

УДК 633.88:581.132:631.811.98

Параметри газообміну та функціональний стан фотосистеми міскантусу гігантського за різних систем удобрення й підживлення гуматом калію

В. Г. Носенко 

Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

Автор для листування: Валерій Носенко, nosenko.v@ukr.net

Цитування: Носенко В. Г. Параметри газообміну та функціональний стан фотосистеми міскантусу гігантського за різних систем удобрення й підживлення гуматом калію. *Біоенергетика*. 2026. № 1. С. 77–83. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp77-83>

Мета. Установити закономірності зміни параметрів газообміну (інтенсивності фотосинтезу, транспірації, провідності продохів і ефективності використання води) та показників флуоресценції хлорофілу [Fv/Fm, PI(abs)] міскантусу гігантського залежно від системи удобрення і позакореневого підживлення гуматом калію. **Методи.** Дослідження проводили упродовж 2021–2025 рр. у ВП НУБІП «Великоснітинське ім. О. В. Музиченка» на чорноземі опідзоленому сильнозмитому. Схема досліду включала три системи удобрення: без добрив, органічну (Леонардит, 100 кг/га) та мінеральну (N₆₀P₁₆K₈₀), а також чотири варіанти підживлення гуматом калію (2 л/га). Параметри газообміну визначали системою LI-6200, показники флуоресценції хлорофілу – флуориметром Handy PEA. Статистичну обробку результатів здійснювали методом дисперсійного аналізу. **Результати.** Установлено, що покращення умов мінерального живлення та застосування гумату калію сприяли синхронному підвищенню всіх параметрів газообміну. Інтенсивність фотосинтезу зростала від 16,2–22,7 до 24,1–33,7 мкмоль CO₂/м²·с залежно від року та варіанта досліду. Максимальні значення отримано за поєднання мінеральної системи удобрення з дворазовим підживленням гуматом калію, де приріст фотосинтезу відносно контролю становив 40,1%. Мінеральна система забезпечувала найвищі показники фотосинтетичної активності, однак органічна система характеризувалася кращим функціональним станом фотосистеми II: Fv/Fm становив 0,797, PI(abs) – 3,39, що перевищувало відповідні значення за мінерального удобрення. Виявлено високу чутливість PI(abs) до змін умов живлення порівняно з Fv/Fm. Доведено тісний лінійний зв'язок між інтенсивністю фотосинтезу та провідністю продохів ($r = 0,99$), що свідчить про домінування продохового механізму регуляції фотосинтезу. Дворазове підживлення гуматом калію підвищувало фотосинтез на 11,7–12,9%, а провідність продохів – на 12,5–13,5%. Органічна система з використанням гуматів забезпечувала близько 72% ефекту мінерального удобрення. **Висновки.** Поєднання удобрення з позакореневим підживленням гуматом калію суттєво активізує газообмін та поліпшує функціональний стан фотосинтетичного апарату міскантусу гігантського. Мінеральна система є найбільш ефективною для підвищення фотосинтетичної продуктивності, тоді як органічна сприяє стабілізації роботи фотосистеми II та оптимізації фізіологічного стану рослин.

Ключові слова: міскантус гігантський; інтенсивність фотосинтезу; ефективність використання води; транспірація; провідність продохів; Fv/Fm; PI(abs); ОЖР-тест; флуоресценція хлорофілу; Леонардит; гумат калію.

Одержано 16.02.2026 • Погоджено 13.03.2026 • Опубліковано онлайн 18.05.2026



© Автор(и), 2026. Видавець Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Це стаття відкритого доступу, що розповсюджується на умовах ліцензії CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), яка дозволяє використання, розповсюдження та відтворення на будь-яких носіях за умови належного цитування оригінальної роботи.

Вступ

Газообмін листків є визначальним процесом формування продуктивності біоенергетичних культур [1]. Для С4-рослин, зокрема міскантусу, інтенсивність нетто-фотосинтезу становить 15–35 мкмоль $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{с}$ [2, 3]. WUE є критично важливим параметром в умовах аридизації клімату [4]. Продихова провідність регулює баланс фіксації CO_2 та транспіраційних втрат [5].

Флуоресценція хлорофілу є потужним неруйнівним методом оцінки стану ФС II [6, 7]. F_v/F_m характеризує максимальну квантову ефективність (оптимум 0,75–0,85), а $PI(\text{abs})$ за JIP-тестом [8] є значно чутливішим інтегральним індикатором [9]. Malinská та ін. [10] показали, що F_v/F_m та $PI(\text{abs})$ є ефективними маркерами стресу міскантусу на бідних ґрунтах.

Гумінові речовини впливають на газообмін через стимуляцію кореневої системи, покращення водозабезпечення та модуляцію продихового апарату [11, 12]. Shah та ін. [13] встановили, що гумати модулюють експресію генів фотосинтетичного транспорту. Shen та ін. [14] показали підвищення g_s та фотосинтезу проса за обробки гумінових кислот. Pogrzeba та ін. [15] підтвердили ефект NPK на газообмін міскантусу. Однак комплексних досліджень газообміну та флуоресценції хлорофілу міскантусу за поєднання різних систем удобрення з гуматами не проводилося.

Мета дослідження – встановити закономірності зміни параметрів газообміну [A , E , g_s , WUE) та показників флуоресценції хлорофілу (F_v/F_m , $PI(\text{abs})$] міскантусу гігантського залежно від системи удобрення та підживлення гуматом калію.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження проводили у 2021–2025 рр. у ВП НУБіП «Великоснітинське ім. О. В. Музиченка» (Фастівський р-н, Київська обл.) на чорноземі опідзоленому сильнозмитому (гумус 1,43%, N – 70,6 мг/кг, P_2O_5 – 66,6 мг/кг, K_2O – 123,7 мг/кг, pH_{KCl} 5,76).

Дослід – двофакторний, повторність – триразова. Площа посівної ділянки – 50 м^2 , облікової – 35 м^2 . Культура – міскантус гігантський, сорт ‘Осінній зорецьвіт’. Фактор А (система удобрення): A_1 – контроль (без добрив); A_2 – органічна система (щорічне внесення Леонардиту, 100 кг/га по мерзлоталому ґрунту навесні); A_3 – мінеральна система ($N_{60}P_{16}K_{80}$). Фактор В (позакореневе підживлення гуматом калію, 2 л/га): B_1 – без підживлення; B_2 – у фазі кущіння; B_3 – у фазі виходу в трубку; B_4 – в обидві фази.

Параметри газообміну визначали системою LI-6200 (LI-COR) при ФАР 1500 мкмоль/ $\text{м}^2\cdot\text{с}$. F_v/F_m та $PI(\text{abs})$ – флуориметром Handy PEA (Hansatech) після 20 хв темної адаптації [8]. Статистика – ANOVA [16].

Результати дослідження

Функціональний стан ФС II

Порівняльний аналіз F_v/F_m та $PI(\text{abs})$ (рис. 1) виявив важливу закономірність: за органічної системи (Леонардит) значення обох показників були вищими ($F_v/F_m = 0,797$; $PI(\text{abs}) = 3,39$), ніж за мінеральної (0,790 та 3,18 відповідно), незважаючи на нижчу загальну продуктивність. $PI(\text{abs})$ продемонстрував значно вищу чутливість (діапазон варіювання 2,59–3,75 відн. од.), ніж F_v/F_m (0,756–0,820). Це підтверджує рекомендації Stirbet et al. [9] щодо переваг $PI(\text{abs})$ як діагностичного показника.

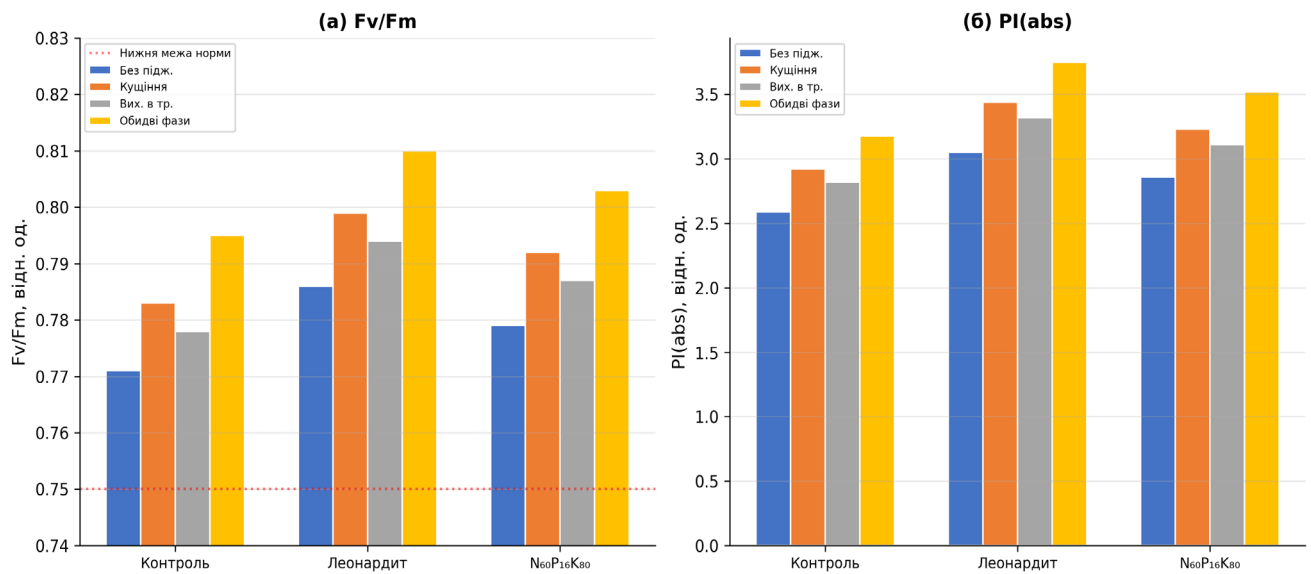


Рис. 1. Fv/Fm (а) та PI(abs) (б) міскантусу за системами удобрення та підживлення (середнє за 2021–2025 рр.)

Таблиця 1. Інтенсивність фотосинтезу міскантусу гігантського (вибіркові варіанти), мкмоль CO₂/м²·с

Фактор А	Фактор В	Роки досліджень					Серед.	± SD	V,%
		2021	2022	2023	2024	2025			
Контроль	Без підживлення	16,2	19,8	22,4	23,6	24,1	21,2	3,3	15,4
	Обидві фази	18,3	22,4	25,3	26,7	27,2	24,0	3,7	15,4
Леонардит	Без підживлення	18,5	22,6	25,5	26,9	27,5	24,2	3,7	15,3
	Обидві фази	20,9	25,5	28,8	30,4	31,1	27,3	4,2	15,4
N60P16K80	Без підживлення	20,1	24,5	27,7	29,2	29,8	26,3	4,0	15,3
	Обидві фази	22,7	27,7	31,3	33,0	33,7	29,7	4,5	15,3
NIP _{0,05} A							–	–	–
NIP _{0,05} B							–	–	–

Комплексна динаміка газообміну

Чотирипанельний рисунок (рис. 2) демонструє синхронне зростання всіх параметрів газообміну з віком плантації та за покращення умов живлення. Мінеральна система стабільно перевищувала Леонардит та контроль. WUE (панель б) також зростала з роками, незважаючи на одночасне підвищення транспірації – фотосинтез випереджав [4].

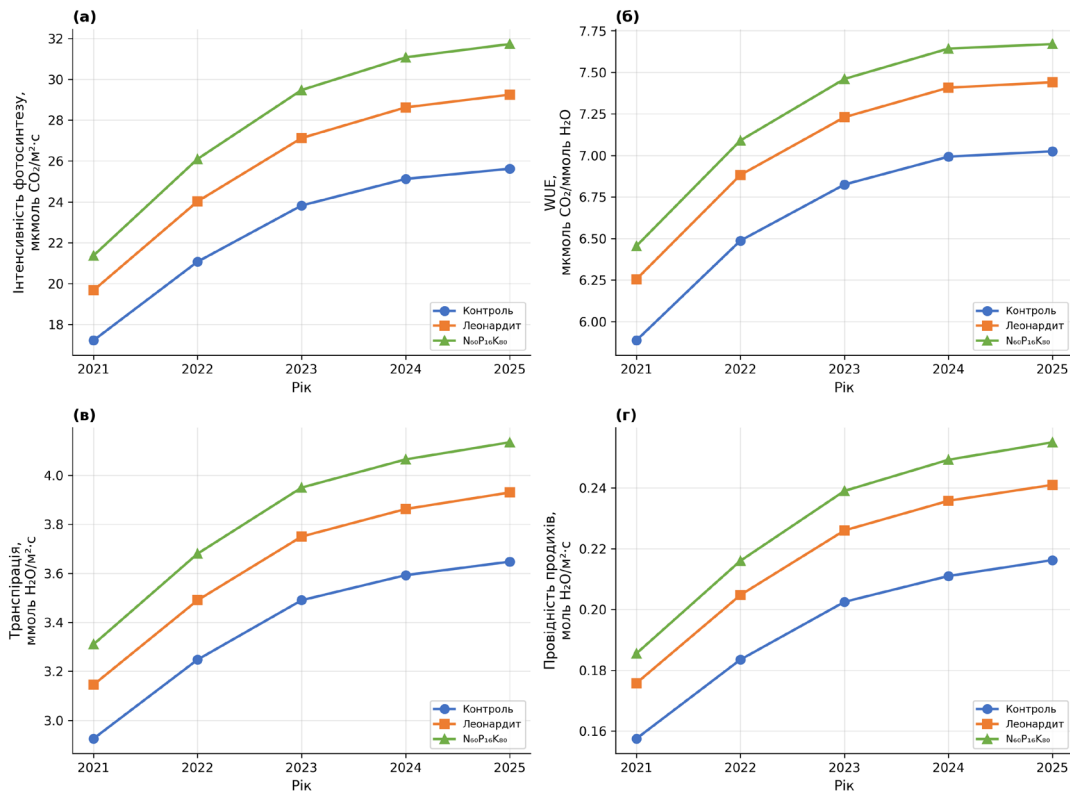


Рис. 2. Динаміка параметрів газообміну за системами удобрення: (а) фотосинтез, (б) WUE, (в) транспірація, (г) провідність продихів

Залежність фотосинтезу від провідності продихів (рис. 3) виявила тісну лінійну кореляцію ($r = 0,99$), що свідчить про продиховий контроль фотосинтезу як основний механізм. Хмари точок кожної системи удобрення займають окремі зони діаграми – від нижнього лівого (контроль) до верхнього правого (N₆₀P₁₆K₈₀), що підтверджує системний характер впливу удобрення [15, 17].

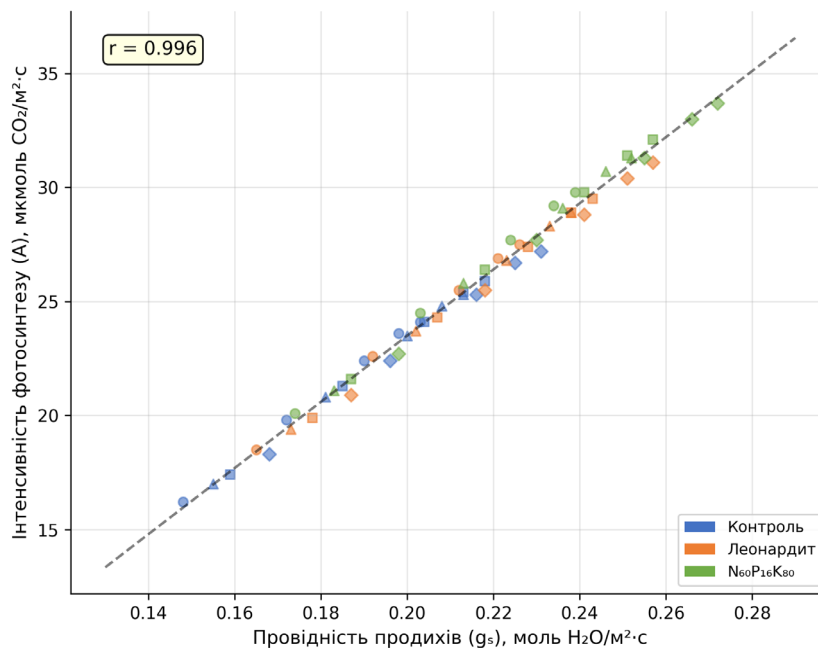


Рис. 3. Залежність інтенсивності фотосинтезу від провідності продихів ($r = 0,99$)

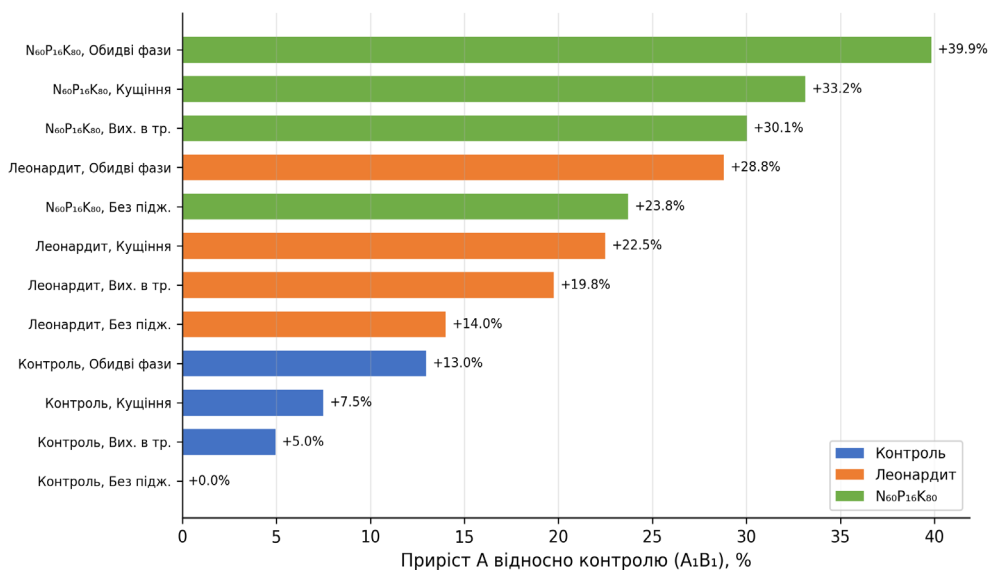


Рис. 4. Приріст інтенсивності фотосинтезу відносно контролю (A1B1) за різних варіантів

Ранжування варіантів (рис. 4) показало максимальний приріст +40,1% (A3B4). Важливо, що навіть «Леонардит без підживлення» (+14,2%) перевищував «Контроль + обидві фази» (+13,2%), що свідчить про домінування фактора удобрення. Органічна система з гуматами (+28,8%) забезпечує 72% ефекту мінеральної при значно нижчих витратах.

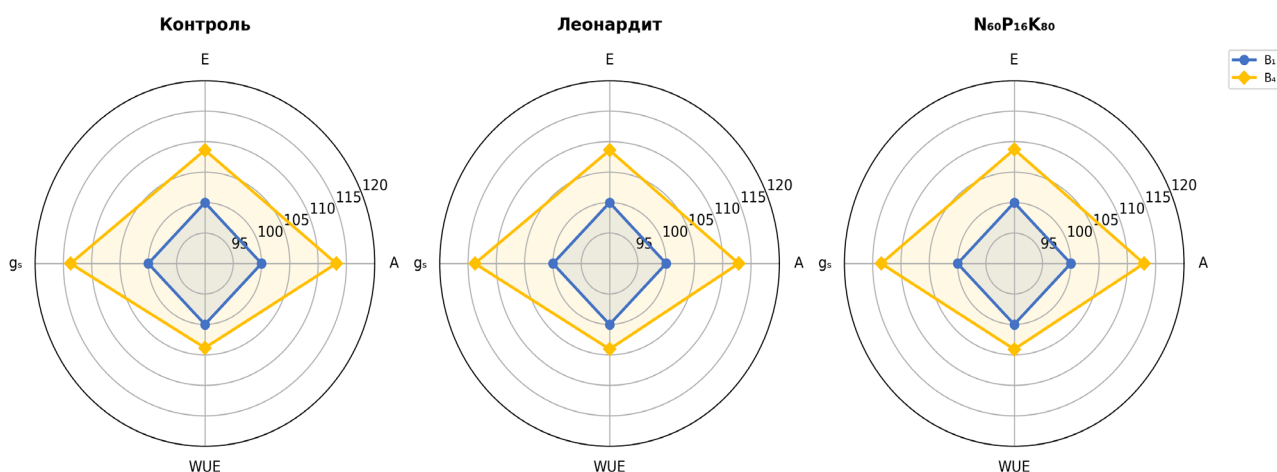


Рис. 5. Відносний ефект дворазового підживлення (B4 vs B1 = 100%) на параметри газообміну

Радарні діаграми (рис. 5) підтверджують універсальність механізму дії гуматів: профіль впливу подібний для всіх систем удобрення з найвираженішим ефектом на g_s (+12,5–13,5%). Це узгоджується з гіпотезою про стимуляцію кореневої системи та покращення водозабезпечення [11, 18].

Висновки

Інтенсивність фотосинтезу зростала від 16,2–22,7 до 24,1–33,7 мкмоль $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{с}$. Мінеральна система перевищувала контроль на 24,3%. WUE (5,77–7,82) зростала з роками – C4-механізм забезпечує відсутність компромісу «фотосинтез–транспірація». Кореляція $A-g_s$ ($r = 0,99$) підтверджує продиховий контроль фотосинтезу. За органічної системи Fv/Fm та PI(abs) вищі, ніж за мінеральної – специфічний ефект гумінових кислот на ФС II. Дворазове підживлення підвищувало A на 11,7–12,9%, g_s – на 12,5–13,5%.

Перспективи подальших досліджень полягають у вивченні впливу кліматичних стресів на газообмін міскантусу та оцінці зв'язку параметрів флуоресценції з врожайністю.

Список використаних джерел

1. Long, S. P., Zhu, X., Naidu, S. L., & Ort, D. R. (2006). Can improvement in photosynthesis increase crop yields? *Plant, Cell & Environment*, 29(3), 315–330. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01493.x>
2. Naidu, S. L., & Long, S. P. (2004). Potential mechanisms of low-temperature tolerance of C4 photosynthesis in *Miscanthus × giganteus*: An *in vivo* analysis. *Planta*, 220(1), 145–155. <https://doi.org/10.1007/s00425-004-1322-6>
3. Dohleman, F. G., & Long, S. P. (2009). More productive than maize in the Midwest: How does miscanthus do it? *Plant Physiology*, 150(4), 2104–2115. <https://doi.org/10.1104/pp.109.139162>
4. Ghannoum, O. (2008). C4 photosynthesis and water stress. *Annals of Botany*, 103(4), 635–644. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn093>
5. Lawson, T., & Blatt, M. R. (2014). Stomatal size, speed, and responsiveness impact on photosynthesis and water use efficiency. *Plant Physiology*, 164(4), 1556–1570. <https://doi.org/10.1104/pp.114.237107>
6. Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence—A practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659–668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>
7. Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis *in vivo*. *Annual Review of Plant Biology*, 59(1), 89–113. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759>
8. Strasser, R. J., Tsimilli-Michael, M., & Srivastava, A. (2004). Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient. In G. C. Papageorgiou & Govindjee (Eds.), *Advances in photosynthesis and respiration* (pp. 321–362). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_12
9. Stirbet, A., Lazár, D., Kromdijk, J., & Govindjee, G. (2018). Chlorophyll a fluorescence induction: Can just a one-second measurement be used to quantify abiotic stress responses? *Photosynthetica*, 56(Special Issue), 86–104. <https://doi.org/10.1007/s11099-018-0770-3>
10. Malinská, H., Pidlisnyuk, V., Nebeská, D., Erol, A., Medžová, A., & Trögl, J. (2020). Physiological response of *Miscanthus × giganteus* to plant growth regulators in nutritionally poor soil. *Plants*, 9(2), Article 194. <https://doi.org/10.3390/plants9020194>
11. Rose, M. T., Patti, A. F., Little, K. R., Brown, A. L., Jackson, W. R., & Cavagnaro, T. R. (2014). A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances. *Advances in Agronomy*, 124, 37–89. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800138-7.00002-4>
12. Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P., & Piccolo, A. (2015). Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013>
13. Shah, Z. H., Rehman, H. M., Akhtar, T., Alsamadany, H., Hamooh, B. T., Mujtaba, T., Daur, I., Al Zaharani, Y., Alzahrani, H. A. S., Ali, S., Yang, S. H., & Chung, G. (2018). Humic substances: Determining potential molecular regulatory processes in plants. *Frontiers in Plant Science*, 9, Article 263. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00263>
14. Shen, J., Guo, M., Wang, Y., Yuan, X., Wen, Y., Song, X., Dong, S., & Guo, P. (2020). Humic acid improves the physiological and photosynthetic characteristics of millet seedlings under drought stress. *Plant Signaling & Behavior*, 15(8), Article 1774212. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1774212>
15. Pogrzeba, M., Rusinowski, S., Sitko, K., Krzyżak, J., Skalska, A., Małkowski, E., Ciszek, D., Werle, S., McCalmont, J. P., Mos, M., & Kalaji, H. M. (2017). Relationships between soil parameters and physiological status of *Miscanthus × giganteus* cultivated on soil contaminated with trace elements under NPK fertilisation vs. microbial inoculation. *Environmental Pollution*, 225, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.03.058>
16. Prysiazniuk, O. I., Klymovych, 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> [In Ukrainian]
17. Feng, X. P., Chen, Y., Qi, Y. H., Yu, C. L., Zheng, B.-S., Brancourt-Hulmel, M., & Jiang, D.-A. (2012). Nitrogen enhanced photosynthesis of *Miscanthus* by increasing stomatal conductance and phosphoenolpyruvate carboxylase concentration. *Photosynthetica*, 50(4), 577–586. <https://doi.org/10.1007/s11099-012-0061-3>
18. Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., & Vianello, A. (2002). Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(11), 1527–1536. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00174-8)

Gas exchange parameters and functional state of the photosystem of *Miscanthus × giganteus* under different fertiliser systems and foliar application of potassium humate

V. H. Nosenko

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony St., Kyiv, 03041, Ukraine

Corresponding author: Valerii Nosenko, nosenko.v@ukr.net

Citation: Nosenko, V. H. (2026). Gas exchange parameters and functional state of the photosystem of *Miscanthus × giganteus* under different fertiliser systems and foliar application of potassium humate. *Bioenergy*, 1, 77–83. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp77-83>

Aim. To identify dynamics of gas exchange parameters (photosynthetic rate, transpiration, stomatal conductance, and water use efficiency) and chlorophyll fluorescence indices [Fv/Fm, PI(abs)] of *Miscanthus × giganteus* depending on fertiliser system and foliar application of potassium humate. **Methods.** The study was conducted in 2021–2025 at the Subdivision of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine “Velykosnitynske named after O. V. Muzychenko” on strongly eroded podzolised chernozem soil. The experimental design included three fertiliser systems: no fertiliser (control), organic (Leonardite, 100 kg/ha), and mineral (N₆₀P₁₆K₈₀), as well as four variants of foliar application of potassium humate (2 l/ha). Gas exchange parameters were measured using an LI-6200 system, while chlorophyll fluorescence was assessed with a Handy PEA fluorimeter. Statistical analysis was performed using analysis of variance (ANOVA). **Results.** Improved mineral nutrition and the application of potassium humate promoted a simultaneous increase in all gas exchange parameters. The photosynthetic rate increased from 16.2–22.7 to 24.1–33.7 μmol CO₂ m⁻²·s, depending on year and treatment. Maximum values were obtained from the combination of the mineral fertiliser system with two foliar applications of potassium humate, where the increase in photosynthesis relative to the control reached 40.1%. The mineral fertiliser system ensured the highest photosynthetic activity; however, the organic system was characterised by a superior functional state of photosystem II, with Fv/Fm reaching 0.797 and PI(abs) 3.39, exceeding the corresponding values under mineral fertilisation. PI(abs) exhibited greater sensitivity to changes in nutritional conditions than Fv/Fm. A strong linear relationship was observed between photosynthetic rate and stomatal conductance ($r = 0.99$), indicating dominance of stomatal regulation of photosynthesis. Two foliar applications of potassium humate increased photosynthesis by 11.7–12.9% and stomatal conductance by 12.5–13.5%. The organic system combined with humate application achieved approximately 72% of the effect of mineral fertilisation. **Conclusions.** The combination of soil fertilisation with foliar application of potassium humate significantly enhances gas exchange and improves the functional state of the photosynthetic apparatus of giant miscanthus. The mineral fertiliser system is the most effective in increasing photosynthetic productivity, whereas the organic system contributes to stabilisation of photosystem II function and optimisation of the physiological status of plants.

Keywords: *Miscanthus × giganteus*; photosynthetic rate; water use efficiency; transpiration; stomatal conductance; Fv/Fm; PI(abs); OJIP test; chlorophyll fluorescence; Leonardite; potassium humate.

ORCID

Валерій Носенко / Valerii Nosenko <https://orcid.org/0000-0002-4917-3514>