

## ІНДИКАЦІЯ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ РІПАКУ ОЗИМОГО ЗА ПОКАЗНИКАМИ ІНДУКЦІЇ ФЛУОРЕСЦЕНЦІЇ ХЛОРОФІЛУ

**ЦИЦЮРА Я.Г.** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент

*orcid.org/0000-0002-9167-833X*

Вінницький національний аграрний університет

**ТОМЧУК О.М.** – аспірант

*orcid.org/0000-0003-3720-0519*

Вінницький національний аграрний університет

**Постановка проблеми.** Озимий ріпак відноситься до стратегічних для агропромислового сектору України сільськогосподарських культур багатодільового використання. Саме багатогранність культури зумовлена застосуванням основної і похідної продукції ріпаку озимого в харчовій, хімічній, біоенергетичній галузях та зумовлює пошук оптимального поєднання урожайного потенціалу високоінтенсивних сучасних сортів і гібридів ріпаку з оптимальними показниками якості отриманої сировини за основними технологічними та фізіолого-хімічними параметрами. Для досягнення даних цілей застосовуються різні важелі інтенсивних технологій вирощування культури з яких домінуючими є система удобрення та агротехнологічні рішення у способах обробітку ґрунту та контролю шкочинних організмів в агрофітоценозах культури. З огляду на це важливим чинником регулювання як рівня урожайності культури, так і якості отриманого насіння є конструювання системи удобрення з огляду на існуючі тенденції комбінованого поєднання макро- і мікроелементів в єдиному циклі з огляду на критичні фазофази ріпаку озимого [1–3]. Не дивлячись на відносно добру опрацьованість цього питання науковою спільнотою, наявність великої кількості різноманітних технологічних схем та їх варіантів утруднює процес оперативного прийняття рішень у цьому важливому аспекті технології вирощування ріпаку озимого та вимагає дієвих механізмів оцінки рівня адаптивності та «технологічної оптимальності» системи удобрення конкретно для певних ґрунтово-кліматичних умов та виробничих потужностей відповідного сільськогосподарського підприємства. Одним із таких методів оцінки у приміненні до ряду сільськогосподарських культур є метод флуоресценції хлорофілу з оцінкою стану фотосинтетичного апарату рослин за впливу відповідної системи удобрення [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Асиміляційна поверхня рослин є результируючою індикаційною системою, яка стало реагує на будь-які заходи технологічної оптимізації умов росту і розвитку рослин. Індукція флуоресценції хлорофілу у цьому плані розглядається як системний фізіологічний індикатор результируючого характеру, який є вираженням вказаної реакції на рівні фотосистеми рослин [5–7].

Флуоресценція хлорофілу – це показник, що дозволяє досліджувати в живих об'єктах протікання фотохімічних реакцій, пов'язаних з роботою фотосистеми II (ФСII), яка є найбільш чутливою до факторів зовніш-

нього середовища. Результати досліджень інтенсивності флуоресценції хлорофілу (ІФХ) сприяють більш глибокому розумінню регуляторних механізмів, що забезпечують ефективне перетворення енергії в первинних і наступних стадіях фотосинтезу [8–9]. Графік зміни індексу флуоресценції хлорофілу від моменту початку освітлювання до досягнення стаціонарного рівня несе інформацію про зміни стан фотосинтезуючого апарату листа рослини. Ці зміни протікають за час від декількох десятків секунд до декількох хвилин, в залежності від об'єкта та умов експерименту [9]. Часова залежність інтенсивності флуоресценції хлорофілу має характерний вигляд кривої з одним чи кількома максимумами і отримала назву кривої індукції флуоресценції хлорофілу (крива Каутського). Форма цієї кривої досить чутлива до змін, які відбуваються у фотосинтетичному апараті рослин при адаптації до різних умов середовища, що стало основою широкого використання ефекту Каутського в дослідженні фотосинтезу та реакції асиміляційного апарату рослин на різні агротехнологічні чинники зокрема добрива та засоби захисту [10].

Відомо, що певні відрізки кривої індукції флуоресценції хлорофілу є індикаторами відповідних фізіологічних процесів у ланцюзі фотосинтезу. Тому порушення окремих ланок фотосинтезу, які викликані екзо- та ендогенними чинниками, проявляються у характерних змінах відповідних відрізків кривої індукції флуоресценції хлорофілу [11].

Особливості індукції флуоресценції хлорофілу залежать від стану всієї системи фотосинтезу і відображають кінетику перебігу всіх ланок біохімічного ланцюга фотосинтезу [12]. Зміни у будь-якій ланці фотосинтезу призводять до зміни вигляду кривої індукції флуоресценції хлорофілу. Тому за виглядом цієї кривої можна діагностувати поточний стан фотосинтетичного апарату рослини, оцінювати зміни ефективності фотосинтезу при змінах світлового режиму, температури, вологості, застосування добрив та рістстимулюючих препаратів [8, 11]. При цьому вказується, що вплив на цей процес варіантів застосування макро- і мікроелементів, біологічних рістстимулюючих препаратів є питанням дискусійним, оскільки визначається природою і хімізмом вказаних речовин, їх фізіологічною активністю та строками застосування [13].

**Метою** досліджень було дослідити можливість застосування методології флуоресценції хлорофілу для оцінки оптимальності конструювання системи удобрення ріпаку озимого.

**Матеріали та методика досліджень.** Дослідження проводились у рамках вивчення оптимізації елементів технології вирощування ріпаку озимого на біоенергетичні потреби в умовах Правобережного Лісостепу України. Польові дослідження проводили впродовж 2022–2023 років на базі ТОВ «ВІН-АГРО ГРУП» відповідно до договору щодо проведення досліджень між даним підприємством і Вінницьким національним аграрним університетом у рамках виконання ініціативної тематики «Оптимізація адаптивних технологій вирощування хрестоцвітних культур в умовах Лісостепу правобережного» (№ д/р 0122U201054).

Досліди було закладено на сірих лісових ґрунтах. Агротехнологічна характеристика дослідного поля: рівний рельєф, тип ґрунту сірі лісові із такими властивостями: глибина гумусово-елювіального горизонту 30 см, колір сірий, низький вміст гумусу – 2,00% та лужногідролізованого азоту (за Корнфілдом) – 81 мг/кг ґрунту, підвищений вміст рухомого фосфору (за Мачигінім) – 171,9 мг/кг ґрунту та підвищений обмінного калію (за Чиріковим) – 129 мг/кг ґрунту. Емність катіонного обміну – 19,5 мг.-екв. на 100 г ґрунту, рН 6,3–7,0.

Погодні умови за вегетаційний період сезонів 2021/2022 та 2022/2023 року характеризувались задовільно-оптимальними режимами для ростових процесів та органогенезних перетворень рослин ріпаку озимого із певною пролонгацією міжфазних вегетаційних періодів у весняно-літній період вегетації культури та певних ефектів прискореного дозрівання за рахунок підвищеного режиму середньодобових температур у період дозрівання насіння в умовах сезону 2022/2023 року. Екстремально низькі температури відмічено у період кінця грудня– другої декади січня за рівня  $-12,0$  °С для сезону 2021/2022 року та  $-9$  –  $-11,0$  °С для сезону 2022/2023 року.

Програмою досліджень було передбачено закладення одного багатофакторного польового дослідження якого представлена у табл. 1. Повторність у досліді чотирьохразова. Розміщення варіантів – систематичне у два яруси. Площа облікової дослідної ділянки – 50 м<sup>2</sup>, загальної – 60 м<sup>2</sup>.

Сівбу проводили у кінці третьої декади серпня нормою 500 тис. насінин/га з міжрядям 35 см. Після сівби застосовували коткування. У дослідженнях використано два високоінтенсивних гібриди ріпаку озимого – середньостиглий Абсолют (Limagrain) та середньоранній Домінатор (DSV).

Для захисту проти шкочинних організмів на обох сортах застосовувались наступні варіанти хімічного захисту: у фазі 2 листочки гербіцид Бутізан Авант (2,5 л/га) + через 5 днів кіллітоп (1,5 л/га) (циперметрин 50 г/л + хлор пірифос 500 г/л) проти підгризаючих совок + інсектицид інстрайкер (0,2 л/га) у фазі 7–8 листочків + після відновлення вегетації проти комплексу хвороб та шкідників Дерозал (карбендазим 500 г/л, 1 л/га) та Еванс (0,15 л/га) + у фазу бутонізації Кларк (0,4 кг/га), Вето (0,5 л/га), Інстрайкер (0,2 л/га) + на фазу середини цвітіння проти ріпакового квіткоїда Піктор (0,4 л/га) та Біская (0,5 л/га).

Попередник у всіх варіантах досліді озима пшениця. Проводився основний обробіток ґрунту після збирання попередника, він передбачав дискування на глибину 6–8 см та оранку на глибину 23–25 см.

Передпосівний обробіток ґрунту передбачав культивування на глибину загортання насіння.

Для обліку показників індукції флуоресценції хлорофілу застосовано портативний флуорометр «Флоратест» відповідно до визначених регламентів застосування приладу [12–14] при загальній експозиції функціонального вимірювання 3 хвилини. Листові пластинки для вимірювання брались на фазу цвітіння (ВВСН 64–65) з огляду на фенологічні дати застосування варіантів удобрення у системі факторів досліді з ідентичних ярусів за висотою стебла з розрахунку 25 для кожного повторення при 4-х разовому повторенні. Вимірюванню передувала темнова адаптація листка тривалістю 10 хвилин.

В ході експериментів аналізували загальноприйняті показники кривої індексу флуоресценції хлорофілу (ІФХ, рис. 1) [8–11]:  $F_0$  – мінімальна флуоресценція,  $F_{pi}$  – величина «плато» індукції флуоресценції,  $F_m$  – максимальна флуоресценція,  $F_{st}$  – флуоресценція в стаціонарному стані. Похідні показники кривої ІФХ представлено в таблиці 2.

**Результати досліджень.** Відповідно до представлених результатів (табл. 3) фотосистема рослин озимого ріпаку продемонструвала індикаційну чутливу реакцію на зміну інтенсифікація застосування фонового удобрення та технологічного поєднання рістрегулюючих препаратів та мікродобрив. При цьому, зміна структури фонового живлення очевидно вплинула позитивно на загальні темпи ростових процесів рослин ріпаку озимого та стан перезимівлі, а застосування мікродобрив позитивно відобразилось на власне їх фотосистемі з позиції таких показників як фізіологічна активність, життєздатність пластид, хлорофільний індекс що підтверджується позитивними приростами величини базових показників кривої ІФХ ( $F_0$ ,  $F_{pi}$ ,  $F_m$ ,  $F_{st}$ ) та узгоджується з аналогічними вивченнями на різних сільськогосподарських культурах [16] в тому числі і на ріпаку [17–20].

Критерій  $F_0$  визначає загальну активність фотосистеми листків рослин. Нижче його значення вказує на сповільненість реакційних центрів у плані ФАР збудження та швидкості імплементації передачі енергії в даних центрах [8, 9]. Зміна системи фонового удобрення у співставленні варіантів  $B_2$  та  $B_1$  вплинула на підвищення на 6,0% даного показника, що підтверджує позитивну дію як сірковмісних добрив, так і застосування рідких форм азотних добрив по мерзло-талому ґрунті відмічену у ряді досліджень [2, 3] Вплив застосування рістрегулюючих речовин за усереднення показника для варіантів  $C_1$  та  $C_2$  формування початкової флуоресценції хлорофілу ( $F_0$ ) не мав істотних відмінностей. Що на нашу думку пояснюється специфічністю рістрегуляторів ретардатної природи, які визначають морфогенез органів рослини а не фізіологічну активність фотосистеми, що відмічено в дослідженнях Зузи С.Г. та ін [16]. Застосування системи позакоренових підживлень мало найвищу істотність різнецевого ефекту у співставленні

Таблиця 1

Схема досліду з вивчення впливу комбінованої системи удобрення ріпаку озимого на реалізацію його урожайного потенціалу та формування показників якості насіння

| Гібрид (чинник А)  | Фонове удобрення (чинник В)   | Застосування регуляторів росту у тому числі з комплексним фунгіцидним ефектом (чинник С)  | Позакореневе підживлення мікродобривами (чинник D)   |  |
|--|---|---|--|--|
| Абсолют (Limagrain) (A <sub>1</sub> )<br><br>Домінатор (DSV) (A <sub>2</sub> ) | Базовий (В <sub>1</sub> ) (ВВСН 00: Діамофоска N-9% P-25% K-25% (100 кг/га) + Росаферт 5-10-25 (120 кг/га); ВВСН 19-20 (по мерзлоталому ґрунту): Росаферт NPK 16-14-07 (100 кг/га) + карбамід (150 кг/га)<br><br>Норма внесення для варіанту – N <sub>100</sub> P <sub>51</sub> K <sub>62</sub>   | Контроль (без обробки) (С <sub>1</sub> )  | (D <sub>1</sub> ) Без підживлення  |  |
|  |   |   | (D <sub>2</sub> ) Розалік (В, Мо, S) (1 л/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га) (ВВСН 31-34))   |  |
|  |   |   | (D <sub>3</sub> ) Розасоль 18-18-18+МЕ (3 кг/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га) (ВВСН 51-53))  |  |
|  |   |   | (D <sub>4</sub> ) Розалік (В, Мо, S) (1 л/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га) (ВВСН 31-34)) + Розасоль 18-18-18+МЕ (3 кг/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га) (ВВСН 51-53)) |  |
|  | Поліпшений (В <sub>2</sub> ) (ВВСН 00: Діамофоска N-9% P-25% K-25% (100 кг/га) + Росаферт 5-10-25+10S (120 кг/га); ВВСН 19-20 (по мерзлоталому ґрунту): Росаферт NPK 16-14-07 (100 кг/га) + КАС-32 (200 л/га) + Тіосульфат амонію (30 л/га)<br><br>Норма внесення для варіанту – N <sub>100</sub> P <sub>51</sub> K <sub>62</sub> S <sub>22</sub> | ВВСН 14-18: Регулятор Букат ((тебеконазол 500 гр/л) (0,35 л/га)); ВВСН 35-39: Карамба Турбо 0,65 л/га + Букат 0,35 л/га (С <sub>2</sub> ) | Контроль (без обробки) (С <sub>1</sub> )   | (D <sub>1</sub> ) Без підживлення  |
|  |   |   |  | (D <sub>2</sub> ) Розалік (В, Мо, S) (1 л/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га) (ВВСН 31-34))   |
|  |   |   |  | (D <sub>3</sub> ) Розасоль 18-18-18+МЕ (3 кг/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га) (ВВСН 51-53))  |
|  |   |   |  | (D <sub>4</sub> ) Розалік (В, Мо, S) (1 л/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га) (ВВСН 31-34)) + Розасоль 18-18-18+МЕ (3 кг/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га) (ВВСН 51-53)) |

\* – фаза розвитку озимого ріпаку за шкалою ВВСН.

значення показника  $F_0$  для варіантів застосування мікродобрив по відношенню до контрольного варіанту. Так у послідовному ряду варіантів досліду D<sub>2</sub>–D<sub>3</sub>–D<sub>4</sub> прирости становили 2,8%, 4,4% та 5,7% відповідно.

Показник  $F_{pl}$  (флуоресценція зони «плато») є індикатором інтенсивності передачі сигналів фотосистеми по реакційних центрах (РЦ), які не передають енергію на електрон-транспортний ланцюг [9]. По своїй суті це певний рубіж сповільнення кривої ІФХ та визначає специфічну організацію власне фотосистеми рослин. Відмічається [6], що додаткове мінеральне живлення за рахунок стабілізуючої оптимізації фотосистеми та зростання концентрації хлорофілу сприяє більш високому ординатному значенні цієї точки. Такі висновки

підтверджено у наших дослідженнях у варіанті застосування позакореневих підживлень де вже згадуваний варіант приростів у ряду варіантів D<sub>2</sub>–D<sub>3</sub>–D<sub>4</sub> становив 3,9%, 6,3% та 9,8% відповідно. Відмічено і специфічний прояв формування даного показника у варіанті застосування рістрегулюючих препаратів (чинник С). При застосуванні даних препаратів (чинник С<sub>2</sub>) з усередненням по досліді відмічено загальне зниження величини  $F_{pl}$  майже на 1%, що ще раз підтверджує специфічність дії ретардатних речовин у нашому випадку на формування фотосистеми рослин.

Динаміка формування величини показника максимальної флуорисценції  $F_m$ , який характеризує потенційну продуктивність фотосинтезу рослин мав специ-

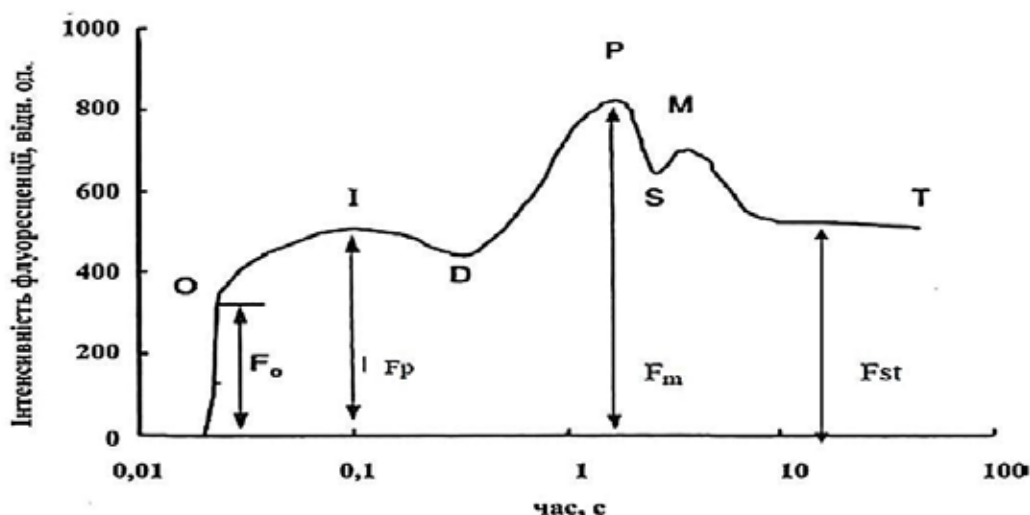


Рис. 1. Типова крива індукції флуоресценції хлорофілу Каутського і Гірша:  $F_0$  – початкове значення індукції флуоресценції після включення опромінення;  $F_p$  (або  $F_{pl}$ ) – «плато» індукції флуоресценції;  $F_m$  – максимальне значення індукції флуоресценції;  $F_{st}$  – стаціонарне значення індукції флуоресценції після світлової адаптації листка рослини [9]

Таблиця 2

Похідні індексні показники кривої ІФХ (відповідно до протоколу аналізу кривої флуоресценції хлорофілу [8–11])

| Індекси кривої ІФХ   | Формули для визначення                 |
|--|--|
| Зростання флуоресценції  | $dF_{pl} = F_{pl} - F_0$               |
| Максимальна змінна флуоресценція                               | $F_v = F_m - F_0$                      |
| 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 ( $V_t$ )         | $V_t = \frac{F_{st} - F_0}{F_m - F_0}$ |

Таблиця 3

Показники кривої ІФХ залежно від варіантів удобрення ріпаку озимого на фазу цвітіння (ВВСН 64–65) (середнє за 2022–2023 рр. у відносних одиницях еталона флуоресценції)\*\*

| Фонове удобрення (В)* | Регулятори росту (С) | Варіант підживлення (D)  | F <sub>0</sub>        | F <sub>pl</sub>       | F <sub>m</sub>        | F <sub>st</sub>       | dF <sub>pl</sub> | F <sub>v</sub>         | dF <sub>pl</sub> /F <sub>v</sub> | EP                   |
|-----------------------|----------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|------------------------|----------------------------------|----------------------|
| B <sub>1</sub>        | C <sub>1</sub>       | D <sub>1</sub>   | 430                   | 484                   | 1649                  | 520                   | 54               | 1219                   | 0,044                            | 0,739                |
|                       |                      | D <sub>2</sub>   | 441                   | 502                   | 1791                  | 561                   | 61               | 1350                   | 0,045                            | 0,754                |
|                       |                      | D <sub>3</sub>   | 449                   | 520                   | 1864                  | 569                   | 71               | 1415                   | 0,050                            | 0,759                |
|                       |                      | D <sub>4</sub>   | 451                   | 538                   | 1898                  | 587                   | 87               | 1447                   | 0,060                            | 0,762                |
|                       | C <sub>2</sub>       | D <sub>1</sub>   | 438                   | 477                   | 1727                  | 529                   | 39               | 1289                   | 0,030                            | 0,746                |
|                       |                      | D <sub>2</sub>   | 440                   | 487                   | 1788                  | 540                   | 47               | 1348                   | 0,035                            | 0,754                |
|                       |                      | D <sub>3</sub>   | 445                   | 495                   | 1927                  | 560                   | 50               | 1482                   | 0,034                            | 0,769                |
|                       |                      | D <sub>4</sub>   | 451                   | 505                   | 1981                  | 574                   | 54               | 1530                   | 0,035                            | 0,772                |
| B <sub>2</sub>        | C <sub>1</sub>       | D <sub>1</sub>   | 442                   | 459                   | 1837                  | 529                   | 17               | 1395                   | 0,012                            | 0,759                |
|                       |                      | D <sub>2</sub>   | 467                   | 488                   | 1979                  | 560                   | 21               | 1512                   | 0,014                            | 0,764                |
|                       |                      | D <sub>3</sub>   | 477                   | 501                   | 2093                  | 589                   | 24               | 1616                   | 0,015                            | 0,772                |
|                       |                      | D <sub>4</sub>   | 486                   | 529                   | 2178                  | 608                   | 43               | 1692                   | 0,025                            | 0,777                |
|                       | C <sub>2</sub>       | D <sub>1</sub>   | 459                   | 487                   | 1958                  | 563                   | 28               | 1499                   | 0,019                            | 0,766                |
|                       |                      | D <sub>2</sub>   | 471                   | 505                   | 2022                  | 579                   | 34               | 1551                   | 0,022                            | 0,767                |
|                       |                      | D <sub>3</sub>   | 475                   | 512                   | 2155                  | 594                   | 37               | 1680                   | 0,022                            | 0,780                |
|                       |                      | D <sub>4</sub>   | 481                   | 521                   | 2289                  | 619                   | 40               | 1808                   | 0,022                            | 0,790                |
| <b>B</b>              | <b>C</b>             | <b>D</b>   | <b>L<sub>wp</sub></b> | <b>Q<sub>ue</sub></b> | <b>RF<sub>d</sub></b> | <b>K<sub>ef</sub></b> | <b>QP</b>        | <b>K<sub>прп</sub></b> | <b>K<sub>fd</sub></b>            | <b>V<sub>t</sub></b> |
| B <sub>1</sub>        | C <sub>1</sub>       | D <sub>1</sub>   | 3,83                  | 0,353                 | 2,171                 | 0,315                 | 0,926            | 2,835                  | 3,171                            | 0,074                |
|                       |                      | D <sub>2</sub>   | 4,06                  | 0,327                 | 2,193                 | 0,313                 | 0,911            | 3,061                  | 3,193                            | 0,089                |
|                       |                      | D <sub>3</sub>   | 4,15                  | 0,317                 | 2,276                 | 0,305                 | 0,915            | 3,151                  | 3,276                            | 0,085                |
|                       |                      | D <sub>4</sub>   | 4,21                  | 0,312                 | 2,233                 | 0,309                 | 0,906            | 3,208                  | 3,233                            | 0,094                |
|                       | C <sub>2</sub>       | D <sub>1</sub>   | 3,94                  | 0,340                 | 2,265                 | 0,306                 | 0,929            | 2,943                  | 3,265                            | 0,071                |
|                       |                      | D <sub>2</sub>   | 4,06                  | 0,326                 | 2,311                 | 0,302                 | 0,926            | 3,064                  | 3,311                            | 0,074                |
|                       |                      | D <sub>3</sub>   | 4,33                  | 0,300                 | 2,441                 | 0,291                 | 0,922            | 3,330                  | 3,441                            | 0,078                |
|                       |                      | D <sub>4</sub>   | 4,39                  | 0,295                 | 2,451                 | 0,290                 | 0,920            | 3,392                  | 3,451                            | 0,080                |
| B <sub>2</sub>        | C <sub>1</sub>       | D <sub>1</sub>   | 4,16                  | 0,317                 | 2,473                 | 0,288                 | 0,938            | 3,156                  | 3,473                            | 0,062                |
|                       |                      | D <sub>2</sub>   | 4,24                  | 0,309                 | 2,534                 | 0,283                 | 0,938            | 3,238                  | 3,534                            | 0,062                |
|                       |                      | D <sub>3</sub>   | 4,39                  | 0,295                 | 2,553                 | 0,281                 | 0,931            | 3,388                  | 3,553                            | 0,069                |
|                       |                      | D <sub>4</sub>   | 4,48                  | 0,287                 | 2,582                 | 0,279                 | 0,928            | 3,481                  | 3,582                            | 0,072                |
|                       | C <sub>2</sub>       | D <sub>1</sub>   | 4,27                  | 0,306                 | 2,478                 | 0,288                 | 0,931            | 3,266                  | 3,478                            | 0,069                |
|                       |                      | D <sub>2</sub>   | 4,29                  | 0,304                 | 2,492                 | 0,286                 | 0,930            | 3,293                  | 3,492                            | 0,070                |
|                       |                      | D <sub>3</sub>   | 4,54                  | 0,283                 | 2,628                 | 0,276                 | 0,929            | 3,537                  | 3,628                            | 0,071                |
|                       |                      | D <sub>4</sub>   | 4,76                  | 0,266                 | 2,698                 | 0,270                 | 0,924            | 3,759                  | 3,698                            | 0,076                |
| HIP <sub>05</sub>     | F <sub>0</sub>       | A 4,40; B 3,39; C 3,39; D 5,25; AB 6,68; AC 6,68; AD 9,90; BC 5,25; BD 7,88; CD 7,88; ABC 9,90; ABD 14,46; ACD 14,46; BCD 11,61; ABCD 20,91            |                       |                       |                       |                       |                  |                        |                                  |                      |
|                       | F <sub>pl</sub>      | A 4,76; B 3,68; C 3,68; D 5,66; AB 7,18; AC 7,18; AD 10,62; BC 5,66; BD 8,47; CD 8,47; ABC 10,62; ABD 15,47; ACD 15,47; BCD 12,43; ABCD 22,33          |                       |                       |                       |                       |                  |                        |                                  |                      |
|                       | F <sub>m</sub>       | A 16,57; B 13,32; C 13,32; D 19,30; AB 23,88; AC 23,88; AD 34,23; BC 19,30; BD 27,75; CD 27,75; ABC 34,23; ABD 48,87; ACD 48,87; BCD 39,70; ABCD 69,56 |                       |                       |                       |                       |                  |                        |                                  |                      |
|                       | F <sub>st</sub>      | A 3,00; B 2,24; C 2,24; D 3,63; AB 4,69; AC 4,69; AD 7,09; BC 3,63; BD 5,59; CD 5,59; ABC 7,09; ABD 10,48; ACD 10,48; BCD 8,36; ABCD 15,28             |                       |                       |                       |                       |                  |                        |                                  |                      |

\* – річні умови у системі багатofакторного дисперсійного аналізу використано як додатковий чинник;

\*\* – за системної подібності отриманих результатів у статті наведено показники для сорту Абсолют.

фічну динаміку змін у межах варіантів досліджу. Значення F<sub>m</sub> позитивно корелює із загальною ефективністю фотосистеми рослин при передачі збуджуючого сигналу у донорно-акцепторній фізіологічній схемі фотосистеми

листка рослин [9]. Відмічено позитивні прирости показника на 12,9% за інтенсифікації та оптимізації фонового мінерального живлення (чинник B<sub>2</sub>) на 3,6% при застосуванні рістерегулюючих речовин, та послідовного макси-

мального приросту на 16,4% у варіанті максимального комбінованого поєднання всіх варіантів.

Підтверджуються вище зроблені висновки і результати оцінки ще одного базового критерію кривої ІФХ –  $F_{st}$ . Ступінь зниження рівня флуоресценції хлорофілу від максимального ( $F_m$ ) до стаціонарного ( $F_{st}$ ) часто використовують як інтегральний показник активності фотосинтетичного апарату рослин [4, 5, 13]. Зростання цього показника вказує на гальмування відтоку відновлених фотопродуктів від реакційних центрів внаслідок несприятливих факторів середовища [7]. За нашими оцінками формування даного показника було близьким до показника  $F_0$ , що ми пояснюємо особливістю його формування, що визначається умовами взаємодії фізіологічних аспектів фотосистеми обумовлених генетичною природою у взаємодії із абіотичними чинниками довкілля, відмічену у ряді досліджень [7, 11, 12]. Так, максимальне значення  $F_{st}$  зафіксовано у варіанті максимального поєднання варіантів оптимізації удобрення ( $B_2-C_2-D_4$ ) 619 відносних одиниць еталона флуоресценції з приростом до варіанту мінімальної інтенсифікації ( $B_1-C_1-D_1$ ) 11,5%.

Вагому інформативність щодо ефективності вивчаємих варіантів удобрення засвідчили і похідні показники кривої ІФХ на підставі базових показників представлені у таблиці 3. Так показник  $F_v$ , який визначає амплітуду переходу від початку кривої ІФХ до її максимального значення ( $F_m$ ) та визначає швидкість реакції реакційних центрів фотосистеми на фотосинтезуюче збудження [13] продемонстрував послідовне динамічне зростання у межах 15,1% у співсталенні варіантів  $B_2$  і  $B_1$ , 4,6% у співставленні варіантів  $C_2$  і  $C_1$  та 19,9% у співставленні варіантів  $D_1$  та  $D_4$ .

Показник  $L_{wp}$ , який характеризує водний потенціал листка та визначає стійкість асиміляційного апарату рослин до атмосферної посухи та низьких значень відносної вологості повітря [7] мав динамічний стабільний ріст у розрізі варіантів досліді у таких значеннях для пар співставлення  $B_2$  і  $B_1$  – 6,6%,  $C_2$  і  $C_1$  – 3,2%,  $D_1$  і  $D_4$  – 10,1%.

Показник  $RF_d$ , який визначає рівень життєздатності агроценозу за певного технологічного його конструювання [16, 17] істотно підвищувався за послідовного додавання заходів оптимізації живлення ріпаку озимого та мав максимальне значення на рівні 2,698 умовних одиниць флуоресценції на варіанті з комплексним застосуванням всіх факторів такої оптимізації з приростом до контролю за їх повної відсутності у значенні 24,3%. При цьому за рахунок зниження темпів квантового гасіння індукції флуоресценції хлорофілу (показник  $Q_{ue}$ ) (зниження в інтервалі 4–12%), зниження на 1–3% рівня квантового виходу енергії (показник  $QP$ ) згідно із рядом досліджень [8, 9] – загальна тривалість зміни флуоресценції для варіантів із поєднанням варіантів досліді  $B_2-C_2-D_4$  має істотно менші значення, що характеризує стан фотосистеми як реакційно більш ефективний, ніж у варіанті без застосування факторів оптимізації удобрення.

За значенням критеріїв  $L_{wp}$ ,  $RF_d$ ,  $K_{grp}$  та  $K_{fd}$ , які визначають наявність абіотичного тиску на асиміляційний

апарат рослин [4, 6, 11, 13], якісна оптимізація фонових удобрення на фоні застосування рістрегулюючих речовин фунгіцидної природи та комбінованого застосування мікродобрив у критичні фази росту і розвитку озимого ріпаку забезпечує загальне зниження стресовості стану рослин та підвищення їх віталітету в агроценозі.

**Висновки.** Таким чином, результати наших досліджень засвідчили, що за базовими показниками кривої ІФХ ( $F_0$ ,  $F_{pl}$ ,  $F_m$ ,  $F_{st}$ ), фотосистема рослин ріпаку озимого чутливо реагує на оптимізацію їх живлення, що дозволяє використати показник індукції флуоресценції хлорофілу для оцінки системи удобрення ріпаку озимого. При цьому максимальні базові показники кривої ІФХ ( $F_0$ ,  $F_{pl}$ ,  $F_m$ ,  $F_{st}$ ) та оптимізовані похідні показники розраховані на їх основі відмічено у варіанті що передбачає поліпшену систему фонових удобрення (варіант  $B_2$ ), застосування рістрегулюючих препаратів із фунгіцидним ефектом (варіант  $C_2$ ) та використання системи позако-рених підживлень за технологічним змістом варіанту  $D_4$  досліді.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Yang M., Shi L., Xu F. S., Lu J. W., Wang Y. H. Effects of B, Mo, Zn, and their interactions on seed yield of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Pedosphere*. 2009. Vol. 19. P. 53–59.
2. Shoja T., Majidian M., Rabiee M. Effects of zinc, boron and sulfur on grain yield, activity of some antioxidant enzymes and fatty acid composition of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Acta agriculturae Slovenica*. 2018. Vol. 111. № 1. P. 73–84.
3. Мазур В. А., Мацера О. О. Аналіз зміни якісних показників насіння озимого ріпаку залежно від строків посіву та системи удобрення. *Сільське господарство та лісівництво*. 2019. № 4 (12). С. 5–17.
4. Брайон О. В., Корнеєв Д. Ю., Снегур О. О., Китаєв О. І. Інструментальне вивчення фотосинтетичного апарату за допомогою індукції флуоресценції хлорофілу: Методичні вказівки для студентів біологічного факультету. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2000. 15 с.
5. Strasser R. J., Srivastava A., Tsimilli-Michael M. The fluorescence ratio tool to characterize and screen photosynthetic samples. In: *Probing Photosynthesis: Mechanism, Regulation & Adaptation*. Ed. Mohanty, Yunusand Parthre. London: «Taylor & Francis», 1998. P. 1–59.
6. Патица М. В., Груша В. В., Гордієнко Т. І. Моніторинг ростових процесів рослин в агрофітоценозах експрес-методом індукції флуоресценції хлорофілу. *Збірник наукових праць ННЦ «Інститут землеробства НААН»*. 2014. Вип. 3. С. 49–55.
7. Годлевська О. О., Залоїло І. А., Кожем'яко Я. В., Посудін Ю. І. Застосування портативного флуориметра для оцінювання резистентності рослин до біотичних факторів. *Науковий вісник НУБіП України*. 2011. Вип. 161. С. 217–225.
8. Kalaji H. M., Schansker G., Brestic M., Bussotti F., Calatayud A., Ferroni L., Shelonzek H. Frequently asked questions about chlorophyll fluorescence, the sequel. *Photosynthesis Research*. 2016. Vol. 132. Is. 1. P. 13–66.

9. Brestic M., Zivcak M. PSII fluorescence techniques for measurement of drought and high temperature stress signal in plants: protocols and applications. In: Rout G. R., Das A. B. (eds.) *Molecular stress physiology of plants*. Springer Dordrecht, 2013. P. 87–131.
  10. Murchie E. H., Lawson T. Chlorophyll fluorescence analysis: A guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany*. 2013. Vol. 64. P. 3983–3998.
  11. Ковирьова О. В. Методи обробки вимірів кривих індукції флуоресценції хлорофілу. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2014. № 13. С. 117–124.
  12. Сарахан Є. В. Особливості практичного застосування портативних біосенсорних приладів сімейства «Флоратест». *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2011. № 10. С. 94–103.
  13. Moustakas M., Calatayud A., Guidi L. Chlorophyll fluorescence imaging analysis in biotic and abiotic stress. *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 12. e 658500.
  14. Романов В. О., Артеменко Д. М., Брайко Ю. О. Сімейство портативних приладів «Флоратест»: підготовка до серійного виробництва. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2011. № 10. С. 85–93.
  15. Портативний флуорометр «Флоратест» (настанова з експлуатації). Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України. 2011. 27 с.
  16. Зуза С. Г., Погромська Я. А., Зуза В. О. Застосування методу індукції флуоресценції хлорофілу при вивченні впливу некореневого підживлення кукурудзи карбамідом. *Вісник Донецького Національного Університету. Сер. А: Природничі науки*. 2010. № 2. С. 238–243.
  17. Савчук Ю. М., Антоненко О. Ф. Зміна індукції флуоресценції хлорофілу у рослин ріпаку озимого залежно від мікродобрив *Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2016. № 5. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd\\_2016\\_5\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd_2016_5_14)
  18. Wang C., Yang J., Chen W. Contribution of the leaf and silique photosynthesis to the seeds yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) in reproductive stage. *Science Reports*. 2023. Vol. 13. e 4721.
  19. Pużyńska K., Kulig B., Halecki W. Response of oilseed rape leaves to sulfur and boron foliar application. *Acta Physiologia Plant*. 2018. Vol. 40. E 169.
  20. Magney T. S., Barnes M. L., Yang X. On the covariation of chlorophyll fluorescence and photosynthesis across scales. *Geophysical Research Letters*. 2020. Vol. 47. e 2020GL091098.
- REFERENCES:**
1. Yang, M., Shi, L., Xu, F. S., Lu, J. W., Wang, Y. H. (2009). Effects of B, Mo, Zn, and their interactions on seed yield of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Pedosphere*. Vol. 19. P. 53–59.
  2. Shoja, T., Majidian, M., Rabiee, M. (2018). Effects of zinc, boron and sulfur on grain yield, activity of some antioxidant enzymes and fatty acid composition of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Acta agriculturae Slovenica*. Vol. 111. № 1. P. 73–84.
  3. Mazur, V. A., Matsera, O. O. (2019). Analiz zminy yakisnykh pokaznykiv nasinnia ozymoho ripaku zalezno vid strokiv posivu ta systemy udobrennia [Analysis of changes in quality parameters of winter rape seeds depending on sowing time and fertilizer system]. *Siliske gospodarstvo ta lisivnytstvo*. № 4 (12). S. 5–17. [in Ukrainian]
  4. Braion, O. V., Kornieiev, D. Iu., Sniehur, O. O., Kytaiev, O. I. (2000). Instrumentalne vychennia fotosyntetichnoho aparatu zadpomohoiu induksii fluorestsentsii i khlorofilu: Metodychni vkazivky dlia studentiv biolohichnoho fakultetu [Instrumental study photosynthetic apparatus using chlorophyll fluorescence induction Guidance for students of biological faculty]. Kyiv, Ukraine: Publishing and printing center «Kyiv University», 15. [in Ukrainian]
  5. Strasser, R. J., Srivastava, A., Tsimilli-Michael, M. (1998). The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. London: «Taylor & Francis».
  6. Patyka, M. V. Hrusha, V. V., Hordiienko, T. I. (2014). Monitoryng rostovykh protsesiv roslyn v ahrofitotsenozakh ekspres-metodom induksii fluorestsentsii khlorofilu [Monitoring of plant growth processes in agrophytocenoses by express method of chlorophyll fluorescence induction]. *Zbirnyk naukovykh prats NNTs «Instytut zemlerobstva NAAN»*. 2014. Vyp. 3. S. 49–55. [in Ukrainian]
  7. Hodlevska, O. O., Zaloilo, I. A., Kozhemiako, Ya. V., Posudin, Yu. I. (2011). Zastosuvannia portatyvnoho fluorymetra dlia otsiniuvannia rezystentnosti roslyn do biotychnykh faktoriv [Application of a portable fluorometer for assessing plant resistance to biotic factors]. *Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy*. Vyp. 161. S. 217–225. [in Ukrainian]
  8. Kalaji, H. M., Schansker, G., Brestic, M., Bussotti, F., Calatayud, A., Ferroni, L., Shelonzek H. (2016). Frequently asked questions about chlorophyll fluorescence, the sequel. *Photosynthesis Research*. Vol. 132. Is. 1. P. 13–66.
  9. Brestic, M., Zivcak, M. (2013). PSII fluorescence techniques for measurement of drought and high temperature stress signal in plants: protocols and applications. In: Rout G. R., Das A. B. (eds.) *Molecular stress physiology of plants*. Springer Dordrecht. P. 87–131.
  10. Murchie, E. H., Lawson, T. (2013). Chlorophyll fluorescence analysis: A guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany*. Vol. 64. P. 3983–3998.
  11. Kovyrova, O. V. (2014). Metody obrobky vymiriv kryvykh induksii fluorestsentsii khlorofilu [Methods for processing measurements of chlorophyll fluorescence induction curves]. *Kompiuterni zasoby, merezhi ta systemy*. № 13. S. 117–124. [in Ukrainian]
  12. Sarahan Ie. V. (2011). Osoblyvosti praktychnoho zastosuvannia portatyvnykh biosensornykh prykladiv simeistva «floratest» [Features practical application of a portable biosensor device family «Floratest»]. *Computer means, net works and systems*. № 10. S. 94–103. [in Ukrainian]
  13. Moustakas, M., Calatayud, A., Guidi, L. (2021). Chlorophyll fluorescence imaging analysis in biotic and abiotic stress. *Frontiers in Plant Science*. Vol. 12. e 658500.
  14. Romanov V. O., Artemenko D. M., Braiko Yu. O. (2011). Simeistvo portatyvnykh prykladiv «Floratest»: pidhotovka do seriinoho vyrobnytstva [Family of portable devices «Floratest»: preparation for mass pro-

- duction]. Kompiuterni zasoby, merezhi ta systemy. № 10. S. 85–93. [in Ukrainian]
15. Portatyvnyi fluorometr «Floratest» (nastanova z ekspluatatsii) [Portable fluorometer «Floratest» (instruction manual)]. (2011). Instytut kibernetiky imeni V. M. Hlushkova NAN Ukrainy. 27 s. [in Ukrainian]
  16. Zusa, S. H., Pohromska, Ia. A., Zusa, V. O. (2010). Zastosuvannya metodu induktsii fluorestsentsii khlorofilu pry vuvchenni vplyvu nekorenevoho pidzhyvlennia kukurudzky karbamidom [Application of chlorophyll fluorescence induction at studying the effect of foliar feeding cornurea]. Bulletin of Donetsk National University. Series A: Natural Sciences. № 2, S. 238–243. [in Ukrainian]
  17. Savchuk, Yu. M., Antonenko, O. F. (2016). Zmina induktsii fluorestsentsii khlorofilu u roslyn ripaku ozymoho zalezho vid mikrodbryv [Changes in chlorophyll fluorescence induction in winter rape plants depending on microfertilizers]. Naukovi dopovidy Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. № 5. Rezhym dostupu: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd\\_2016\\_5\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd_2016_5_14) [in Ukrainian]
  18. Wang, C., Yang, J., Chen, W. (2023). Contribution of the leaf and silique photosynthesis to the seeds yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) in reproductive stage. Science Reports. Vol. 13. e 4721.
  19. Pużyńska K., Kulig B., Halecki W. (2018). Response of oilseed rape leaves to sulfur and boron foliar application. Acta Physiology Plant. Vol. 40. E 169.
  20. Magney, T. S., Barnes, M. L., Yang, X. (2020). On the covariation of chlorophyll fluorescence and photosynthesis across scales. Geophysical Research Letters. Vol. 47. e 2020GL091098.

**Цицюра Я.Г., Томчук О.М. Індикація системи живлення ріпаку озимого за показниками індукції флуоресценції хлорофілу**

**Метою** досліджень було дослідити можливість та ефективність застосування методу індукції флуоресценції хлорофілу для оцінки ефективності застосування різних варіантів системи удобрення ріпаку озимого.

**Методи.** Дослідження було проведено впродовж 2022–2023 років на базі ТОВ «ВІН-АГРО ГРУП» на сірих лісових ґрунтах з середнім потенціалом родючості. Повторність у досліді чотириохразова. Розміщення варіантів – систематичне у два яруси. Дослід передбачав вивчення таких факторів: В – варіант фоновісного удобрення; С – застосування по вегетації рістрегулюючих речовин з фунгіцидним ефектом; D – позакореневі підживлення.

**Результати.** Встановлено позитивне зростання базових показників кривої ІФХ  $F_0$ ,  $F_{pl}$ ,  $F_m$ ,  $F_{st}$  на оптимізуючі заходи технологічного конструювання системи удобрення ріпаку озимого у значенні приростів у співставленні мінімального (варіант  $B_1-C_1-D_1$ ) та максимального поєднання факторів інтенсифікації (варіант  $B_2-C_2-D_4$ ) 11,8%, 7,6%, 38,8% та 19,0% відповідно. Це у свою чергу забезпечило формування асиміляційного апарату рослин, який за такими показниками як величина водного

потенціалу ( $L_{wp}$ ), індексом життєздатності рослин ( $RF_d$ ), індексом ефективності первинних реакцій фотосинтезу ( $K_{pp}$ ) та коефіцієнтом згасання флуоресценції ( $K_{fd}$ ) показав істотно менший рівень абіотичної стресовості, вищі функціональні показники фотоасиміляції, що позитивно відобразиться на ростових та продуктивноформуючих процесах рослин ріпаку озимого.

**Висновки.** Максимальні базові показники кривої ІФХ ( $F_0$ ,  $F_{pl}$ ,  $F_m$ ,  $F_{st}$ ) та оптимізовані похідні показники розраховані на їх основі відмічено у варіанті за поліпшеної системи фоновісного удобрення (варіант  $B_2$ ) при застосуванні рістрегулюючих препаратів із фунгіцидним ефектом (варіант  $C_2$ ) та використання позакореневих підживлень (варіант  $D_4$ ).

**Ключові слова:** система удобрення, індекс флуоресценції хлорофілу, рістрегулюючі препарати, мікродобрива, позакореневі підживлення.

**Tsytsyura Ya.G., Tomchuk O.M. Indication of winter rape nutrition system by chlorophyll fluorescence induction**

**The aim of the research** was to investigate the possibility and effectiveness of using the method of chlorophyll fluorescence induction to assess the effectiveness of different variants of winter rape fertilization system.

**Methods.** The study was conducted during 2022–2023 on the basis of «VIN-AGRO GROUP» LLC on gray forest soils with medium fertility potential. The experiment was replicated four times. The placement of the variants was systematic in two tiers. The experiment involved the study of the following factors: B – variant of background fertilization; C – application of growth-regulating substances with fungicidal effect during the growing season; D – foliar fertilization.

**Results.** A positive increase in the basic indicators of the FFH curve  $F_0$ ,  $F_{pl}$ ,  $F_m$ ,  $F_{st}$  for optimizing measures of technological design of the winter rape fertilization system in the value of increases in comparison of the minimum (variant  $B_1-C_1-D_1$ ) and maximum combination of intensification factors (variant  $B_2-C_2-D_4$ ) of 11.8%, 7.6%, 38.8% and 19.0%, respectively, was established. This, in turn, ensured the formation of the assimilation apparatus of plants, which, according to such indicators as the value of water potential ( $L_{wp}$ ), plant viability index ( $RF_d$ ) index of efficiency of primary reactions of photosynthesis ( $K_{pp}$ ) and fluorescence decay coefficient ( $K_{fd}$ ) showed a significantly lower level of abiotic stress, higher functional parameters of photoassimilation, which positively affects the growth and productive processes of winter rape plants.

**Conclusions.** The maximum basic indicators of the IFH curve ( $F_0$ ,  $F_{pl}$ ,  $F_m$ ,  $F_{st}$ ) and optimized derivative indicators calculated on their basis were observed in the variant with an improved background fertilization system (variant  $B_2$ ) when using growth-regulating preparations with fungicidal effect (variant  $C_2$ ) and the use of foliar fertilization (variant  $D_4$ ).

**Key words:** fertilization system, chlorophyll fluorescence index, growth regulating agents, microfertilizers, foliar fertilization.