

УДК 633.88:581.132:631.811.98

DOI <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2026.36.33>

ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ СТАН ФОТОСИНТЕТИЧНОГО АПАРАТУ МІСКАНТУСУ ГІГАНТСЬКОГО ЗА РІЗНИХ СИСТЕМ УДОБРЕННЯ ТА ПІДЖИВЛЕННЯ ГУМАТОМ КАЛІЮ

НОСЕНКО В.Г. – кандидат сільськогосподарських наук, доцент
orcid.org/0000-0002-4917-3514
Національний університет біоресурсів і природокористування

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus*) є однією з найбільш перспективних біоенергетичних культур для помірного клімату завдяки високій продуктивності біомаси, низькому рівню вхідних ресурсів та здатності ефективно секвеструвати вуглець у ґрунті [1]. Як C₄-рослина, міскантус характеризується специфічним механізмом фіксації вуглекислого газу, що забезпечує вищу ефективність фотосинтезу порівняно з C₃-культурами [2]. Функціональний стан фотосинтетичного апарату є визначальним чинником продуктивності рослин та їх стійкості до стресових факторів середовища [3].

Вміст хлорофілу в листках безпосередньо визначає потенційну фотосинтетичну активність і може бути оперативно оцінений за допомогою портативних хлорофілометрів SPAD-502 [4]. Для злакових культур встановлено тісні кореляційні залежності між показниками SPAD та вмістом азоту в листках [5], що робить цей метод ефективним інструментом діагностики мінерального живлення. Cadoux et al. [6] показали, що вміст хлорофілу в листках міскантуса суттєво залежить від забезпеченості азотом та інших елементів мінерального живлення.

Метод індукції флуоресценції хлорофілу (хлорофіл а fluorescence) є потужним неруйнівним інструментом оцінки функціонального стану фотосинтетичного апарату [7]. Параметр Fv/Fm характеризує максимальну квантову ефективність фотосистеми II (ФС II) і є загально визнаним індикатором стресу рослин [8]. Для здорових рослин значення Fv/Fm зазвичай знаходяться в діапазоні 0,75–0,85 [9]. Індекс продуктивності PI(abs), розроблений Strasser et al. [10] на основі JIP-тесту, є значно чутливішим інтегральним показником, що враховує щільність активних реакційних центрів, ефективність світлових та темнових реакцій фотосинтезу [11].

Гумінові речовини, зокрема гумати калію, здійснюють комплексний вплив на фізіологічні процеси рослин. Canellas et al. [12] у метааналізі показали стимулювальну дію гумінових кислот на ростові процеси та фотосинтетичну активність. Nardi et al. [13] встановили позитивний вплив гумінових речовин на стабільність мембран хлоропластів. Rose et al. [14] у систематичному огляді підтвердили ефективність гуматів як біостимуляторів для широкого спектра сільськогосподарських

культур. Jannin et al. [15] виявили, що гумінові речовини покращують донорну сторону ФС II та знижують фотоінгібування.

Леонардит є природним джерелом гумінових кислот з високим вмістом (60–85%) органічної речовини [16]. Його застосування як органічного добрива забезпечує комплексний вплив на ґрунт та рослини, включаючи покращення структури ґрунту, стимуляцію мікробіологічної активності та підвищення доступності елементів живлення [17]. В Україні Рахметов [18] та Пономаренко [19] дослідили вплив регуляторів росту та біостимуляторів на продуктивність інтродукованих біоенергетичних культур, проте комплексних досліджень щодо впливу Леонардиту та гуматів на функціональний стан фотосинтетичного апарату міскантуса гігантського в умовах Лісостепу не проводилося.

Разом з тим, залишаються нез'ясованими закономірності впливу різних систем удобрення у поєднанні з позакореневим підживленням гуматом калію на параметри флуоресценції хлорофілу (Fv/Fm, PI(abs)) та вміст хлорофілу (SPAD) міскантуса гігантського сорту Осінній зорецьвіт протягом перших п'яти років формування плантації в умовах Лісостепу України.

Мета дослідження – встановити закономірності зміни функціонального стану фотосинтетичного апарату міскантуса гігантського залежно від системи удобрення та позакореневого підживлення гуматом калію на основі показників SPAD, Fv/Fm та PI(abs).

Матеріал і методи дослідження. Дослідження проводили впродовж 2021–2025 рр. у ВП НУБіП України «Великоснітинське ім. О.В. Музиченка» Фастівського району Київської області (49°44' пн. ш., 30°06' сх. д.) на чорноземі опідзоленому сильнозмитому легкосуглинковому на лесовидному суглинку. Агрохімічна характеристика ґрунту орного шару (0–30 см): вміст гумусу – 1,43%, азоту легкогідролізованого – 70,6 мг/кг, рухомого фосфору (за Чириковим) – 66,6 мг/кг, обмінного калію – 123,7 мг/кг, рНКСІ – 5,76, щільність зложення – 1,17 г/см³.

Дослід двофакторний, повторність триразова, розміщення ділянок рендомізоване. Площа посівної ділянки – 50 м², облікової – 35 м². Культура – міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus* J.M. Greef & Deuter ex Hodk. & Renvoize), сорт Осінній зорецьвіт. Садіння проведено навесні 2021 р. ризомами.



Фактор А – система удобрення: А₁ – контроль (без добрив); А₂ – органічна (Леонардит, 100 кг/га, щорічно по мерзлоталому ґрунту навесні); А₃ – мінеральна (N₆₀P₁₆K₈₀, щорічно навесні). Фактор В – позакореневе підживлення гуматом калію (2 л/га): В₁ – без підживлення; В₂ – у фазу куціння; В₃ – у фазу виходу в трубку; В₄ – у обидві фази.

Відносний вміст хлорофілу визначали портативним хлорофілометром SPAD-502 Plus (Konica Minolta, Японія) на третьому зверху повністю розгорнутому листку у фазу максимального розвитку листового апарату (середнє з 30 вимірювань на ділянку). Параметри індукції флуоресценції хлорофілу (Fv/Fm та PI(abs)) визначали портативним флуориметром Handy PEA (Hansatech Instruments, Великобританія) після 20-хвилинної темної адаптації [10, 20]. Статистичний аналіз експериментальних даних було проведено за допомогою Excel з програмного забезпечення MS Office 365 та Statistica 10. Розраховували стандартне відхилення (SD), коефіцієнт варіації (V, %), найменшу істотну різницю (HIP_{0,05}).

Результати дослідження та обговорення. Вміст хлорофілу (SPAD). Результати досліджень засвідчили стійку тенденцію до збільшення вмісту хлорофілу як з віком плантації, так і за покращення умов мінерального живлення (табл. 1). У 2021 р. значення SPAD варіювали від 34,2 ум. од. на контролі без підживлення до 44,3 ум. од. за мінеральної системи удобрення з дворазовим підживленням гуматом калію. До 2025 р. ці показники зросли до 42,5 та 55,0 ум. од. відповідно, що свідчить про поступове покращення пігментного комплексу рослин з віком плантації.

Найвищі середні значення SPAD (50,9 ум. од.) зафіксовано у варіанті А₃В₄ (мінеральна система удобрення N₆₀P₁₆K₈₀ з дворазовим підживленням), що на 29,2% перевищувало контроль А₁В₁ (39,4 ум. од.). Органічна система забезпечила проміжні значення: 43,2–47,6 ум. од. Дворазове підживлення гуматом калію збільшувало

SPAD на 8,5–10,2% порівняно з варіантами без підживлення (HIP_{0,05} = 3,6 ум. од.), що свідчить про стимулювальний вплив гумінових речовин на біосинтез хлорофілу та узгоджується з результатами [6, 12].

Максимальний квантовий вихід фотосистеми II (Fv/Fm). Параметр Fv/Fm характеризує максимальну квантову ефективність фотохімічних реакцій у ФС II і є загально визначним індикатором функціонального стану фотосинтетичного апарату [7, 8]. Усі отримані значення (табл. 2) знаходилися в межах 0,756–0,820, що свідчить про задовільний функціональний стан ФС II у всіх варіантах досліду.

Найвищі середні значення Fv/Fm (0,810) відмічено за органічної системи удобрення (Леонардит) з дворазовим підживленням (А₂В₄). На контролі без підживлення (А₁В₁) Fv/Fm становив 0,771. Характерно, що за органічної системи середнє по фактору А₂ (0,797) перевищувало мінеральну (А₃ = 0,790). Це може бути пов'язано з комплексним впливом гумінових кислот Леонардиту на стабільність мембран хлоропластів та антиоксидантний захист [13, 15]. На контрольних ділянках середнє Fv/Fm становило 0,782. Низький V (1,3%) свідчить про високу стабільність цього показника.

Індекс продуктивності PI(abs). На відміну від Fv/Fm, показник PI(abs) продемонстрував значно ширший діапазон варіювання (табл. 3), що підтверджує його вищу чутливість до зміни умов живлення [10, 11]. Середні значення PI(abs) становили від 2,59 відн. од. на контролі (А₁В₁) до 3,75 відн. од. за органічної системи з дворазовим підживленням (А₂В₄) – різниця 44,8%.

За органічної системи (Леонардит) PI(abs) був стабільно вищим (середнє по А₂ = 3,39), ніж за мінеральної (А₃ = 3,18), незважаючи на нижчу загальну врожайність. Це свідчить про специфічний вплив Леонардиту на реакційні центри ФС II [15, 21]. Динаміка PI(abs) по роках демонструвала стійке зростання від 1,82–2,63 відн. од. у 2021 р. до 3,04–4,41 відн. од. у 2025 р., відображаючи покращення фізіологічного стану з віком плантації.

Таблиця 1

Відносний вміст хлорофілу (SPAD) у листках міскантусу гігантського залежно від системи удобрення та підживлення гуматами, ум. од. (2021–2025 рр.)

Фактор А	Фактор В	Роки досліджень					Серед.	±SD	V,%
		2021	2022	2023	2024	2025			
Контроль (без добрив)	Без підживлення	34,2	37,8	40,5	41,8	42,5	39,4	3,4	8,6
	Гумат калію, куціння	36,1	39,9	42,8	44,2	44,9	41,6	3,6	8,7
	Гумат калію, вих. в тр.	35,6	39,3	42,1	43,5	44,2	40,9	3,5	8,6
	Гумат калію, обидві	37,8	41,7	44,7	46,1	46,9	43,4	3,7	8,6
Леонардит, 100 кг/га	Без підживлення	37,5	41,4	44,4	45,9	46,6	43,2	3,7	8,7
	Гумат калію, куціння	39,6	43,7	46,9	48,5	49,2	45,6	4,0	8,7
	Гумат калію, вих. в тр.	39,0	43,1	46,2	47,7	48,5	44,9	3,9	8,7
	Гумат калію, обидві	41,4	45,7	49,0	50,6	51,4	47,6	4,1	8,6
N ₆₀ P ₁₆ K ₈₀	Без підживлення	40,1	44,3	47,5	49,1	49,9	46,2	4,0	8,7
	Гумат калію, куціння	42,4	46,8	50,2	51,8	52,7	48,8	4,2	8,6
	Гумат калію, вих. в тр.	41,7	46,1	49,4	51,0	51,9	48,0	4,2	8,7
	Гумат калію, обидві	44,3	48,9	52,4	54,1	55,0	50,9	4,4	8,6
HIP _{0,05} А		2,6					–	–	–
HIP _{0,05} В		3,6					–	–	–

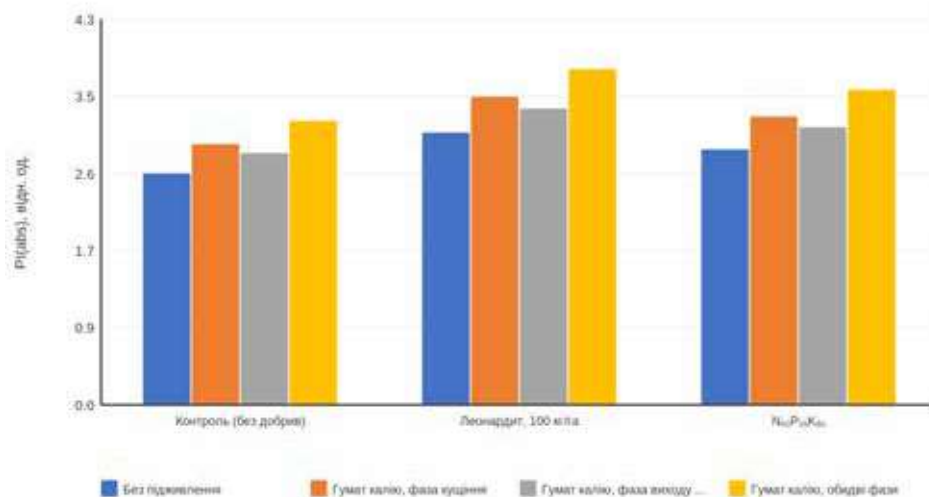


Рис. 1. Відносний вміст хлорофілу (SPAD) у листках міскантусу гігантського залежно від системи удобрення та підживлення гуматами (середнє за 2021–2025 рр.)

Таблиця 2

Максимальний квантовий вихід фотосистеми II (Fv/Fm) міскантусу гігантського залежно від системи удобрення та підживлення гуматами (2021–2025 рр.)

Фактор А	Фактор В	Роки досліджень					Серед.	±SD	V,%
		2021	2022	2023	2024	2025			
Контроль (без добрив)	Без підживлення	0,756	0,768	0,774	0,778	0,780	0,771	0,010	1,3
	Гумат калію, кущіння	0,768	0,780	0,786	0,790	0,793	0,783	0,010	1,3
	Гумат калію, вих. в тр.	0,763	0,775	0,781	0,785	0,788	0,778	0,010	1,3
	Гумат калію, обидві	0,779	0,791	0,798	0,802	0,805	0,795	0,010	1,3
Леонардит, 100 кг/га	Без підживлення	0,771	0,783	0,789	0,793	0,796	0,786	0,010	1,3
	Гумат калію, кущіння	0,783	0,795	0,802	0,806	0,809	0,799	0,010	1,3
	Гумат калію, вих. в тр.	0,778	0,790	0,797	0,801	0,804	0,794	0,010	1,3
	Гумат калію, обидві	0,794	0,806	0,813	0,817	0,820	0,810	0,010	1,3
N ₆₀ P ₁₆ K ₆₀	Без підживлення	0,764	0,776	0,782	0,786	0,789	0,779	0,010	1,3
	Гумат калію, кущіння	0,776	0,788	0,795	0,799	0,802	0,792	0,010	1,3
	Гумат калію, вих. в тр.	0,771	0,783	0,790	0,794	0,797	0,787	0,010	1,3
	Гумат калію, обидві	0,787	0,799	0,806	0,810	0,813	0,803	0,010	1,3
HIP _{0,05} A		0,008					–	–	–
HIP _{0,05} B		0,009					–	–	–

Порівняльний аналіз трьох досліджених параметрів дозволив встановити важливу закономірність: показники SPAD та PI(abs) є значно чутливішими індикаторами впливу удобрення порівняно з Fv/Fm. Коефіцієнт варіації між варіантами для SPAD становив 8,6–8,7%, для PI(abs) – 19,5–19,7%, тоді як для Fv/Fm – лише 1,3%. Це підтверджує рекомендації Baker [8] та Stirbet et al. [22] щодо переваги використання PI(abs) як діагностичного показника стресу рослин.

Встановлений специфічний ефект Леонардиту (вищі значення Fv/Fm та PI(abs) порівняно з мінеральною системою при нижчих показниках SPAD) свідчить про те, що гумінові кислоти впливають не стільки на кількість

хлорофілу, скільки на ефективність функціонування фотосинтетичного апарату. Подібне явище описували Aguiar et al. [23] для кукурудзи та Shah et al. [24] для пшениці.

Висновки. Вміст хлорофілу (SPAD) зростає від 34,2–44,3 ум. од. (2021 р.) до 42,5–55,0 ум. од. (2025 р.). Мінеральна система удобрення N₆₀P₁₆K₆₀ забезпечувала найвищі показники (50,9 ум. од. за дворазового підживлення), перевищуючи контроль на 29,2%. Дворазове підживлення гуматом калію додатково збільшувало SPAD на 8,5–10,2%.

Значення Fv/Fm (0,756–0,820) свідчили про задовільний функціональний стан ФС II у всіх варіантах.

Таблиця 3

Індекс продуктивності PI(abs) за даними ОЖР-тесту міскантусу гігантського (2021–2025 рр.)

Фактор А	Фактор В	Роки досліджень					Серед.	±SD	V,%
		2021	2022	2023	2024	2025			
Контроль (без добрив)	Без підживлення	1,82	2,34	2,78	2,95	3,04	2,59	0,51	19,6
	Гумат калію, кущіння	2,05	2,64	3,14	3,33	3,43	2,92	0,57	19,6
	Гумат калію, вих. в тр.	1,98	2,55	3,03	3,21	3,31	2,82	0,55	19,6
	Гумат калію, обидві	2,24	2,88	3,42	3,63	3,74	3,18	0,62	19,5
Леонардит, 100 кг/га	Без підживлення	2,14	2,76	3,28	3,48	3,58	3,05	0,60	19,6
	Гумат калію, кущіння	2,41	3,11	3,70	3,92	4,04	3,44	0,68	19,7
	Гумат калію, вих. в тр.	2,33	3,01	3,57	3,79	3,90	3,32	0,65	19,6
	Гумат калію, обидві	2,63	3,39	4,03	4,28	4,41	3,75	0,74	19,7
N ₆₀ P ₁₆ K ₈₀	Без підживлення	2,01	2,59	3,07	3,26	3,36	2,86	0,56	19,6
	Гумат калію, кущіння	2,27	2,92	3,47	3,68	3,79	3,23	0,63	19,6
	Гумат калію, вих. в тр.	2,19	2,82	3,35	3,55	3,66	3,11	0,61	19,6
	Гумат калію, обидві	2,48	3,18	3,78	4,01	4,13	3,52	0,69	19,5
H _{IP} 0,05 A		0,40					–	–	–
H _{IP} 0,05 B		0,46					–	–	–

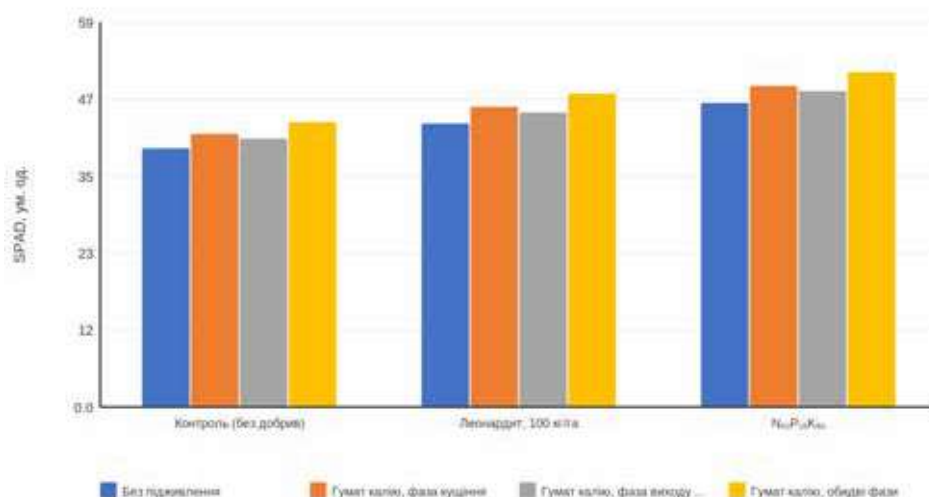


Рис. 2. Індекс продуктивності PI(abs) міскантусу гігантського залежно від системи удобрення та підживлення гуматами (середнє за 2021–2025 рр.)

Органічна система (Леонардит) забезпечувала вищі показники ($A_2 = 0,797$), ніж мінеральна ($A_3 = 0,790$), що пов'язано з комплексним впливом гумінових кислот на стабільність хлоропластів.

Індекс PI(abs) (2,59–3,75 відн. од.) виявився значно чутливішим індикатором, ніж Fv/Fm. За органічної системи з дворазовим підживленням PI(abs) був на 44,8% вищим, ніж на контролі. Леонардит здійснює специфічний позитивний вплив на реакційні центри ФС II, підвищуючи їх функціональну активність.

Перспективи подальших досліджень полягають у встановленні кореляційних залежностей між параметрами флуоресценції хлорофілу та врожайністю біомаси міскантусу, а також у вивченні впливу досліджуваних факторів на енергетичну цінність біомаси.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- Lewandowski I., Clifton-Brown J.C., Scurlock J.M.O., Huisman W. Miscanthus: European experience with a novel energy crop. Biomass and Bioenergy. 2000. Vol. 19, No. 4. P. 209–227. DOI: 10.1016/S0961-9534(00)00032-5.
- Sage R.F., Zhu X.-G. Exploiting the engine of C4 photosynthesis. Journal of Experimental Botany. 2011. Vol. 62, No. 9. P. 2989–3000. DOI: 10.1093/jxb/err179.
- Kalaji H.M., Schansker G., Ladle R.J. et al. Frequently asked questions about in vivo chlorophyll fluorescence: practical issues. Photosynthesis Research. 2014. Vol. 122, No. 2. P. 121–158. DOI: 10.1007/s11120-014-0024-6.
- Markwell J., Osterman J.C., Mitchell J.L. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter.

- Photosynthesis Research. 1995. Vol. 46. P. 467–472. DOI: 10.1007/BF00032301.
5. Xiong D., Chen J., Yu T. et al. SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics. *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. Article 13389. DOI: 10.1038/srep13389.
 6. Cadoux S., Riche A.B., Yates N.E., Machet J.-M. Nutrient requirements of *Miscanthus × giganteus*: conclusions from a review of published studies. *Biomass and Bioenergy*. 2012. Vol. 38. P. 14–22. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.01.015.
 7. Maxwell K., Johnson G.N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *Journal of Experimental Botany*. 2000. Vol. 51, No. 345. P. 659–668. DOI: 10.1093/jexbot/51.345.659.
 8. Baker N.R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*. 2008. Vol. 59. P. 89–113. DOI: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759.
 9. Björkman O., Demmig B. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. *Planta*. 1987. Vol. 170. P. 489–504. DOI: 10.1007/BF00402983.
 10. Strasser R.J., Tsimilli-Michael M., Srivastava A. Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient. In: Papageorgiou G.C., Govindjee (Eds.) *Chlorophyll a Fluorescence*. Springer, Dordrecht, 2004. P. 321–362. DOI: 10.1007/978-1-4020-3218-9_12.
 11. Stirbet A., Lázár D., Kromdijk J., Govindjee. Chlorophyll a fluorescence induction: Can just a one-second measurement be used to quantify abiotic stress responses? *Photosynthetica*. 2018. Vol. 56. P. 86–104. DOI: 10.1007/s11099-018-0770-3.
 12. Canellas L.P., Olivares F.L., Aguiar N.O. et al. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*. 2015. Vol. 196. P. 15–27. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.013.
 13. Nardi S., Pizzeghello D., Muscolo A., Vianello A. Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry*. 2002. Vol. 34, No. 11. P. 1527–1536. DOI: 10.1016/S0038-0717(02)00174-8.
 14. Rose M.T., Patti A.F., Little K.R. et al. A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances. *Advances in Agronomy*. 2014. Vol. 124. P. 37–89. DOI: 10.1016/B978-0-12-800138-7.00002-4.
 15. Jannin L., Arkoun M., Ourry A. et al. Microarray analysis of humic acid effects on *Brassica napus* growth: involvement of N, C and S metabolisms. *Plant and Soil*. 2012. Vol. 359. P. 297–319. DOI: 10.1007/s11104-012-1191-x.
 16. Trevisan S., Francioso O., Quaggiotti S., Nardi S. Humic substances biological activity at the plant-soil interface. *Plant Signaling & Behavior*. 2010. Vol. 5, No. 6. P. 635–643. DOI: 10.4161/psb.5.6.11211.
 17. Eyheraguibel B., Silvestre J., Morard P. Effects of humic substances derived from organic waste enhancement on the growth and mineral nutrition of maize. *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99, No. 10. P. 4206–4212. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.08.082.
 18. Рахметов Д.Б. Теоретичні та прикладні аспекти інтродукції рослин в Україні. Київ : Аграр Медіа Груп, 2011. 398 с.
 19. Пономаренко С.П. Регулятори росту рослин на основі N-оксидів похідних піридину. Київ : Техніка, 1999. 272 с.
 20. Tsimilli-Michael M., Strasser R.J. In vivo assessment of stress impact on plant's vitality: applications in detecting and evaluating the beneficial role of mycorrhization on host plants. In: Varma A. (Ed.) *Mycorrhiza*. Springer, Berlin, 2008. P. 679–703. DOI: 10.1007/978-3-540-78826-3_32.
 21. Zub H.W., Brancourt-Hulmel M. Agronomic and physiological performances of different species of *Miscanthus*, a major energy crop. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2010. Vol. 30, No. 2. P. 201–214. DOI: 10.1051/agro/2009034.
 22. Stirbet A., Govindjee. On the relation between the Kautsky effect (chlorophyll a fluorescence induction) and Photosystem II. *Biophysical Reviews*. 2012. Vol. 4. P. 187–210. DOI: 10.1007/s12551-012-0065-8.
 23. Aguiar N.O., Medici L.O., Olivares F.L. et al. Metabolic profile and antioxidant responses during drought stress recovery in sugarcane treated with humic acids and endophytic diazotrophic bacteria. *Annals of Applied Biology*. 2016. Vol. 168. P. 203–213. DOI: 10.1111/aab.12256.
 24. Shah Z.H., Rehman H.M., Akhtar T. et al. Humic substances: determining potential molecular regulatory processes in plants. *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9. Article 263. DOI: 10.3389/fpls.2018.00263.

REFERENCES:

1. Lewandowski, I., Clifton-Brown, J.C., Scurlock, J.M.O., Huisman, W. (2000). *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy*, vol. 19(4), pp. 209–227. DOI: 10.1016/S0961-9534(00)00032-5.
2. Sage, R.F., Zhu, X.-G. (2011). Exploiting the engine of C4 photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, vol. 62(9), pp. 2989–3000. DOI: 10.1093/jxb/err179.
3. Kalaji, H.M. et al. (2014). Frequently asked questions about in vivo chlorophyll fluorescence: practical issues. *Photosynthesis Research*, vol. 122(2), pp. 121–158. DOI: 10.1007/s11120-014-0024-6.
4. Markwell, J., Osterman, J.C., Mitchell, J.L. (1995). Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research*, vol. 46, pp. 467–472. DOI: 10.1007/BF00032301.
5. Xiong, D. et al. (2015). SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics. *Scientific Reports*, vol. 5, article 13389. DOI: 10.1038/srep13389.
6. Cadoux, S., Riche, A.B., Yates, N.E., Machet, J.-M. (2012). Nutrient requirements of *Miscanthus × giganteus*. *Biomass and Bioenergy*, vol. 38, pp. 14–22. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.01.015.
7. Maxwell, K., Johnson, G.N. (2000). Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, vol. 51(345), pp. 659–668. DOI: 10.1093/jexbot/51.345.659.
8. Baker, N.R. (2008). Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, vol. 59, pp. 89–113. DOI: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759.
9. Björkman, O., Demmig, B. (1987). Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence. *Planta*, vol. 170, pp. 489–504. DOI: 10.1007/BF00402983.

10. Strasser, R.J., Tsimilli-Michael, M., Srivastava, A. (2004). Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient. In: Chlorophyll a Fluorescence. Springer, pp. 321–362. DOI: 10.1007/978-1-4020-3218-9_12.
11. Stirbet, A., Lazár, D., Kromdijk, J., Govindjee (2018). Chlorophyll a fluorescence induction. Photosynthetica, vol. 56, pp. 86–104. DOI: 10.1007/s11099-018-0770-3.
12. Canellas, L.P. et al. (2015). Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. Scientia Horticulturae, vol. 196, pp. 15–27. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.013.
13. Nardi, S. et al. (2002). Physiological effects of humic substances on higher plants. Soil Biology and Biochemistry, vol. 34(11), pp. 1527–1536. DOI: 10.1016/S0038-0717(02)00174-8.
14. Rose, M.T. et al. (2014). A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances. Advances in Agronomy, vol. 124, pp. 37–89. DOI: 10.1016/B978-0-12-800138-7.00002-4.
15. Jannin, L. et al. (2012). Microarray analysis of humic acid effects on Brassica napus growth. Plant and Soil, vol. 359, pp. 297–319. DOI: 10.1007/s11104-012-1191-x.
16. Trevisan, S. et al. (2010). Humic substances biological activity at the plant-soil interface. Plant Signaling & Behavior, vol. 5(6), pp. 635–643. DOI: 10.4161/psb.5.6.11211.
17. Eyheraguibel, B., Silvestre, J., Morard, P. (2008). Effects of humic substances derived from organic waste. Bioresource Technology, vol. 99(10), pp. 4206–4212. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.08.082.
18. Rakhmetov D.B. (2011). Teoretychni ta prykladni aspekty introduktsii roslyn v Ukraini. Kyiv: Ahrar Media Hrup, 398 s. [in Ukrainian].
19. Ponomarenko S.P. (1999). Rehulatory rostu roslyn na osnovi N-oksydiv pokhidnykh prydynu. Kyiv: Tekhnika, 272 s. [in Ukrainian].
20. Tsimilli-Michael, M., Strasser, R.J. (2008). In vivo assessment of stress impact on plant's vitality. In: Mycorrhiza. Springer, pp. 679–703. DOI: 10.1007/978-3-540-78826-3_32.
21. Zub, H.W., Brancourt-Hulmel, M. (2010). Agronomic and physiological performances of different species of Miscanthus. Agronomy for Sustainable Development, vol. 30(2), pp. 201–214. DOI: 10.1051/agro/2009034.
22. Stirbet, A., Govindjee (2012). On the relation between the Kautsky effect and Photosystem II. Biophysical Reviews, vol. 4, pp. 187–210. DOI: 10.1007/s12551-012-0065-8.
23. Aguiar, N.O. et al. (2016). Metabolic profile and antioxidant responses during drought stress recovery in sugarcane. Annals of Applied Biology, vol. 168, pp. 203–213. DOI: 10.1111/aab.12256.
24. Shah, Z.H. et al. (2018). Humic substances: determining potential molecular regulatory processes in plants. Frontiers in Plant Science, vol. 9, article 263. DOI: 10.3389/fpls.2018.00263.

Носенко В.Г. Функціональний стан фотосинтетичного апарату міскантусу гігантського за різних систем удобрення та підживлення гуматом калію

У статті наведено результати п'ятирічних досліджень (2021–2025 рр.) функціонального стану фотосинтетичного апарату міскантусу гігантського (*Miscanthus × giganteus*) сорту Осінній зорецьвіт, вирощуваного в умовах Лісостепу України. Дослідження проводили у ВП

НУБІП України «Великоснітинське ім. О.В. Музиченка» Фастівського району Київської області на чорноземі опідзоленому сильнозмитому легкосуглинковому. Схема двофакторного повнофакторного дослідження передбачала вивчення трьох систем удобрення: без добрив (контроль), органічної із внесенням Леонардиту в нормі 100 кг/га та мінеральної із застосуванням $N_{60}P_{16}K_{60}$, а також чотирьох режимів позакореневого підживлення гуматом калію: без обробки, у фазу куштиння, у фазу виходу в трубку та дворазово в обидві фази по 2 л/га. Функціональний стан фотосинтетичного апарату оцінювали за показниками відносного вмісту хлорофілу (SPAD-502, Konica Minolta), максимального квантового виходу фотосистеми II (Fv/Fm) та індексу продуктивності PI(abs), визначеного за даними OJIP-тесту. Встановлено, що вміст хлорофілу в листках міскантусу зростав упродовж років досліджень від 34,2–44,3 ум. од. у 2021 р. до 42,5–55,0 ум. од. у 2025 р. Найвищі значення SPAD формувалися за мінеральної системи удобрення – у середньому 46,2–50,9 ум. од., що перевищувало контроль на 17,3–19,7%. Дворазове позакореневе підживлення гуматом калію забезпечувало додаткове зростання SPAD на 8,5–10,2%. Значення Fv/Fm у межах 0,756–0,820 свідчили про задовільний фізіологічний стан рослин і відсутність вираженого фотоінгібування, тоді як органічна система удобрення на основі Леонардиту забезпечувала дещо вищі середні значення цього показника (0,797) порівняно з мінеральною системою (0,790). Індекс PI(abs) виявився чутливішим інтегральним індикатором функціонування фотосистеми II: його значення варіювали від 2,59 до 3,75 відн. од., а за органічної системи удобрення у поєднанні з дворазовим підживленням гуматом калію перевищували контроль на 44,8%. Отримані результати підтверджують специфічний позитивний вплив гумінових кислот Леонардиту на активність реакційних центрів фотосистеми II та доцільність поєднання ґрунтового удобрення з позакореневими обробками для підвищення фотосинтетичної активності й адаптивного потенціалу міскантусу як перспективної біоенергетичної культури.

Ключові слова: міскантус гігантський, хлорофіл, SPAD, флуоресценція хлорофілу, Fv/Fm, OJIP-тест, PI(abs), фотосистема II, гумат калію, Леонардит, система удобрення, біоенергетичні культури.

Nosenko V.G. Functional state of the photosynthetic apparatus of *Miscanthus × giganteus* under different fertilization systems and potassium humate foliar application

The article presents the results of a five-year study (2021–2025) on the functional state of the photosynthetic apparatus of *Miscanthus × giganteus* cv. Osinnii Zoretsvit grown in the Forest-Steppe of Ukraine. The experiment was conducted at the educational farm of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine in the Fastiv district of Kyiv region on podzolized chernozem. A two-factor design included three fertilization systems (control, Leonardite 100 kg/ha, and $N_{60}P_{16}K_{60}$) and four foliar application regimes of potassium humate. Plant response was assessed using a SPAD-502 chlorophyll meter, maximum quantum yield of photosystem II (Fv/Fm), and the performance index PI(abs) from the OJIP chlorophyll fluorescence test. Chlorophyll content increased from 34.2–44.3 SPAD units in 2021 to 42.5–55.0 units in 2025. The mineral fertilization system provided the highest SPAD values, reaching 50.9 units under double foliar application

and exceeding the control by 29.2%. Potassium humate additionally increased SPAD by 8.5–10.2%. The Fv/Fm values ranged from 0.756 to 0.820, indicating a generally satisfactory condition of photosystem II. The organic system with Leonardite produced slightly higher mean Fv/Fm values (0.797) than the mineral system (0.790), which may reflect the stabilizing effect of humic substances on chloroplast membranes. PI(abs) proved to be the most sensitive indicator, varying from 2.59 to 3.75 relative units. Under the organic system combined with double foliar application,

PI(abs) exceeded the control by 44.8%, confirming a marked positive effect of Leonardite humic acids on PSII reaction centres. The results confirm the effectiveness of combining soil fertilization and foliar biostimulant treatment to improve the photosynthetic activity and adaptive potential of miscanthus as a bioenergy crop.

Key words: *Miscanthus × giganteus*, chlorophyll, SPAD, chlorophyll fluorescence, Fv/Fm, OJIP test, PI(abs), photosystem II, potassium humate, Leonardite, fertilization system, bioenergy crops

Дата першого надходження статті до видання: 02.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026