

УДК 633.34:632.954:581.132

## Метод індукції флуоресценції хлорофілу як спосіб визначення стресу рослин сої за обробки посівів ізопропіламіною сіллю гліфосату

 О. І. Присяжнюк\*,  М. О. Черняк,  В. В. Мусіч,  
 О. Ю. Половинчук,  О. М. Гончарук,  О. А. Маляренко

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна,  
\*e-mail: ollpris@gmail.com

**Анотація.** Соя є однією з провідних білково-олійних культур України, площі вирощування якої стабільно зростають, що підвищує вимоги до ефективності систем захисту посівів від бур'янів. Водночас навіть у стійких до гліфосату (RR) сортів застосування підвищених норм гербіциду може спричинити транзиторний фізіологічний стрес, який потребує раннього діагностування. Метою дослідження було встановити вплив різних норм внесення ізопропіламіної солі гліфосату на функціональний стан фотосинтетичного апарату рослин сої та обґрунтувати оптимальний режим застосування гербіциду для ефективного контролю бур'янів за мінімального фітотоксичного впливу на культуру. Дослідження проводили у 2023–2025 рр. у зоні Правобережного Лісостепу України на чорноземі типовому малогумусному. Об'єктом слугували рослини сої сорту 'Вентус' (RR). Схема досліду включала контроль, оптимальну норму (864 г д. р./га), дробне внесення (864 + 648 г д. р./га) та підвищену норму (1728 г д. р./га). Параметри індукції флуоресценції хлорофілу (ОJIP) визначали через 24–48 год після обробки з розрахунком  $F_0$ ,  $F_m$ ,  $F_v/F_m$ ,  $F_v/F_0$  та індексу продуктивності, а також оцінювали технічну ефективність гербіциду й урожайність насіння. Установлено, що всі варіанти застосування гліфосату забезпечили високий рівень контролю бур'янів (85–97 %). Показник  $F_v/F_m$  залишався в межах 0,93–0,94, що свідчить про відсутність незворотних пошкоджень фотосистеми II. Водночас підвищена норма (1728 г д. р./га) зумовила зниження середньої флуоресценції на 38,7 % і найбільш виражене пригнічення фази I–P ОJIP-кривої (–70,4 %), що вказує на транзиторне порушення електрон-транспортного ланцюга. Найвищу врожайність (2,55 т/га, +22,0 % до контролю) отримано за дробного внесення, яке поєднувало високу технічну ефективність (94,1 %) із помірним рівнем стресу (20,5 %). Застосування підвищеної норми, попри максимальний контроль бур'янів, забезпечило менший приріст урожаю через фізіологічне навантаження на рослини в критичний період органогенезу. Отримані результати підтверджують високу чутливість ОJIP-параметрів до гербіцидного стресу та доцільність їх використання для оптимізації норм унесення гліфосату. Перспективи подальших досліджень пов'язані з інтеграцією не інвазивних методів моніторингу флуоресценції в цифрові технології вирощування та оцінювання впливу гербіцидного навантаження на ріст і розвиток рослин у режимі реального часу.

**Ключові слова:** соя; бур'яни; гліфосат; ізопропіламіна сіль; гербіцидний стрес; ОJIP-тест; індукція флуоресценції хлорофілу; фотосистема II; урожайність; системи точного землеробства.

### Вступ

Соя [*Glycine max* (L.) Merr.] є однією з найважливіших білково-олійних культур у світовому землеробстві [1]. В Україні посівні площі під цією культурою за останні роки значно зросли – з 1,8 млн га у 2023 році до 2,63 млн га у 2024 році. Київська область є одним із провідних регіонів

**Як цитувати:** Присяжнюк О. І., Черняк М. О., Мусіч В. В., Половинчук О. Ю., Гончарук О. М., Маляренко О. А. Метод індукції флуоресценції хлорофілу як спосіб визначення стресу рослин сої за обробки посівів ізопропіламіною сіллю гліфосату. *Новітні агротехнології*. 2026. Т. 14, № 1. <https://doi.org/10.47414/na.14.1.2026.352850>



© 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.

вищину сої в зоні Лісостепу, де її середня врожайність коливається в межах 2,3–2,8 т/га залежно від погодних умов та рівня технології [2].

Одним із ключових факторів, що лімітують урожайність сої, є забур'яненість посівів. За даними досліджень, втрати врожаю від бур'янів можуть становити від 15 до 60 % і більше. Критичним періодом для контролювання бур'янів є фаза з першого по третій справжній листок культури, коли рослини сої через повільний початковий ріст особливо чутливі до конкуренції з боку сегетальної рослинності [3, 4].

Гліфосат [N-(фосфометил)гліцин] є однією з найбільш застосовуваних діючих речовин гербіцидів у світі. У препаративних формах гліфосат переводять в ізопропіламінну сіль для підвищення розчинності та поліпшення проникнення в рослинні тканини. Механізм дії гліфосату полягає в інгібуванні ферменту 5-енолпірувілшикімат-3-фосфатсинтази (EPSPS) шикіматного шляху біосинтезу ароматичних амінокислот (фенілаланіну, тирозину, триптофану), що призводить до порушення синтезу білків, пригнічення фотосинтезу, руйнування хлоропластів та загибелі рослин [5, 6].

В Україні значна частина посівів сої є генетично модифікованою (ГМО), незважаючи на офіційну заборону. Оцінки свідчать, що близько 40–65 % площ сої засіяно ГМ-насінням, а за даними USDA та галузевих асоціацій, частка ГМ-сої становить близько 40–50 %, коли за іншими оцінками – до 50–65 % [7–9].

Незважаючи на генетичну стійкість RR-сортів сої до гліфосату, застосування діючої речовини у підвищених дозах або в несприятливі строки може спричинити транзиторний стрес фотосинтетичного апарату культурних рослин [10]. Метод індукції флуоресценції хлорофілу (OJIP-тест) є високочутливим інструментом для раннього виявлення стресових станів рослин ще до появи візуальних симптомів пошкодження [11, 12].

*Мета дослідження* – установити вплив різних норм внесення гліфосату на функціональний стан фотосинтетичного апарату рослин сої та обґрунтувати оптимальні параметри використання діючої речовини для ефективного контролю бур'янів за мінімального фітотоксичного впливу на культуру.

### **Матеріали та методика досліджень**

Дослідження проводили впродовж 2023–2025 рр. на базі ДП ДГ «Саливонківське» Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, розташованого в зоні Правобережного Лісостепу України (Київська обл., 50.023194, 30.173895). Ґрунт дослідних ділянок – чорнозем типовий малогумусний на лесі з вмістом гумусу 3,8–4,2 %, рН сольової витяжки 6,2–6,8, забезпеченість рухомими формами азоту – середня, фосфору та калію – підвищена.

Об'єктом дослідження слугували рослини сої сорту 'Вентус' (RR-стійкий до гліфосату). Попередник – озима пшениця. Агротехніка вирощування – загальноприйнята для зони Лісостепу. Для обробки посівів використовували гербіцид на основі ізопропіламінної солі гліфосату з концентрацією діючої речовини 480 г/л (360 г/л у кислотному еквіваленті).

Схема польового дослідження включала такі варіанти:

1. Контроль – без обробки гербіцидом;
2. Оптимальна норма – 864 г д. р./га (1,8 л/га препарату), фаза два-три трійчастих листків сої;
3. Дробне внесення – 864 г д. р./га (фаза двох-трьох листків) + 648 г д. р./га (фаза чотирьох-п'яти листків), сумарно 1512 г д. р./га;
4. Підвищена норма – 1728 г д. р./га (3,6 л/га препарату), фаза п'яти-шести трійчастих листків сої.

Площа облікової ділянки – 50 м<sup>2</sup>, повторність – чотириразова, розміщення варіантів систематичне. Норма витрати робочого розчину – 200 л/га.

Вимірювання індукції флуоресценції хлорофілу проводили портативним флуориметром Флоратест через 24–48 годин після обробки. Листки попередньо адаптували до темряви впродовж 30 хв. Реєстрацію кривих OJIP здійснювали за інтенсивності актинічного світла 3000 мкмоль фотонів·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

Розраховували такі параметри JIP-тесту: F<sub>0</sub> – початкова флуоресценція; F<sub>m</sub> – максимальна флуоресценція; F<sub>v</sub> = F<sub>m</sub> – F<sub>0</sub> – варіабельна флуоресценція; F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub> – максимальний квантовий вихід ФСII; F<sub>v</sub>/F<sub>0</sub> – індикатор фотохімічної активності; V<sub>j</sub>, V<sub>i</sub> – відносні варіабельні флуоресценції в точках J та I; P<sub>labs</sub> – індекс продуктивності [13, 14].

Забур'яненість посівів визначали кількісним методом у фазі цвітіння та перед збиранням урожаю шляхом підрахунку чисельності бур'янів на майданчиках 0,25 м<sup>2</sup> у 10-разовій повторності. Урожайність насіння сої визначали методом суцільного обліку з перерахунком на стандартну вологість (14 %).

Статистичну обробку даних проводили методами дисперсійного аналізу з використанням програмного пакета Statistica 10.0. Достовірність різниці між варіантами оцінювали за критерієм Фішера на рівні значущості  $P < 0,05$  [15].

### Результати досліджень

Фітосанітарний моніторинг посівів сої в Київській області впродовж 2023–2025 рр. засвідчив високий рівень забур'яненості полів. Середня чисельність бур'янів на контрольних ділянках (без обробки) становила 78–124 шт./м<sup>2</sup> з переважанням однорічних видів: щиряці звичайної (*Amaranthus retroflexus* L.), лободи білої (*Chenopodium album* L.), мишію сизого [*Setaria glauca* (L.) P.Beauv.] та курячого проса [*Echinochloa crus-galli* (L.) P.Beauv.]. Серед багаторічних бур'янів домінували осот рожевий [*Cirsium arvense* (L.) Scop.] та березка польова (*Convolvulus arvensis* L.).

Таблиця 1

**Забур'яненість посівів сої залежно від норми внесення гліфосату (середнє 2023–2025 рр.)**

Варіант (норма гліфосату)	Чисельність бур'янів, шт./м <sup>2</sup>	Маса бур'янів, г/м <sup>2</sup>	Технічна ефективність, %
Контроль (без обробки)	98,4 ± 12,3	342,5 ± 48,2	–
Оптимальна норма (864 г д.р./га)	14,7 ± 3,2	52,8 ± 11,4	85,1
Дробне внесення (1512 г д.р./га)	5,8 ± 1,6	18,4 ± 4,8	94,1
Підвищена норма (1728 г д.р./га)	3,2 ± 0,9	9,6 ± 2,4	96,7
НІР <sub>0,05</sub>	8,4	28,6	–

Як видно з даних таблиці 1, усі режими застосування гліфосату забезпечили високу технічну ефективність контролювання бур'янів (85–97 %). Найвищий рівень знищення сегетальної рослинності (96,7 %) зафіксовано у варіанті з підвищеною нормою діючої речовини, проте дробне внесення забезпечило майже такий самий результат (94,1 %) за значно меншого загального навантаження на агроценоз.

Посіви сої, оброблені підвищеною нормою гліфосату, в пізні строки навіть візуально відрізнялись від посівів оброблених двічі згідно з рекомендаціями (рисунок).



друга обробка



підвищена норма

**Рис. Стан посівів сої після обробки посівів гліфосатом**

Друга обробка посівів сої гербіцидом дала змогу прибрати окремі бур'яни, які залишились або проросли після першого внесення, проте не вплинула на колір листових пластинок сої. Натомість максимальна норма гербіциду в пізні фази росту й розвитку сої виявилась ефективною проти бур'янів, проте відзначалось й візуально виразне пожовтіння листя сої.

Аналіз параметрів індукції флуоресценції хлорофілу засвідчив суттєві відмінності в реакції фотосинтетичного апарату сої на різні норми внесення гліфосату (табл. 2).

Таблиця 2

**Параметри флуоресценції хлорофілу рослин сої за різних норм внесення гліфосату**

Параметр	Варіант (норма гліфосату)			
	Контроль	864 г д. р./га	1512 г д. р./га	1728 г д. р./га
F <sub>0</sub> (відн. од.)	240	248	256	240
F <sub>m</sub> (відн. од.)	3972	3856	3724	3972
F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub>	0,940	0,936	0,931	0,940
F <sub>v</sub> /F <sub>0</sub>	15,55	14,55	13,55	15,55
Середня флуоресценція	965,8	842,4	768,2	592,1
Зміна середньої, %	-	-12,8	-20,5	-38,7
Індекс стресу, %	0	12,8	20,5	38,7

Результати вимірювань показали, що параметр F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub> – максимальний квантовий вихід фотосистеми II – в усіх варіантах досліджу залився в межах оптимальних значень (0,93–0,94), що характеризує відсутність незворотних пошкоджень реакційних центрів ФСII. Це пояснюється генетичною стійкістю RR-сорту до гліфосату завдяки присутності модифікованого ферменту EPSPS.

Водночас більш чутливим індикатором стресового стану виявився показник середньої флуоресценції та похідний від нього індекс стресу. У разі застосування підвищеної норми гліфосату (1728 г д. р./га) середня флуоресценція знизилася на 38,7 % порівняно з контролем, що свідчить про значне транзиторне пригнічення фотохімічної активності.

Детальний аналіз динаміки флуоресценції по фазах кривої OJIP (табл. 3) виявив найбільш виражене зниження у фазі I-P (на 70,4 %), що відповідає за функціонування кінцевих акцепторів електронів (ферредоксин, НАДФ<sup>+</sup>-редуктаза). Це узгоджується з механізмом дії гліфосату, який через пригнічення шикіматного шляху порушує синтез пластохінонів та інших компонентів електрон-транспортного ланцюга хлоропластів [12].

Таблиця 3

**Динаміка флуоресценції по фазах OJIP-кривої**

Фаза кривої	Характеристика	Контроль	1728 г д. р./га	Зміна, %
O-фаза	Початкова флуоресценція	794,8	461,3	-42,0
O-J перехід	Відновлення QA	1066,8	775,2	-27,3
J-I перехід	Відновлення PQ-пулу	889,3	420,3	-52,7
I-P перехід	Кінцеві акцептори електронів	968,8	286,6	-70,4
P-фаза	Максимум флуоресценції	864,5	735,6	-14,9

Важливо зазначити, що у варіантах з оптимальною нормою та дробним внесенням гліфосату індекс стресу був значно нижчим (12,8 та 20,5 % відповідно), що свідчить про помірний вплив на фотосинтетичний апарат при збереженні високої гербіцидної ефективності.

Кінцевим критерієм ефективності системи захисту посівів сої від бур'янів є врожайність культури (табл. 4).

Таблиця 4

**Урожайність сої (т/га) залежно від норми внесення гліфосату (2023–2025 рр.)**

Варіант (норма гліфосату)	2023 р.	2024 р.	2025 р.	Середнє	± до контролю
Контроль (без обробки)	2,08	1,95	2,24	2,09	-
Оптимальна норма (864 г д. р./га)	2,42	2,38	2,64	2,48	+0,39 (18,7 %)
Дробне внесення (1512 г д. р./га)	2,48	2,44	2,72	2,55	+0,46 (22,0 %)
Підвищена норма (1728 г д. р./га)	2,36	2,18	2,52	2,35	+0,26 (12,4 %)
HP <sub>0,05</sub>	0,18	0,21	0,16	-	-

Найвищу врожайність (2,55 т/га в середньому за три роки) отримано у варіанті з дробним внесенням гліфосату, що на 22,0 % перевищує контроль. Це пояснюється оптимальним поєднанням високої ефективності контролю бур'янів (94,1 %) та помірного стресового впливу на культурні рослини.

Варіант з підвищеною нормою гліфосату (1728 г д. р./га), незважаючи на найвищу технічну ефективність (96,7 %), забезпечив нижчий приріст урожаю (лише 12,4 %), що зумовлено транзиторним пригніченням фотосинтетичного апарату сої в критичний період формування репродуктивних органів.

Отримані результати узгоджуються з даними інших дослідників щодо чутливості OJIP-параметрів до хімічного стресу рослин. Зокрема, Kalaji et al. [16] зазначають, що індекс продуктивності Plabs та параметри фази I-P є найбільш інформативними для оцінки впливу пестицидів на фотосинтетичний апарат. Аналогічні закономірності виявлено в разі дослідження впливу важких металів та дефіциту елементів живлення на рослини.

## Висновки

Обробка посівів сої гліфосатом (у формі ізопропіламіної солі) у підвищеній нормі (1728 г д. р./га) на фазі п'яти-шести трійчастих листків спричиняє значне транзиторне пригнічення фотосинтетичного апарату (зниження середньої флуоресценції на 38,7 %), при цьому показник Fv/Fm залишається в межах норми, що свідчить про відсутність незворотних пошкоджень ФСII. А найбільш виражені зміни параметрів флуоресценції хлорофілу зафіксовано у фазі I-P (зниження на 70,4 %), що відповідає за функціонування кінцевих акцепторів електронів та узгоджується з механізмом дії гліфосату як інгібітора шикіматного шляху.

Оптимальним режимом застосування гліфосату для контролювання бур'янів у посівах сої в умовах Київської області є дробне внесення (864 г д. р./га у фазі двох-трьох листків + 648 г д. р./га у фазі чотирьох-п'яти листків), яке забезпечує технічну ефективність 94,1 % за помірного стресового впливу на культуру (індекс стресу 20,5 %).

Урожайність сої у варіанті з дробним внесенням гліфосату становила 2,55 т/га, що на 22,0 % вище порівняно з контролем і на 8,5 % – варіанту підвищеної норми діючої речовини.

Отже, метод OJIP-тесту є ефективним інструментом для раннього виявлення та моніторингу стресового стану рослин сої в разі застосування гербіцидів на основі гліфосату, що дає змогу оптимізувати норми внесення діючої речовини для досягнення максимальної врожайності.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з інтеграцією не інвазивних методів моніторингу флуоресценції в цифрові технології вирощування та оцінювання впливу гербіцидного навантаження на ріст і розвиток рослин у режимі реального часу.

## Використана література

1. Бабич А. О. Соя для здоров'я і життя на планеті Земля. Київ : Аграрна наука, 1998. 272 с.
2. Рослинництво України 2025: статистичний збірник / Державна служба статистики України. Київ, 2025. URL: <https://stat.gov.ua/uk/explorer>
3. Жеребко В. М. Хімічний метод контролю забур'яненості посівів в інтенсивних технологіях вирощування сільськогосподарських культур. *Карантин і захист рослин*. 2014. № 2. С. 22–24.
4. Цвей Я. П., Тищенко М. В., Філоненко С. В. Моніторинг забур'яненості посівів сільськогосподарських культур у ланці зернобурякової сівозміни у виробничих умовах. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2018. № 1. С. 21–30. <https://doi.org/10.31210/visnyk2018.01.03>
5. Шевніков М. Я., Міленко О. Г. Міжвидова конкуренція та забур'яненість посівів сої залежно від моделі агрофітоценозу. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2015. Вип. 3. С. 116–123.
6. Duke S. O., Carvalho L. B. Unintended effects of the intended herbicides on transgenic herbicide-resistant crops. *Agronomy*. 2025. Vol. 15, Iss. 11. Article 2448. <https://doi.org/10.3390/agronomy15112448>
7. Рибальченко А. М., Криворучко Л. М. Трансгенні рослини: проблеми і перспективи використання. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Агрономія і біологія*. 2025. Т. 58, № 4. С. 85–93. <https://doi.org/10.32782/agrobio.2024.4.13>
8. Рудишин С. Д. ГМ-культури як науково-політична проблема. *Наукові читання до 85-річчя від дня народження В. Г. Вировця* : матеріали науково-практичної конференції (м. Глухів, 5 березня 2022 р.). Глухів : ІЛК НААН, 2022. С. 123–127.
9. Павлишин С. Сучасні тенденції розвитку ринку зерна в Україні та світі. *Інноваційна економіка*. 2025. № 2. С. 144–154. <https://doi.org/10.37332/2309-1533.2025.2.16>
10. Chang K. W., Tang H., Fu L. J. et al. Recent advances in plant stress analysis using chlorophyll a fluorescence. *Photosynthetica*. 2025. Vol. 63, Iss. 4. P. 359–373. <https://doi.org/10.32615/ps.2025.037>
11. Stirbet A., Govindjee G., Srivastava A. In honor of Reto Jörg Strasser: A pioneer of chlorophyll a fluorescence research. *Photosynthetica*. 2025. Vol. 63, Iss. 3. P. 267–281. <https://doi.org/10.32615/ps.2025.024>

12. Zobiolo L. H. S., Kremer R. J., Oliveira R. S., Constantin J. Glyphosate affects chlorophyll, nodulation and nutrient accumulation of “second generation” glyphosate-resistant soybean (*Glycine max* L.). *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 2011. Vol. 99, Iss. 1. P. 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2010.10.005>
13. Strasser R. J., Tsimilli-Michael M., Srivastava A. Analysis of the chlorophyll *a* fluorescence transient. In *Chlorophyll a Fluorescence. Advances in Photosynthesis and Respiration* / ed. by G. C. Papageorgiou, Govindjee. Dordrecht : Springer, 2004. Vol. 19. P. 321–362. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_12)
14. Tsimilli-Michael M. Revisiting JIP-test: an educative review on concepts, assumptions, approximations, definitions and terminology. *Photosynthetica*. 2020. Vol. 57 (SI). P. 275–292. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.150>
15. Присяжнюк О. І., Климович Н. М., Полуніна О. В. та ін. Методологія і організація наукових досліджень в сільському господарстві та харчових технологіях. Київ : Нілан-ЛТД, 2021. 300 с. <https://doi.org/10.47414/978-966-924-927-2>
16. Kalaji H. M., Jajoo A., Oukarroum A. et al. Chlorophyll *a* fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2016. Vol. 38. Article 102. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2113-y>

## References

1. Babych, A. O. (1998). *Soybeans for health and life on planet Earth*. Ahrarna nauka. [In Ukrainian]
2. State Statistics Service of Ukraine. (2025). *Crop production of Ukraine 2025: Statistical yearbook*. <https://stat.gov.ua/uk/explorer> [In Ukrainian]
3. Zhrebko, V. M. (2014). Chemical method of weed control in intensive technologies of agricultural crop cultivation. *Quarantine and Plant Protection*, 2, 22–24. [In Ukrainian]
4. Tsvei, Ya. P., Tyshchenko, M. V., & Filonenko, S. V. (2018). Monitoring of the obstinacy of crops in agricultural crop in the line of grain-beet rotation in production conditions. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, 1, 21–30. <https://doi.org/10.31210/visnyk2018.01.03> [In Ukrainian]
5. Shevnikov, M. Ya., & Milenko, O. H. (2015). Interspecific competition and weed infestation of soybean crops depending on the agrophytocenosis model. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*, 3, 116–123. [In Ukrainian]
6. Duke, S. O., & Carvalho, L. B. (2025). Unintended effects of the intended herbicides on transgenic herbicide-resistant crops. *Agronomy*, 15(11), Article 2448. <https://doi.org/10.3390/agronomy15112448>
7. Rybalchenko, A. M., & Kryvoruchko, L. M. (2025). Transgenic plants: Problems and prospects of use. *Journal of Sumy National Agrarian University. Series: Agronomy and Biology*, 58(4), 85–93. <https://doi.org/10.32782/agrobio.2024.4.13> [In Ukrainian]
8. Rudyshyn, S. D. (2022, March 5). GM crops as a scientific and political problem. In *Scientific readings for the 85th anniversary of the birth of V. H. Vyrovet* (pp. 123–127). Institute of Bast Crops of the NAAS. [In Ukrainian]
9. Pavlyshyn, S. (2025). Current trends in the development of the grain market in Ukraine and in the world. *Innovative Economy*, 2, 144–154. <https://doi.org/10.37332/2309-1533.2025.2.16>
10. Chang, K. W., Tang, H., & Fu, L. J., Xia, Q., Pan, Z. Y., Tan, J. L., Lysenko, V., & Guo, Y. (2025). Recent advances in plant stress analysis using chlorophyll *a* fluorescence. *Photosynthetica*, 63(4), 359–373. <https://doi.org/10.32615/ps.2025.037>
11. Stirbet, A., Govindjee, G., & Srivastava, A. (2025). In honor of Reto Jörg Strasser: A pioneer of chlorophyll *a* fluorescence research. *Photosynthetica*, 63(3), 267–281. <https://doi.org/10.32615/ps.2025.024>
12. Zobiolo, L. H. S., Kremer, R. J., Oliveira, R. S., & Constantin, J. (2011). Glyphosate affects chlorophyll, nodulation and nutrient accumulation of “second generation” glyphosate-resistant soybean (*Glycine max* L.). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 99(1), 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2010.10.005>
13. Strasser, R. J., Tsimilli-Michael, M., & Srivastava, A. (2004). Analysis of the chlorophyll *a* fluorescence transient. In G. C. Papageorgiou & Govindjee (Eds.), *Chlorophyll a fluorescence. Advances in photosynthesis and respiration* (Vol. 19, pp. 321–362). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_12)
14. Tsimilli-Michael, M. (2020). Revisiting JIP-test: An educative review on concepts, assumptions, approximations, definitions and terminology. *Photosynthetica*, 57(SI), 275–292. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.150>
15. Prysiazhniuk, O. I., Klymowych, N. M., Polunina, O. V., Yevchuk, Ya. V., Tretiakova, S. O., Kononenko, L. M., Voitovska, V. I., & Mykhailovyn, Yu. M. (2021). *Methodology and organization of scientific research in agriculture and food technologies*. Nilan-LTD. <https://doi.org/10.47414/978-966-924-927-2>
16. Kalaji, H. M., Jajoo, A., Oukarroum, A., Brestic, M., Zivcak, M., Samborska, I. A., Cetner, M. D., Łukasik, I., Goltsev, V., & Ladle, R. J. (2016). Chlorophyll *a* fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38, Article 102. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2113-y>

UDC 633.34:632.954:581.132

**Prysiazhniuk, O. I.\***, Cherniak, M. O. Musich, V. V., Polovynchuk, O. Yu., Honcharuk, O. M., & Maliarenko, O. A. (2026). Evaluation of glyphosate isopropylamine-related stress in soybean using chlorophyll fluorescence induction method. *Advanced Agritechnologies*, 14(1). <https://doi.org/10.47414/na.14.1.2026.352850> [In Ukrainian]

*Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine,  
\*e-mail: ollpris@gmail.com*

**Abstract.** Soybean is one of the leading protein and oil crops in Ukraine with steadily expanding cultivation areas, which requires effective weed control systems. Even in glyphosate-resistant (RR) varieties, the use of high herbicide rates may cause transient physiological stress that requires early monitoring. The aim of the study was to determine the effect of different application rates of the isopropylamine salt of glyphosate on the functional state of the photosynthetic apparatus of soybean plants and to substantiate the optimal herbicide regime for effective weed control with minimal phytotoxic impact on the crop. The research was conducted in 2023–2025 in the Right-Bank Forest Steppe of Ukraine on typical low-humus chernozem. The object of study was soybean plants of the 'Ventus' (RR) variety. The experimental design included: control, optimal rate (864 g a.i./ha), split application (864 + 648 g a.i./ha), and elevated rate (1728 g a.i./ha). Chlorophyll fluorescence induction (OJIP) parameters were measured 24–48 h after treatment, including  $F_0$ ,  $F_m$ ,  $F_v/F_m$ ,  $F_v/F_0$  and performance index. At the same time, herbicide efficacy and seed yield were evaluated. All glyphosate treatments provided efficient weed control (85–97%). The  $F_v/F_m$  ratio remained within 0.93–0.94, indicating no irreversible damage to photosystem II. However, the elevated rate (1728 g a.i./ha) reduced average fluorescence by 38.7% and caused the most pronounced suppression of the I–P phase of the OJIP curve (–70.4%), pointing to transient disruption of the electron transport chain. The highest yield (2.55 t/ha, +22.0% compared with control) was obtained under split application, which combined high technical efficacy (94.1%) with moderate stress levels (20.5%). Elevated rates, despite maximum weed control, resulted in lower yield gains due to physiological load on plants during critical organogenesis. The results confirm the high sensitivity of OJIP parameters to herbicide stress and the feasibility of their use for optimising glyphosate application rates. Further research should focus on the integration of non-invasive fluorescence monitoring methods into digital cultivation technologies and the real-time assessment of the impact of herbicide load on plant growth and development.

**Keywords:** soybean; weeds; glyphosate; glyphosate isopropylamine; herbicide stress; OJIP-test; chlorophyll fluorescence induction; photosystem II; yield; precision farming systems.

*Надійшла / Received 03.02.2026*

*Погоджено до друку / Accepted 20.02.2026*

*Опубліковано онлайн / Published online 24.02.2026*