УДК 631.42: 632.122.1:543.422.3:633.9

ДІАГНОСТИКА СТАНУ ҐРУНТУ ТА ФІТОТОКСИЧНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ VIS-NIR СПЕКТРОСКОПІЇ В СИСТЕМІ РЕІНТЕГРАЦІЇ ЗОЛИ *MISCANTHUS* × *GIGANTEUS*

Герц А. І.,[1] Конончук О. Б.,[1] Герц Н. В.,[1] Підліснюк В. В.[2]

[1]Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, м. Тернопіль, Україна

[2] Університет Яна Євангеліста Пуркінє в Усті-над-Лабем, м. Устя-над-Лабем, Чеська Республіка

E-mail: herts@chem-bio.com.ua

Реінтеграція золи біомаси *Miscanthus* × *giganteus* (*M*×*g*) є перспективним агрозаходом у межах концепції економіки замкненого циклу, однак це потребує ефективного моніторингу надійними неінвазивними методами контролю. Традиційні деструктивні агрохімічні аналізи є трудомісткими та не придатними для оперативного застосування. Метою роботи була валідація Vis-NIR спектрального профілювання (365–940 нм) як інструменту довготривалої експрес-діагностики стану меліорованих ґрунтів [2, 5].

Дворічний вегетаційний експеримент (2024–2025 рр.) проводився на базі Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка на типовому чорноземі з дозами внесення золи 0 %, 1 %, 3 % та 7 % (мас.). Спектральні профілі повітряно-сухих зразків фіксувалися портативним рефлектометром на 10 довжинах хвиль (від 365 до 940 нм). Паралельно аналізувалися біотичні (з рослинами *M*×*g*) та абіотичні (без рослин) варіанти. Статистичну обробку проводили із застосуванням лінійних моделей зі змішаними ефектами (LMM) та MANOVA (критерій Pillai) [2].

Канал 940 нм виявився найбільш чутливим діагностичним індикатором: R^2= 0,837, кореляція з електропровідністю ЕС (r = – 0,812) та вмістом P_2O_5 (r = – 0,850). Post-hoc аналіз підтвердив значущу диференціацію всіх чотирьох доз золи ($p < 0,01$). Інтенсивність відбиття 3150–3350 умовних одиниць (у.о.) відповідає агрономічному оптимуму (доза 1 %, індекс листкової площі (LAI) = 1,6); зниження нижче 2700 у.о. асоціюється з

сольовою фітотоксичністю [1, 3].

Виявлено феномен «відносного оптичного вицвітання» в абіотичних варіантах. Кристалізація солей підвищує відбиття на 10–13 %, маскуючи реальний хімічний стан матриксу. Вегетація $M \times g$ усуває цей ефект через активне біологічне засолення та акумуляцію лабільного органічного вуглецю. Розроблено лінійні калібрувальні моделі прогнозування P_2O_5 (R^2= 0,763) та K (R^2= 0,697) за NIR-сигналом [1].

Впродовж дворічного моніторингу зафіксовано фундаментальну дивергенцію спектральних сценаріїв залежно від наявності рослинного покриву. У варіантах без рослин розчинні солі під впливом капілярного підняття та випаровування мігрували до поверхні й кристалізувалися, формуючи мікроскопічну плівку з високим альбедо. Це зумовило зростання відбиття на 10–13 % порівняно з варіантами під вегетацією $M \times g$, яка перервала цей цикл через активне винесення катіонів (K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) для побудови біомаси та виділення кореневих ексудатів, що сприяли агрегації ґрунту й стабілізації лабільного вуглецю. Врахування цього біотичного чинника є обов'язковою умовою коректної інтерпретації Vis-NIR сигнатури.

На основі мультипараметричного моделювання розроблено серію калібрувальних рівнянь для прогнозування агрохімічних показників за NIR-сигналом: $P_2O_5 = -1{,}993 \cdot (940\ нм) + 6932$ (R^2= 0,763), $K = -0{,}351 \cdot (940\ нм) + 1210$ (R^2= 0,697), $EC = -0{,}0005 \cdot (940\ нм) + 2{,}11$ (R^2= 0,563). Вміст загального органічного вуглецю найтісніше корелює з каналом 500 нм (R^2= 0,365), що відображає роль гумусових речовин у регуляції оптичних властивостей видимого діапазону. Це свідчить про доцільність комбінованого підходу, зокрема, NIR-канали для оцінки мінерального фону, видимий діапазон – для моніторингу органічної трансформації [4].

Важливою перевагою запропонованого підходу є його реалізація на базі доступного обладнання відкритого типу (open-source hardware), що дозволяє масштабувати систему діагностики для масового використання агровиробниками без залучення дорогої лабораторної інфраструктури. Разом з тим, отримані спектральні пороги є специфічними для застосованої моделі рефлектометра та типового чорнозему, тому подальше

масштабування потребує зовнішньої валідації на ширшому спектрі ґрунтових різновидів та різних польових умовах.

Таким чином, Vis-NIR спектральне профілювання є надійною цифровою альтернативою деструктивним аналізам для моніторингу систем реінтеграції золи біомаси енергетичних культур та забезпечує оперативний контроль меліоративної ефективності в межах економіки замкненого циклу [2, 5].

Список літератури

1. Herts A. I., Khomenchuk V. O., Kononchuk O. B., Herts N. V., Markiv V. S., Buianovskyi A. O. Use of visual-diagnostic color parameters of soils and optical reflectometry for determination of organic carbon content. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2022. Vol. 31, № 2. P. 260–272. DOI: https://doi.org/10.15421/112224.
2. Herts A., Rouhani A., Kononchuk O., Markiv V., Horyn O., Khomenchuk V., Stadnik V., Shapoval P., Pidlisnyuk V. Evaluation of ash derived from conversion of contaminated *Miscanthus* × *giganteus* biomass as a soil amendment: impacts on soil parameters and physiological characteristics of *Zea mays* L. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2025. 69: 103786. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103786.
3. Hosseini E., Zarei M., Moosavi A. A., Ghasemi-Fasaei R., Baghernejad M., Mozaffari H. Feasibility of Vis-NIR spectroscopy approach to predict soil biological attributes in arid land soils. *PloS ONE*. 2024. Vol. 19, № 9: e0311122. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311122.
4. Liu J., Xie J., Han J. Wang H., Sun J., Li R., Li, S. Visible and near-infrared spectroscopy with chemometrics are able to predict soil physical and chemical properties. *Journal of Soils and Sediments*. 2020. Vol. 20, № 7. P. 2749–2760. DOI: https://doi.org/10.1007/s11368-020-02623-1.
5. Pidlisnyuk V., Rouhani A., Herts A., Kononchuk O., Markiv V., Horyn O., Khomenchuk V., Shapoval P. Circular utilization of *Miscanthus*×*giganteus* biomass ash to enhance soil quality and support its regrowth. *Waste Disposal & Sustainable Energy*. 2026. DOI: https://doi.org/10.1007/s42768-026-00288-z.