

ВПЛИВ БІОЧАРУ НА СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІДБИТТЯ ҐРУНТУ

**Герц А. І.¹, Конончук О. Б.¹, Підліснюк В. В.², Герц Н. В.¹,
Хоменчук В. О.¹, Марків В. С.¹**

¹Тернопільський національний педагогічний університет імені
Володимира Гнатюка

²Університет Яна Євангеліста Пуркіне в Усті-над-Лабем
E-mail: herts@chem-bio.com.ua

Добриво біочар отримується шляхом піролізу органічної біомаси в умовах обмеженого доступу кисню. Його внесення в ґрунт може сприяти секвестрації вуглецю, зростанню структурності, водоутримуючої здатності, адсорбції поживних речовин, зниженню мобільності забруднювачів тощо [2]. Однак, вплив біочару значно варіює залежно від типу вихідної сировини, умов отримання, характеристик ґрунту та кліматичних умов. Добриво змінює властивості ґрунту, зокрема його колір, вміст органічного карбону, ємність катіонного обміну, електропровідність (ЕС) та ін., які потребують ефективних, швидких та, бажано, неруйнівних технологій фіксування.

У цьому контексті значний інтерес викликає спектроскопія дифузного відбиття у видимій та ближній інфрачервоній (VIS-NIR, 400-2500 нм) областях спектра, яка дозволяє отримати інформацію про склад і властивості ґрунту, зокрема вміст ґрунтового органічного карбону (ГОК), вологи, механічних елементів тощо [1]. Оскільки біочар має переважно низьке відбиття через високий вміст вуглецю та ароматичних структур, VIS-NIR спектроскопія розглядається як інструмент для його детекції і кількісної оцінки в ґрунті [3].

Метою цієї роботи була оцінка можливості використання портативної рефлектометрії та колориметрії для виявлення біочару в чорноземі типовому, ідентифікації найчутливіших спектральних діапазонів та кольорних параметрів, встановлення кількісних залежностей між спектральними/кольорними характеристиками і вмістом ГОК за різного вмісту і виду біочару та оцінки можливості розрізнення типів біочару за спектральними даними.

Повітряно-сухий важкосуглинистий слабогумусований чорноземний ґрунт із структурою < 2 мм змішували з біочарами IDEALE та INTERMARCOM у концентраціях 0% (контроль), 3%, 5% та 7% від маси суміші. Зразки аналізували одразу за вологості 60% ПВ і температури 20 ± 2 °C та після 2-місячного інкубування. Спектри дифузного відбиття реєстрували портативним 10-канальним рефлектометром Our Sci на довжинах хвиль 365, 385 (УФ), 450, 500, 530, 587, 632 (видимий діапазон), 850, 880, 940 нм (ближній ІЧ), колірні характеристики в системі CIELab* – колориметром NixPro з геометрією 2°/D50, вміст ГОК – оксидиметричним методом, хімічних елементів (Si, Al, Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn та ін.) рентгенівською флуоресценцією (РФА), рН і ЕС у водних витяжках (1:5).

Внесення обох типів біочару значно та дозозалежно підвищувало вміст ГОК, суттєво знижувало коефіцієнти дифузного відбиття (КДО) практично на всіх вимірних довжинах хвиль, що характерно для темного вуглецевого матеріалу. Найпомітнішим це зменшення було у ближній ІЧ області. Виявлено сильну та статистично значущу ($p < 0,05$) негативну кореляцію між вмістом ГОК та КДО за цих довжин хвиль. Зокрема, коефіцієнти кореляції Пірсона (R) для довжин хвиль 850, 880 та 940 нм знаходились у діапазоні від -0.78 до -0.79. Це підтверджує високу чутливість NIR-діапазону до змін вмісту ГОК, індукованих біочаром. Також встановлено сильну негативну кореляцію між ГОК та параметром світлості L^* , з R - 0.56 до -0.60 ($p < 0.05$), що відображає потемніння ґрунту після внесення біочару. R з параметрами a^* та b^* були значно слабшими та менш стабільними.

Важливо відзначити, що після двох місяців інкубації ґрунту з біочаром, кореляційні зв'язки між ГОК та КДО в NIR-діапазоні залишалися високими (R від -0.76 до -0.78), хоча і незначно зменшились. Це вказує на відносну стабільність спектрального сигналу в середньостроковій перспективі та потенційну придатність методу для моніторингу.

Спектральні криві відбиття помітно залежали від типу внесеного біочару. Добри́во INTERMARCOM спричиняло значніше зниження КДО, особливо в діапазоні 632-940 нм, порівняно з біочаром IDEALE за однакових концентрацій.

Наприклад, за 7% вмісту INTERMARCOM знижував відбиття 940 нм хвиль на 15-20% сильніше, ніж IDEALE. Ця різниця була дозозалежною і дозволяла чіткіше розрізняти концентрації (3, 5, 7%) саме для біочару INTERMARCOM, що вказує на властивості самого добрива (розмір частинок, структура поверхні, хімічний склад, які залежать від сировини й умов піролізу) і суттєво впливає на його спектральний відгук у суміші з ґрунтом.

Застосування МГК до об'єднаного масиву даних (КДО, CIELab*, ГОК, ЕС, рН, дані РФА) дозволило ефективно візуалізувати їх структуру. Перші дві головні компоненти (ГК1 та ГК2) пояснили понад 62% загальної варіації системи (ГК1 $\approx$ 45%, ГК2 $\approx$ 17%). ГК1 і ГК2 показали чітке розділення зразків: контрольні взірці групувалися окремо, а з біочарами IDEALE та INTERMARCOM формували два відмінні кластери, що не перекривалися. Аналіз навантажень (loadings) виявив, що ГК1 була сильно пов'язана (негативно) із вмістом ГОК та (позитивно) зі значеннями КДО у VIS-NIR діапазонах і світлістю L^* , відображаючи загальну дію додавання біочару. ГК2, у свою чергу, ефективно розділяла типи біочару і була пов'язана з відмінностями в ЕС, вмісті К і Са, а також КДО у червоному та NIR діапазонах. Це вказує, що саме ці параметри (ГОК, ЕС, К, Са та відбиття у NIR) є ключовими предикторами, які дозволяють не тільки виявляти біочар, але й потенційно розрізняти його типи та оцінювати пов'язані зміни властивостей ґрунту за допомогою спектральних даних.

Проведене дослідження підтверджує високий потенціал використання портативної бюджетної рефлектометрії та колориметрії як інструментів для експрес-моніторингу чорнозему типового, модифікованого біочаром. Методи є чутливими до присутності біочару вже за концентрації від 3%. Встановлено значні та стабільні у часі (щонайменше 2 місяці) кореляційні зв'язки між вмістом ГОК та спектральними коефіцієнтами відбиття у ближній ІЧ-області (850-940 нм, $R \approx -0.79$), а також параметром світлості L^* ($R \approx -0.60$). Спектральні характеристики відбиття суттєво залежали від типу біочару, що дозволяє їх розрізняти, але також вказує на необхідність розробки калібрувальних моделей, специфічних для кожного біочару, або використання методів, які інваріантні до його типу.

Метод головних компонент дозволив ідентифікувати ключові параметри (ГОК, ЕС, К, Са та NIR-відбиття), що визначають спектральний відгук системи ґрунт-біочар та можуть слугувати предикторами для майбутніх кількісних моделей.

Отримані результати обґрунтовують доцільність подальших досліджень, спрямованих на розробку надійних калібрувальних моделей для кількісної оцінки вмісту ГОК та/або біочару в ґрунті за даними портативних спектральних приладів. Перспективним є тестування підходу на ширшому спектрі типів ґрунтів і біочарів, дослідження впливу вологості ґрунту, а також апробація методу безпосередньо в польових умовах для потреб точного землеробства і моніторингу стану ґрунтів.

Автори висловлюють подяку професору Павлу Шаповалу (Національний університет «Львівська політехніка») за допомогу у проведенні РФА аналізу. Дослідження виконано в рамках наукового проєкту НАТО «Наука заради миру та безпеки» (SPS) G6094.

Список літератури

1. Herts A., Khomenchuk V., Kononchuk O., Herts N., Markiv V., Buianovskyi, A. Use of visual-diagnostic color parameters of soils and optical reflectometry for determination of organic carbon content. *Journal of Geology, Geography and Geocology*. 2021. Vol. 31(2). P. 260–272. DOI: 10.15421/112224.
2. Schmidt H. P., Kammann C., Hagemann N., Leifeld J., Bucheli N. D., Monedero M. A. S., Cayuela M. L. Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB Bioenergy*. 2021. Vol. 13(2). P. 1–23. DOI: 10.1111/gcbb.12889.
3. Tsoilis V., Barouchas P. Biochar as Soil Amendment: The Effect of Biochar on Soil Properties Using VIS-NIR Diffuse Reflectance Spectroscopy, Biochar Aging and Soil Microbiology – A Review. *Land*. 2023. Vol. 12: 1580. DOI: 10.3390/land12081580.