялися (рис.). Максимальна температура повітря в травні-липні коливалася від 17,1 °C (III декада травня 2020 р.) до 34,6 °C (III декада червня 2021 р.). Водночас за високих температур повітря та відносно достатнього забезпечення вологою стрес у рослин проявлявся меншою мірою.

Погодні умови 2022 року були вкрай критичними через дуже низьку кількість опадів і високі температури. За такої комбінації сум опадів і максимальних температур сформувалися рослини з критично низькою площею листової поверхні (табл. 1), що зумовило формування найнижчої врожайності пшениці в 2021/2022 в. р. (табл. 3).

Проведення інокуляції насіння пшениці препаратом Різомакс у поєднанні з внесенням добрив сприяє суттєвому наростанню листової поверхні. Важливим чинником її формування є погодні умови, зокрема поєднання кількості опадів і температурного режиму. Площа листової поверхні в

роки проведення досліджень тісно корелювала з погодними умовами, а також залежала від застосування добрив і мікоризного інокулянту насіння, який вносили в різних нормах.



Опади 2020 рік 2021 рік 2022 рік Температура 2020 рік 2021 рік 2022 рік

**Рис. Максимальні температури повітря і суми опадів у весняно-літній період вегетації пшениці озимої**

Середня площа листкової поверхні посівів пшениці озимої впродовж 2020–2022 років становила від 34,4 тис. м<sup>2</sup>/га у контрольному варіанті у фазі ВВСН 56–58 до 53,6 тис. м<sup>2</sup>/га у фазі ВВСН 64–66 (табл. 1).

В умовах посухи 2022 року площа листкової поверхні була критично низькою в усі періоди росту й розвитку рослин і поступалася навіть показникам контрольних варіантів у відповідні фази розвитку в роки з достатнім вологозабезпеченням.

Таблиця 1

**Площа листкової поверхні посіву пшениці озимої, тис. м<sup>2</sup>/га**

№	Варіант	Веgetаційний рік			Середнє 2020–2022 рр.
		2019/2020	2020/2021	2021/2022	
ВВСН 56–58 (фаза колосіння)					
1	Контроль	37,7 <sup>d</sup>	38,2 <sup>d</sup>	27,8 <sup>c</sup>	34,4
2	Актібіон – Фон	43,7 <sup>e</sup>	47,3 <sup>e</sup>	34,2	46,4 <sup>e</sup>
3	Фон + Різомакс, 1 л/т	44,9 <sup>e</sup>	49,4 <sup>e</sup>	38,2 <sup>d</sup>	49,8 <sup>e</sup>
4	Фон + Різомакс, 2 л/т	45,6 <sup>e</sup>	50,3 <sup>e</sup>	38,8 <sup>d</sup>	50,2
5	Фон + Різомакс, 3 л/т	46,5 <sup>e</sup>	51,4 <sup>e</sup>	38,9 <sup>d</sup>	51,3
ВВСН 64–66 (фаза цвітіння)					
1	Контроль	40,2	41,4 <sup>e</sup>	29,6 <sup>c</sup>	34,4
2	Актібіон – Фон	48,7 <sup>e</sup>	50,8 <sup>ef</sup>	36,1 <sup>d</sup>	47,2 <sup>e</sup>
3	Фон + Різомакс, 1 л/т	49,2 <sup>e</sup>	52,7 <sup>f</sup>	38,9 <sup>d</sup>	52,4
4	Фон + Різомакс, 2 л/т	49,9 <sup>e</sup>	53,8 <sup>f</sup>	39,2 <sup>d</sup>	53,1
5	Фон + Різомакс, 3 л/т	50,1 <sup>ef</sup>	54,7 <sup>f</sup>	39,8 <sup>d</sup>	53,6
ВВСН 72–74 (фаза молочної стиглості зерна)					
1	Контроль	28,1 <sup>c</sup>	29,7 <sup>c</sup>	19,8 <sup>a</sup>	24,2 <sup>b</sup>
2	Актібіон – Фон	35,4 <sup>d</sup>	34,8 <sup>d</sup>	23,2 <sup>b</sup>	27,8 <sup>bc</sup>
3	Фон + Різомакс, 1 л/т	37,9 <sup>d</sup>	36,9 <sup>d</sup>	24,6 <sup>b</sup>	29,8 <sup>c</sup>
4	Фон + Різомакс, 2 л/т	39,2 <sup>d</sup>	37,2 <sup>d</sup>	24,8 <sup>b</sup>	30,4 <sup>c</sup>
5	Фон + Різомакс, 3 л/т	39,4 <sup>d</sup>	37,2 <sup>d</sup>	24,8 <sup>b</sup>	30,8 <sup>c</sup>

Одним із найважливіших фізіологічних процесів у рослин, що визначає їхню продуктивність, є фотосинтез. Аналіз параметрів флуоресценції хлорофілу є ефективним інструментом для дослідження впливу різноманітних чинників довкілля на рослини. Складні взаємозв'язки між фотосинтезом і кінетикою флуоресценції хлорофілу дають змогу використовувати цей метод для глибокого розуміння фотосинтетичних і біохімічних процесів, що відбуваються в рослині.

За даними Maxwell & Johnson [34], для більшості рослин за відсутності стресу оптимальне значення  $F_v/F_m$  перебуває в межах 0,79–0,83. Водночас, за результатами досліджень Prusiazhniuk et al. [35], середнє значення цього показника для міскантусу впродовж трьох років становило 0,75 у травні, 0,71 у червні, 0,70 у липні та 0,77 у серпні. Інші дослідження свідчать, що показники  $F_v/F_m$  та  $F_m/F_o$  малочутливі до раннього або помірного посушливого стресу і більш придатні для виявлення лише сильного стресу у багаторічних рослин, тоді як для однорічних культур їх застосування є обмеженим.

Отримані нами результати визначення максимальної фотохімічної ефективності фотосистеми II свідчать про можливість використання цього показника для моніторингу ефективності живлення та впливу стресових чинників у режимі реального часу без руйнування рослинного матеріалу. Вимірювання флуоресценції хлорофілу та подальші розрахунки, проведені впродовж трьох вегетаційних років у три періоди, що відповідали мікростадіям ВВСН 56–58, 64–66 та 72–74, дали змогу ідентифікувати стресовий стан рослин, зумовлений сильною посухою у весняно-літній період 2022 року (табл. 2).

Значення співвідношення  $F_v/F_m$  у 2022 році становили: у мікростадії ВВСН 56–58 – 0,56–0,59; ВВСН 64–66 – 0,58–0,64; ВВСН 72–74 – 0,56–0,63, що було суттєво нижчим порівняно з відповідними фазами розвитку у 2020 та 2021 роках.

Таблиця 2

**Максимальна фотохімічна ефективність фотосистеми II ( $F_v/F_m$ )**

№	Варіант	Веgetаційний рік			Середнє 2020–2022 рр.
		2019/2020	2020/2021	2021/2022	
ВВСН 56–58 (фаза колосіння)					
1	Контроль	0,72	0,74	0,56	0,67
2	Актібіон – Фон	0,74	0,78	0,57	0,70
3	Фон + Різомакс, 1л/т	0,76	0,82	0,58	0,72
4	Фон + Різомакс, 2 л/т	0,80	0,84	0,58	0,74
5	Фон + Різомакс, 3 л/т	0,80	0,84	0,59	0,74
ВВСН 64–66 (фаза цвітіння)					
1	Контроль	0,70	0,71	0,58	0,66
2	Актібіон – Фон	0,75	0,74	0,60	0,70
3	Фон + Різомакс, 1л/т	0,78	0,82	0,62	0,74
4	Фон + Різомакс, 2 л/т	0,78	0,84	0,64	0,75
5	Фон + Різомакс, 3 л/т	0,79	0,86	0,64	0,76
ВВСН 72–74 (фаза молочної стиглості зерна)					
1	Контроль	0,66	0,64	0,56	0,62
2	Актібіон – Фон	0,70	0,67	0,62	0,66
3	Фон + Різомакс, 1л/т	0,72	0,68	0,64	0,68
4	Фон + Різомакс, 2 л/т	0,73	0,68	0,64	0,68
5	Фон + Різомакс, 3 л/т	0,73	0,69	0,63	0,68

Застосування інокулянту Різомакс у поєднанні з внесенням добрив суттєво підвищувало стійкість рослин до стресу, що було ідентифіковано за показниками флуоресценції хлорофілу та співвідношенням  $F_v/F_m$ . Найбільш виражені відмінності за цим показником спостерігали між контрольним варіантом і варіантами із застосуванням Різомаксу в різних нормах на фоні добрив у роки з достатнім вологозабезпеченням.

Зокрема, у мікростадії ВВСН 64–66 в умовах найбільш сприятливого 2021 року значення  $F_v/F_m$  становило: у контрольному варіанті – 0,71; за внесення добрива Актібіон – 0,71; за інокуляції насіння Різомаксом – 0,82–0,86. Підвищення норми застосування Різомаксу супроводжувалося зростанням рівня стресостійкості рослин.

Комбіноване застосування інокулянту Різомакс для обробки насіння та фонового добрива Актібіон у нормі 100 кг/га сприяло інтенсивному росту й розвитку рослин, а також більш ефективному перебігу формотворчих процесів. Саме за використання цієї комбінації було забезпечено формування структурних компонентів продуктивності, що зумовило високий рівень урожайності у 2019–2020 та 2020–2021 вегетаційних роках (табл. 3).

## Урожайність пшениці озимої залежно від добрив та умов року

№	Варіант	Веgetаційний рік			Середнє 2020–2022 рр.
		2019/2020	2020/2021	2021/2022	
1	Контроль	3,30 <sup>b</sup>	3,73 <sup>c</sup>	2,48 <sup>a</sup>	3,17 <sup>b</sup>
2	Актібіон – Фон	5,77 <sup>e</sup>	5,44 <sup>e</sup>	3,43 <sup>b</sup>	4,88 <sup>d</sup>
3	Фон + Різомакс, 1л/т	7,97 <sup>g</sup>	7,95 <sup>g</sup>	4,55 <sup>d</sup>	6,83 <sup>f</sup>
4	Фон + Різомакс, 2 л/т	7,83 <sup>g</sup>	8,09 <sup>g</sup>	4,81 <sup>d</sup>	6,91 <sup>f</sup>
5	Фон + Різомакс, 3 л/т	7,70 <sup>g</sup>	8,27 <sup>g</sup>	5,11 <sup>d</sup>	7,02 <sup>f</sup>

Маса зерна з колоса (у середньому) за комбінованого застосування препаратів зростала у 1,71–1,77 раза, тоді як за внесення нітрофоски – у 1,23 раза порівняно з контрольним варіантом.

Маса 1000 зерен суттєво залежить від рівня живлення рослин. У дослідженнях встановлено, що цей показник варіював від 37,3 г у контрольному варіанті до 41,0 г за застосування Різомаксу в нормі 1 л/т. Урожайність істотно різнилася залежно від умов року та варіантів застосування Різомаксу. Використання препарату в сприятливих умовах забезпечувало суттєве підвищення врожайності. Приріст середньої врожайності за застосування Різомаксу на фоні добрива Актібіон становив 3,66–3,85 т/га.

### Висновки

Різомакс, за комбінованого застосування на фоні добрива Актібіон, підвищує стійкість пшениці озимої до стресових факторів (посуха, перепади температур), активізує формування листкової поверхні та сприяє підвищенню врожайності.

Визначення інтенсивності індукції флуоресценції хлорофілу може слугувати швидким і неруйнівним методом моніторингу стану живлення сільськогосподарських культур.

### Використана література

- Bearss L. S., Hayden Z., Chilvers M. I. et al. Integrating starter fertilizer, fungicide timing, and late-season nitrogen strategies for winter wheat. *Agronomy Journal*. 2026. Vol. 118, No. 1. Article e70292. <https://doi.org/10.1002/agj2.70292>
- Mazurenko B., Kalenska S., Honchar L., Hrygirevskiy M. Formation of productive elements in winter wheat by seed dressing application with slow-release complex fertilisers. *Plant and Soil Science*. 2021. Vol. 12, No. 4. P. 7–16. <https://doi.org/10.31548/agr2021.04.0007>
- Fábián A., Sáfrán E., Szabó-Eitel G. et al. Stigma functionality and fertility are reduced by heat and drought co-stress in wheat. *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 10. Article 244. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00244>
- Kalenska S. Food security and innovation solutions in crop production. *Plant and Soil Science*. 2022. Vol. 13, No. 2. P. 14–26. [https://doi.org/10.31548/agr.13\(2\).2022.14-26](https://doi.org/10.31548/agr.13(2).2022.14-26)
- Bielashov O., Rozhkov A., Kalenska S. et al. Influence of pre-sowing application of mineral fertilizers, root and foliar nutrition on productivity of winter triticale plants. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2022. Vol. 23, No. 6. P. 1–14. <https://doi.org/10.12912/27197050/152118>
- Novytska N., Gadzovskiy G., Mazurenko B. et al. Effect of seed inoculation and foliar fertilizing on structure of soybean yield and yield structure in Western Polissya of Ukraine. *Agronomy Research*. 2020. Vol. 18, No. 4. P. 2512–2519. <https://doi.org/10.15159/ar.20.203>
- Smith N. G., Keenan T. F., Colin Prentice I. et al. Global photosynthetic capacity is optimized to the environment. *Ecology Letters*. 2019. Vol. 22, No. 3. P. 506–517. <https://doi.org/10.1111/ele.13210>
- Song X., Zhou G., Ma B. L. et al. Nitrogen application improved photosynthetic productivity, chlorophyll fluorescence, yield and yield components of two oat genotypes under saline conditions. *Agronomy*. 2019. Vol. 9, No. 3. Article 115. <https://doi.org/10.3390/agronomy9030115>
- Lawlor D. W. Photosynthesis, productivity and environment. *Journal of Experimental Botany*. 1995. Vol. 46 (Sp. Iss.). P. 1449–1461. [https://doi.org/10.1093/jxb/46.special\\_issue.1449](https://doi.org/10.1093/jxb/46.special_issue.1449)
- Chen Y.-E., Su Y.-Q., Zhang C.-M. et al. Comparison of photosynthetic characteristics and antioxidant systems in different wheat strains. *Journal of Plant Growth Regulation*. 2017. Vol. 37, No. 2. P. 347–359. <https://doi.org/10.1007/s00344-017-9731-5>
- Zhang C. J., Chen G. X., Gao X. X., Chu C. J. Photosynthetic decline in flag leaves of two field-grown spring wheat cultivars with different senescence properties. *South African Journal of Botany*. 2006. Vol. 72, No. 1. P. 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2005.03.002>
- Hu L., Zhang Y., Xia H. et al. Photosynthetic characteristics of non-foliar organs in main C<sub>3</sub> cereals. *Physiologia Plantarum*. 2019. Vol. 166, No. 1. P. 226–239. <https://doi.org/10.1111/ppl.12838>

13. Baslam M., Mitsui T., Hodges M. et al. Photosynthesis in a changing global climate: Scaling up and scaling down in crops. *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 11. Article 882. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00882>
14. Prysiazniuk O., Maliarenko O., Penkova S., Voronenko O. Evaluation of the nutrient status of *Miscanthus × giganteus* cultivated on chernozems in Ukraine. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2026. Vol. 72, No. 1. P. 1–18. <https://doi.org/10.1080/03650340.2025.2598978>
15. Barlow K. M., Christy B. P., O’Leary G. J. et al. Simulating the impact of extreme heat and frost events on wheat crop production: A review. *Field Crops Research*. 2015. Vol. 171. P. 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.11.010>
16. Morales F., Ancín M., Fakhret D. et al. Photosynthetic metabolism under stressful growth conditions as a basis for crop breeding and yield improvement. *Plants*. 2020. Vol. 9, No. 1. Article 88. <https://doi.org/10.3390/plants9010088>
17. Blum A. The effect of heat stress on wheat leaf and ear photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*. 1986. Vol. 37, No. 1. P. 111–118. <https://doi.org/10.1093/jxb/37.1.111>
18. Aliqing S., Somayanda I., Sebastian S. V. et al. Heat stress during flowering affects time of day of flowering, seed set, and grain quality in spring wheat. *Crop Science*. 2018. Vol. 58, No. 1. P. 380–392. <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.04.0221>
19. Tian H., Zhou Q., Liu W. et al. Responses of photosynthetic characteristics of oat flag leaf and spike to drought stress. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Article 917528. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.917528>
20. Juzoń K., Idziak-Helmcke D., Rojek-Jelonek M. et al. Functioning of the photosynthetic apparatus in response to drought stress in oat × maize addition lines. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21, No. 18. Article 6958. <https://doi.org/10.3390/ijms21186958>
21. Farooq M., Bramley H., Palta J. A. et al. Heat stress in wheat during reproductive and grain-filling phases. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2011. Vol. 30, No. 6. P. 491–507. <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.615687>
22. Ruban A. V., Johnson M. P., Duffy C. D. P. The photoprotective molecular switch in the photosystem II antenna. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Bioenergetics*. 2012. Vol. 1817, No. 1. P. 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2011.04.007>
23. Long S. P., Zhu X. G., Naidu S. L. et al. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? *Plant, Cell & Environment*. 2006. Vol. 29, No. 3. P. 315–330. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01493.x>
24. Govindjee. Sixty-three years since Kautsky: Chlorophyll a fluorescence. *Australian Journal of Plant Physiology*. 1995. Vol. 22, No. 2. P. 131–160. <https://doi.org/10.1071/PP9950131>
25. Prysiazniuk O., Kononiuk N., Zatserkovna N. et al. The study of drought stress in sugar beet and the ways of its minimization. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. Vol. 24, No. 1. P. 256–263. <https://doi.org/10.12912/27197050/154924>
26. Brestic M., Zivcak M., Kalaji H. M. et al. Photosystem II thermostability in situ: Environmentally induced acclimation and genotype specific reactions in *Triticum aestivum* L. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2012. Vol. 57. P. 93–105. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.05.012>
27. Coffel E. D., Horton R. M., Sherbinin A. Temperature and humidity based projections of a rapid rise in global heat stress exposure during the 21st century. *Environmental Research Letters*. 2018. Vol. 13. Article 014001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa00e>
28. Djanaguiraman M., Narayanan S., Erdayani E. et al. Effect of high temperature stress during anthesis and grain filling periods on photosynthesis, lipids and grain yield in wheat. *BMC Plant Biology*. 2020. Vol. 20. Article 268. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02479-0>
29. Mathur S., Agrawal D., Jajoo A. Photosynthesis: Response to high temperature stress. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2014. Vol. 137. P. 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.01.010>
30. Baker N. R. Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*. 2008. Vol. 59. P. 89–113. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759>
31. Дослідна справа в агрономії. Кн. 1: Теоретичні аспекти дослідної справи / за ред. А. О. Рожкова. Харків : Майдан, 2016. 316 с.
32. Romanov V., Fedak V., Galelyuka I. et al. Portable fluorometer for express-diagnostics of photosynthesis: Principles of operation and results of experimental researches. In: *Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2007)*. 2007. P. 570–573.
33. Voronenko O. Fluorometer “FLS 10s”. *Cybernetics and Computer Technologies*. 2024. Vol. 3, No. 3. P. 87–95. <https://doi.org/10.34229/2707-451X.24.3.9>
34. Maxwell K., Johnson G. N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *Journal of Experimental Botany*. 2000. Vol. 51, No. 345. P. 659–668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>
35. Prysiazniuk O., Maliarenko O., Biliavska L. et al. Measuring and alleviating drought stress in pea and lentil. *Agronomy Research*. 2023. Vol. 21, No. 3. P. 560–576. <https://doi.org/10.15159/AR.23.023>

## References

1. Bearss, L. S., Hayden, Z., Chilvers, M. I., & Steinke, K. (2026). Integrating starter fertilizer, fungicide timing, and late-season nitrogen strategies for winter wheat. *Agronomy Journal*, 118(1), Article e70292. <https://doi.org/10.1002/agj2.70292>
2. Mazurenko, B., Kalenska, S., Honchar, L., & Hrygirevskiy, M. (2021). Formation of productive elements in winter wheat by seed dressing application with slow-release complex fertilisers. *Plant and Soil Science*, 12(4), 7–16. <https://doi.org/10.31548/agr2021.04.0007>
3. Fábíán, A., Sáfrán, E., Szabó-Eitel, G., Barnabás, B., & Jäger, K. (2019). (2019). Stigma functionality and fertility are reduced by heat and drought co-stress in wheat. *Frontiers in Plant Science*, 10, Article 244. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00244>
4. Kalenska, S. (2022). Food security and innovation solutions in crop production. *Plant and Soil Science*, 13(2), 14–26. [https://doi.org/10.31548/agr.13\(2\).2022.14-26](https://doi.org/10.31548/agr.13(2).2022.14-26)
5. Bielashov, O., Rozhkov, A., Kalenska, S., Karpuk, L., Marenych, M., Kuts, O., Zaitseva, I., Romanov, O., & Muzafarov, N. (2022). Influence of pre-sowing application of mineral fertilizers, root and foliar nutrition on productivity of winter triticale plants. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23(6), 1–14. <https://doi.org/10.12912/27197050/152118>
6. Novytska, N., Gadzovskiy, G., Mazurenko, B., Kalenska, S., Svistunova, I., & Martynov, O. (2020). Effect of seed inoculation and foliar fertilizing on structure of soybean yield and yield structure in Western Polissya of Ukraine. *Agronomy Research*, 18(4), 2512–2519. <https://doi.org/10.15159/ar.20.203>
7. Smith, N. G., Keenan, T. F., Colin Prentice, I., Wang, H., Wright, I. J., Niinemets, Ü., Crous, K. Y., Domingues, T. F., Guerrieri, R., Yoko Ishida, F., Kattge, J., Kruger, E. L., Maire, V., Rogers, A., Serbin, S. P., Tarvainen, L., Togashi, H. F., Townsend, P. A., Wang, M., ... Zhou, S. (2019). Global photosynthetic capacity is optimized to the environment. *Ecology Letters*, 22(3), 506–517. <https://doi.org/10.1111/ele.13210>
8. Song, X., Zhou, G., Ma, B. L., Wu, W., Ahmad, I., Zhu, G., Yan, W., & Jiao, X. (2019). Nitrogen application improved photosynthetic productivity, chlorophyll fluorescence, yield and yield components of two oat genotypes under saline conditions. *Agronomy*, 9(3), Article 115. <https://doi.org/10.3390/agronomy9030115>
9. Lawlor, D. W. (1995). Photosynthesis, productivity and environment. *Journal of Experimental Botany*, 46(Sp. Iss.), 1449–1461. [https://doi.org/10.1093/jxb/46.special\\_issue.1449](https://doi.org/10.1093/jxb/46.special_issue.1449)
10. Chen, Y.-E., Su, Y.-Q., Zhang, C.-M., Ma, J., Mao, H.-T., Yang, Z.-H., Yuan, M., Zhang, Z.-W., Yuan, S., & Zhang, H.-Y. (2017). Comparison of photosynthetic characteristics and antioxidant systems in different wheat strains. *Journal of Plant Growth Regulation*, 37(2), 347–359. <https://doi.org/10.1007/s00344-017-9731-5>
11. Zhang, C. J., Chen, G. X., Gao, X. X., & Chu, C. J. (2006). Photosynthetic decline in flag leaves of two field-grown spring wheat cultivars with different senescence properties. *South African Journal of Botany*, 72(1), 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2005.03.002>
12. Hu, L., Zhang, Y., Xia, H., Fan, S., Song, J., & Lv, X. (2019). Photosynthetic characteristics of non-foliar organs in main C<sub>3</sub> cereals. *Physiologia Plantarum*, 166(1), 226–239. <https://doi.org/10.1111/ppl.12838>
13. Baslam, M., Mitsui, T., Hodges, M., Priesack, E., Herritt, M. T., Aranjuelo, I., & Sanz-Sáez, Á. (2020). Photosynthesis in a changing global climate: Scaling up and scaling down in crops. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 882. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00882>
14. Prysiazniuk, O., Maliarenko, O., Penkova, S., & Voronenko, O. (2026). Evaluation of the nutrient status of *Miscanthus × giganteus* cultivated on chernozems in Ukraine. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 72(1), 1–18. <https://doi.org/10.1080/03650340.2025.2598978>
15. Barlow, K. M., Christy, B. P., O'Leary, G. J., Riffkin, P. A., & Nuttall, J. G. (2015). Simulating the impact of extreme heat and frost events on wheat crop production: A review. *Field Crops Research*, 171, 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.11.010>
16. Morales, F., Ancín, M., Fakhet, D., González-Torralba, J., Gámez, A. L., & Seminario, A. (2020). Photosynthetic metabolism under stressful growth conditions as a basis for crop breeding and yield improvement. *Plants*, 9(1), Article 88. <https://doi.org/10.3390/plants9010088>
17. Blum, A. (1986). The effect of heat stress on wheat leaf and ear photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, 37(1), 111–118. <https://doi.org/10.1093/jxb/37.1.111>
18. Aliqing, S., Somayanda, I., Sebastian, S. V., Singh, K., Gill, K., Prasad, P. V. V., & Jagadish, S. V. K. (2018). Heat stress during flowering affects time of day of flowering, seed set, and grain quality in spring wheat. *Crop Science*, 58(1), 380–392. <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.04.0221>
19. Tian, H., Zhou, Q., Liu, W., Zhang, J., Chen, Y., Jia, Z., Shao, Y., & Wang, H. (2022). Responses of photosynthetic characteristics of oat flag leaf and spike to drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 917528. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.917528>

20. Juzoń, K., Idziak-Helmcke, D., Rojek-Jelonek, M., Warzecha, T., Warchoń, M., Czyczyło-Mysza, I., Dziurka, K., & Skrzypek, E. (2020). Functioning of the photosynthetic apparatus in response to drought stress in oat × maize addition lines. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(18), Article 6958. <https://doi.org/10.3390/ijms21186958>
21. Farooq, M., Bramley, H., Palta, J. A., & Siddique, K. H. M. (2011). Heat stress in wheat during reproductive and grain-filling phases. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30(6), 491–507. <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.615687>
22. Ruban, A. V., Johnson, M. P., & Duffy, C. D. P. (2012). The photoprotective molecular switch in the photosystem II antenna. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Bioenergetics*, 1817(1), 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2011.04.007>
23. Long, S. P., Zhu, X. G., Naidu, S. L., & Ort, D. R. (2006). Can improvement in photosynthesis increase crop yields? *Plant, Cell & Environment*, 29(3), 315–330. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01493.x>
24. Govindjee. (1995). Sixty-three years since Kautsky: Chlorophyll a fluorescence. *Australian Journal of Plant Physiology*, 22(2), 131–160. <https://doi.org/10.1071/PP9950131>
25. Prysiazniuk, O., Kononiuk, N., Zatserkovna, N., Chynchyk, O., Hryhoriev, V., Zhemoyda, V., Ovcharuk, O., Zinchenko, O., Morhun, O., & Svystunova, I. (2023). The study of drought stress in sugar beet and the ways of its minimization. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24(1), 256–263. <https://doi.org/10.12912/27197050/154924>
26. Brestic, M., Zivcak, M., Kalaji, H. M., Carpentier, R., & Allakhverdiev, S. I. (2012). Photosystem II thermostability in situ: Environmentally induced acclimation and genotype specific reactions in *Triticum aestivum* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, 57, 93–105. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.05.012>
27. Coffel, E. D., Horton, R. M., & Sherbinin, A. (2018). Temperature and humidity based projections of a rapid rise in global heat stress exposure during the 21st century. *Environmental Research Letters*, 13, Article 014001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa00e>
28. Djanaguiraman, M., Narayanan, S., Erdayani, E., & Prasad, V. V. (2020). Effect of high temperature stress during anthesis and grain filling periods on photosynthesis, lipids and grain yield in wheat. *BMC Plant Biology*, 20, Article 268. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02479-0>
29. Mathur, S., Agrawal, D., & Jajoo, A. (2014). Photosynthesis: Response to high temperature stress. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 137, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.01.010>
30. Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 89–113. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759>
31. Rozhkov, A. O. (Ed.). (2016). *Research work in agronomy: Book 1. Theoretical aspects of research work*. Maidan. [In Ukrainian]
32. Romanov, V., Fedak, V., Galelyuka, I., Sarakhan, Ye., & Skrypnyk, O. (2007, September 6–8). Portable fluorometer for express-diagnostics of photosynthesis: Principles of operation and results of experimental researches. In *Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2007)* (pp. 570–573). IEEE.
33. Voronenko, O. (2024). Fluorometer “FLS 10s”. *Cybernetics and Computer Technologies*, 3(3), 87–95. <https://doi.org/10.34229/2707-451X.24.3.9>
34. Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence—A practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659–668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>
35. Prysiazniuk, O., Maliarenko, O., Biliavska, L., Voitovska, V., Kononenko, L., Klymovych, N., Poltoretska, N., Strilets, O., & Voievoda, L. (2023). Measuring and alleviating drought stress in pea and lentil. *Agronomy Research*, 21(3), 560–576. <https://doi.org/10.15159/AR.23.023>

UDC 633.11"324":632.11:631.53.01

**Sonko, R. V., & Kalenska, S. M.** (2026). Management of winter wheat productivity through stress diagnosis via chlorophyll fluorescence under variable weather conditions and seed inoculation. *Advanced Agritechnologies*, 14(1). <https://doi.org/10.47414/na.14.1.2026.354980> [In Ukrainian]

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony St., Kyiv, 03041, Ukraine, e-mail: sonkoroman@gmail.com, svitlana.kalenska@gmail.com*

**Aim.** To establish the peculiarities of the photosynthetic activity of winter wheat under stress conditions caused by high maximum air temperatures and lack of precipitation; to diagnose the state of plants by indicators of chlorophyll fluorescence induction intensity; and to determine the efficiency of seed bioinoculant application in reducing plant stress. **Methods.** Field and laboratory studies were conducted in 2020–2022. Field experiments were laid out in the long-term crop rotation of the Department of Crop Production at the Separate Subdivision of NULES of Ukraine “Agronomic Research Station” on typical low-humus, coarse-silty light loam chernozem. The efficiency of different rates of the preparation Rizomax (from 1 to 3 l/t) for seed inoculation was studied against the background of fertiliser Actibion (100 kg/ha). The intensity of chlorophyll fluorescence induction (CFI) was determined using the portable

fluorometer “Floratest”. Leaf area index (LAI) was measured by the “cut-outs” method. **Results.** LAI during the years of research closely correlated with weather conditions and depended on fertilisers and the mycorrhizal seed inoculant applied at different rates. The average LAI of winter wheat crops during 2020–2022 ranged from 34.4 thousand m<sup>2</sup>/ha in the control variant at BBCH 56–58 to 53.6 thousand m<sup>2</sup>/ha at BBCH 64–66. Weather conditions of the spring-summer vegetation period of winter wheat varied considerably between years. Maximum air temperatures in May–July ranged from 17.1°C (third decade of May 2020) to 34.6°C (third decade of June 2021). The weather conditions of 2022 were extremely critical both in terms of absence of precipitation and very high temperatures, which resulted in plants with critically low leaf area and the lowest wheat yield in the 2021–2022 growing season. Calculations of the maximum photochemical efficiency of Photosystem II allow conclusions to be drawn regarding the possibility of monitoring nutrient efficiency and stress factors affecting plants in real time and without sample destruction. The Fv/Fm ratio at micro-stages BBCH 56–58 in 2022 was 0.56–0.59 at BBCH 64–66 it was 0.58–0.64, and at BBCH 72–74 t was 0.56–0.63, which was significantly lower compared with the corresponding micro-stages in 2020 and 2021. At micro-stage BBCH 64–66 under the most favourable conditions of 2021, the Fv/Fm ratio in the control variant was 0.71, while with Actibion application it was 0.71, and with Rizomax seed inoculation it was 0.82–0.86. The stress-resistance effect increased with higher rates of Rizomax application. **Conclusions.** Rizomax, when applied in combination with Actibion fertiliser, enhances resistance to stress factors, such as drought and temperature fluctuations, stimulates leaf area formation, and increases winter wheat yield. Determination of chlorophyll fluorescence induction intensity can serve as a rapid, non-destructive method for monitoring the nutritional status of agricultural crops.

**Keywords:** LAI; chlorophyll fluorescence induction intensity; yield.

*Надійшла / Received 20.01.2026*

*Погоджено до друку / Accepted 16.03.2026*

*Опубліковано онлайн / Published online 28.05.2026*