

## СУЧАСНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ҐРУНТІВ

Шейко В.І., Кучменко О.Б., Гавій В.М., Пасічник С.В.  
Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя  
вул. Графська, 16600, м. Ніжин

[interliycin@ukr.net](mailto:interliycin@ukr.net), [kuchmenko1978@gmail.com](mailto:kuchmenko1978@gmail.com), [gaviyv@gmail.com](mailto:gaviyv@gmail.com), [svpas1964@gmail.com](mailto:svpas1964@gmail.com)

Ґрунти є складною системою, що містить як органічні, так і мінеральні речовини у складі. Від співвідношення сполук, елементного складу, вмісту органічної речовини та фізичних властивостей ґрунту залежить його родючість. В свою чергу, дослідження хімічного складу важливе для ефективного ведення сільського господарства, для процесів фітореMediaції, екологічного моніторингу. Визначення наявності мінеральних та органічних речовин у ґрунті проводять за допомогою низки методів: традиційних підходів аналітичної хімії, і більш сучасних хроматографічних та оптичних методів. Перевагою хроматографічних та оптичних методів, в порівнянні із підходом, де ідентифікація речовин базується на хімічних реакціях, є більша швидкість та легкість проведення дослідження. Також, одночасне виявлення кількох речовин у суміші і висока чутливість є перевагою, зокрема, спектроскопічних методів. Одним із спектроскопічних методів, що активно використовується для дослідження ґрунтів, є інфрачервона спектроскопія – FTIR. Завдяки цьому методу можна ідентифікувати основні типи мінералів, що входять до складу ґрунту, та визначити і ідентифікувати органічні речовини. У свою чергу такі дослідження мають широке застосування як у сільському господарстві, екологічному моніторингу, так і в археології та криміналістиці, що робить використання FTIR для дослідження ґрунтів важливим як галузі в Україні. Із усіх переваг застосування інфрачервоної спектроскопії у дослідженні речовин та матеріалів, окремим аспектом є вищий рівень безпеки для навколишнього середовища. Так, при методі визначення, наприклад, вмісту фосфору у ґрунті, використовують тривалий етап екстракції, що потребує небезпечних для навколишнього середовища реагентів та продукує хімічні відходи, які потребують безпечної утилізації. В той час, як застосування інфрачервоної спектроскопії потребує тільки достатнього висушування зразка, для чого не потрібні інші реагенти. *Ключові слова:* ґрунт, склад ґрунту, органічні речовини в ґрунтах, інфрачервона спектроскопія, високоефективна рідинна хроматографія.

### Modern aspects of the application of infrared spectroscopy for soil research. Sheiko V., Kuchmenko O., Havii V., Pasichnyk S.

Soils are a complex system containing both organic and mineral substances in the composition. Its fertility depends on the ratio of compounds, elemental composition, content of organic matter, and physical properties of the soil. In turn, the study of the chemical composition is important for effective agricultural management, phytoremediation processes, and environmental monitoring. Determination of the presence of mineral and organic substances in the soil is carried out using several methods: traditional approaches of analytical chemistry, and more modern chromatographic and optical methods. The advantage of chromatographic and optical methods, compared to the approach where the identification of substances is based on chemical reactions, is greater speed and ease of research. Also, the simultaneous detection of several substances in a mixture and high sensitivity is an advantage of spectroscopic methods. One of the spectroscopic methods actively used for soil research is infrared spectroscopy – FTIR. Thanks to this method, it is possible to identify the main types of minerals that make up the soil and to determine and identify organic substances. In turn, such studies are widely used in agriculture, environmental monitoring, archaeology, and forensics, which makes the use of FTIR for soil research important as a field in Ukraine. Of all the advantages of using infrared spectroscopy in the study of substances and materials, a separate aspect is a higher level of safety for the environment. Thus, in the method of determining, for example, the phosphorus content in the soil, a long extraction stage is used, which requires environmentally hazardous reagents and produces chemical waste that requires safe disposal. While the application of infrared spectroscopy requires only sufficient drying of the sample, which does not require other reagents. *Key words:* soil, soil composition, organic matter in soils, FTIR, HPLC.

Ґрунт – дисперсна система, що містить у складі органічні та мінеральні компоненти та покриває більшу частину суходолу. Ґрунти поділяються на групи в залежності від складу та фізико-хімічних властивостей. Так, від типу ґрунту (вміст речовин, здатність абсорбувати воду, розмір частинок твердих) залежить здатність рослин рости на ньому. Продуктивність ґрунту залежить від низки змінних і визначається не тільки типом ґрунту. Температура, склад, родючість і методи обробки є одними з основних чинників, що визначають продуктивність ґрунту. Суглинкові ґрунти, які мають оптимальне поєднання піску, мулу та глини, часто вважаються найпродуктивнішими через їх високу здатність утримувати воду та забезпечувати її дренаж. Це

зумовлює необхідний режим аерації та баланс поживних речовин для розвитку рослин. Ключовим компонентом продуктивності ґрунту є його родючість. Мікроелементи та важливі поживні речовини, такі як азот, фосфор і калій (NPK), містяться в достатній кількості в родючих ґрунтах. За рахунок додавання органіки (компосту, гною), добрив і відповідної сівозміни можна підвищити родючість ґрунту.

Доступність поживних речовин для рослин залежить також від рН ґрунту. Діапазон рН, який оптимальний для більшості культур, становить від 6,0 до 7,0, що є слабкокислим або нейтральним. Щоб зробити ґрунт більш придатним для певної культури, може знадобитися змінити ґрунти зі значеннями рН поза цим діапазоном. Щоб уникнути перезволоження, яке

може пошкодити коріння рослин, необхідний правильний дренаж. Загалом ґрунти, які добре дреноують і можуть утримувати достатню вологість під час посушливих періодів, є більш продуктивними.

Температура й режим опадів, а також клімат загалом, мають великий вплив на продуктивність ґрунту. При цьому, для різних культур потреби в ґрунті теж відрізняються. Продуктивність можна підвищити, збираючи культури, які підходять для ґрунту та клімату відповідного регіону. Сівозміна також може допомогти зберегти родючість і оптимальний стан ґрунту. Для підтримання продуктивності ґрунту, слід використовувати такі методи, як контурне землеробство та терасування, щоб запобігти ерозії ґрунту. Верхній шар ґрунту та поживні речовини часто втрачаються в еродованих ґрунтах, що і спричинює їхню виснаженість.

Найбільш продуктивними з точки зору сільськогосподарства вважаються ґрунти із великою кількістю органічної речовини, оптимальним вмістом мінеральних речовин, значенням рН, що близьке до нейтрального та помірною здатністю до водопоглинання. Тож для вирощування різних видів і сортів рослин, ґрунт досліджують за вищезазначеними параметрами, і, якщо фізичні показники часто не піддаються зміні, то якісний та кількісний вміст речовин можна коригувати. Дослідження якісного та кількісного складу ґрунту важливе також для визначення міри забруднення навколишнього середовища [1].

Для визначення хімічного складу ґрунтів використовують низку методів, одні з них є більш складними в застосуванні та менш точними одночасно – це група методів аналітичної хімії. Методи цієї групи дозволяють провести якісні та кількісні дослідження вмісту органічних та мінеральних речовин у складі ґрунту. Недоліками хімічних методів є те, що вони потребують великої кількості часу для проведення, неможливі в польових умовах через необхідність реагентів та лабораторного приладдя, а також є конкретно направленими на визначення певних сполук [2].

Методи дослідження якісного та кількісного складу ґрунту, що є одночасно точними і легкими у пробопідготовці та здійсненні включають спектроскопічні мас-спектрометричні та хроматографічні. Для визначення вмісту аніонів використовують колориметричні методи, що полягають у проведенні хімічних реакцій зі зміною кольору розчину та подальшій спектроскопії. При цьому, кількісне вимірювання концентрації аніонів забезпечується вимірюванням інтенсивності поглинутого світла забарвленим розчином і протилежно йому пропорційне. Для визначення катіонів металів швидким та чутливим методом є оптична спектроскопія з індуктивно-зв'язаною плазмою. Цей метод дозволяє ідентифікувати одночасно велику кількість катіонів металів у складі ґрунту.

Використовуючи атомно-емісійну спектросметрію (AES або ICP-AES) і мас-спектрометрію (ICP-MS),

аналітичне обладнання для визначення складу речовин використовує індуктивно-зв'язану плазму (ICP), високотемпературне середовище. Створення плазми є початковим кроком у дослідницькому процесі. Це досягається шляхом нагрівання газу (часто аргону) через індукцію в спеціалізованому генераторі ISP. До газу прикладається високочастотне індукційне поле, яке викликає іонізацію атомів і молекул і утворення плазми. Аналізи виконуються на зразках, таких як зразки ґрунту. Як правило, для цього використовується небулайзер, який розпилює зразок у плазмову область у вигляді аерозолу. Матеріал атомізується (перетворюється на атоми) та іонізується (утворюється у вигляді іонів) у плазмі. Атоми зразка збираються в плазму й надають велику енергію протягом цієї процедури. Після розпилення та іонізації атоми та іони зразка вивільняють енергію у формі світлового або мас-спектру. Ця енергія виявляється в ICP-NPP у вигляді ліній випромінювання світла, пов'язаних з певними атомами чи іонами. ISP-MS вимірює та записує маси іонів у мас-спектрі. Щоб визначити кількість різних хімічних компонентів або сполук у зразку, досліджують світлові сигнали або мас-спектри. Цей метод використовується для визначення якісного складу речовини [3].

Наявність сірки та її сполук також впливає на якість і безпечність ґрунту для сільськогосподарських цілей та екологічного моніторингу. Для визначення вмісту вільної сірки використовують високоефективну рідинну хроматографію (ВЕРХ) із попередньою екстракцією. Сульфідні, що є кислоторозчинними досліджують за допомогою колориметрії, аналізуючи також сірководень, який виділяється при дослідженні. Вміст кислоторозчинних сульфатів та водорозчинних сульфатів ведеться методом оптичної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою. Вміст сполук нітрогену, нітратів та нітритів також проводиться за допомогою колориметричного аналізу [4, 5].

Для визначення вмісту органічних речовин використовують методи ВЕРХ, газової хроматографії із подальшою детекцією мас-спектрометрією. Хроматографія, як варіант розділення речовин за допомогою розподілу між рухомою та нерухомою фазами за рахунок різної маси або полярності речовин, є точним та чутливим методом для дослідження складу ґрунтів.

За допомогою високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ) можна проаналізувати характеристики та склад ґрунту. Завдяки їх взаємодії з нерухомою та рухомою фазами в системі рідинної хроматографії, цей аналітичний підхід дозволяє розділяти та ідентифікувати численні хімічні сполуки та компоненти ґрунту. Кількість таких поживних речовин, як азот, фосфор і калій у ґрунті, можна визначити за допомогою ВЕРХ. Це допомагає встановити параметри родючості ґрунту та виявити, чи потрібно більше добрив для ефективного землеробства. Крім

того, цей підхід можна використовувати в поєднанні з підходами молекулярної біології для дослідження ґрунтових мікроорганізмів. Це допомагає досліджувати структуру мікробіоти та вплив, який вона має на стан екосистеми та родючість ґрунту. Крім того, ВЕРХ використовується для дослідження біохімічних процесів, що відбуваються в ґрунті, таких як розпад органічних матеріалів, біохімічні реакції та інші процеси, які впливають на якість ґрунту [6].

Аналітичний метод, відомий як мас-спектрометрія, може бути використаний для дослідження складу ґрунту та ідентифікації різних хімічних речовин, які присутні в ньому. За допомогою мас-спектрометрії можна виявити та обчислити масу іонів і молекул у зразку. Це дозволяє ідентифікувати численні хімічні компоненти, які можуть бути присутніми в ґрунті, включаючи мінерали, органічні сполуки, мікроби та багато інших елементів. За допомогою цього методу визначають кількість поживних речовин, шкідливих металів чи інших забруднюючих речовин у ґрунті, склад мікробіоти ґрунту, що включає ідентифікацію різних видів мікроорганізмів, присутніх у зразку. Крім того, можна відстежувати зміни складу ґрунту в динаміці, що дає змогу визначати вплив багатьох чинників, зокрема забруднення, промисловості та сільського господарства на склад ґрунту [7].

Одним із чутливих та багатофункціональних методів ідентифікації речовин у ґрунтах є інфрачервона спектроскопія. Метод базується на поглинанні світла певних довжин хвиль (зазвичай  $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$ ) органічними та мінеральними компонентами суміші. Так, для кожного типу молекул характерні характеристичні піки – певна довжина світлової хвилі, на якій відбувається максимум поглинання світла. Характеристичні піки є специфічними для речовин, отже, аналіз отриманих результатів пропускання світла через зразок, дозволяє визначити приналежність речовин до певного класу та навіть точно їх ідентифікувати. На відміну від хроматографічних методів, які потребують також детектування розділених речовин, FTIR спектроскопія потребує тільки пробопідготовки та подальшого вимірювання [8].

Додатково для дослідження ґрунтів, як порошкоподібних зразків використовують також методи порушеного повного відбиття та дифузного відбиття. Метод порушеного повного відбиття базується на проходженні променю світла через кристал, на якому розміщується зразок. Хвиля проникає у зразок та проходить розсіюється його частинками. При цьому у приладі поляризатор генерує паралельно і перпендикулярно поляризовані промені (рис. 1).

Метод ATR FTIR використовується саме для порошкоподібних гетерогенних дисперсних систем. Завдяки такому шляху променів світла, які відбиваються від частинок у складі зразка, вдається отримати спектри від непрозорих, мутних зразків, в тому числі, дослідити якісний склад ґрунту [10].

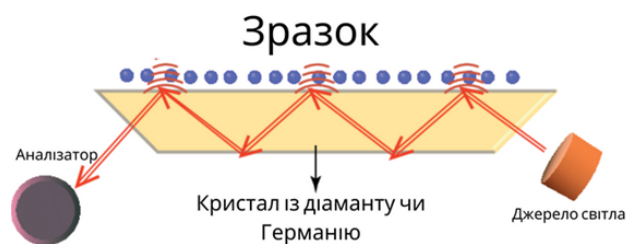


Рис. 1. Схема роботи приставки ATR FTIR [9]

Три основні частини техніки ATR FTIR – це аналізатор, алмазний або германієвий кристал і лазерний промінь. Світловий промінь проникає в область контакту твердого тіла і рідини, коли він проходить через оптичне вікно. Коли світло потрапляє в тверде тіло з вищим показником заломлення (наприклад, оптичне вікно), воно не може пройти через тверде тіло з нижчим показником заломлення (наприклад, рідина) і відбивається всередині.

Це відбувається, коли кут падіння світла перевищує критичний кут. Кут падіння світла може бути меншим за критичний кут, якщо рідина контактує з поверхнею твердого тіла через зміну показника заломлення на межі рідина-тверде тіло, і відбиття може бути неповним. Як правило, вимірюється кількість світла, що надходить із точки, де все відображення порушено. Індекс заломлення рідини, і концентрацію певних хімічних речовин у порошкоподібних зразках можна розрахувати за допомогою змін інтенсивності світла.

Інфрачервона спектроскопія дозволяє ідентифікувати як мінеральний, так і органічний склад ґрунту. Так, глинисті мінерали, що містять в основі гідроксид алюмінію, при спектральному дослідженні на отриманих спектрах відображаються через характеристичні піки вільних та зв'язаних -ОН груп. Такі -ОН групи, джерелом яких є мінеральні речовини, мають піки при  $3700\text{--}3500\text{ см}^{-1}$ . При чому ці піки є чіткими і відрізняються за значенням від піків, що притаманні гідроксильним групам органічного походження. В залежності від речовин, що складають основу ґрунту, характеристичні піки відрізняються. Так, для силікатів внаслідок коливань Si-O-Si спостерігається максимум при  $1000\text{ см}^{-1}$ , а для карбонатів – при  $1400\text{ см}^{-1}$ . Для ідентифікації мінералів використовують частину спектру від 400 до  $900\text{ см}^{-1}$ . Так, наприклад, для силікатних матеріалів характерні піки при  $797, 779\text{ см}^{-1}$ . У ґрунті одними із розповсюджених сполук заліза є гетит та гематит. FTIR спектроскопія дозволяє визначити відмінності між цими речовинами за рахунок відмінностей у поглинанні світла у діапазоні  $3400\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ ,  $900\text{--}700\text{ см}^{-1}$  і менше  $700\text{ см}^{-1}$ . Для чистого кальциту характерні піки при  $2400\text{ см}^{-1}$  та менше  $1000\text{ см}^{-1}$  (рис. 2) [11].

Органічні речовини у ґрунті можуть бути рослинного, тваринного, мікроорганізмowego або антропогенного походження. На цьому базується вивчення

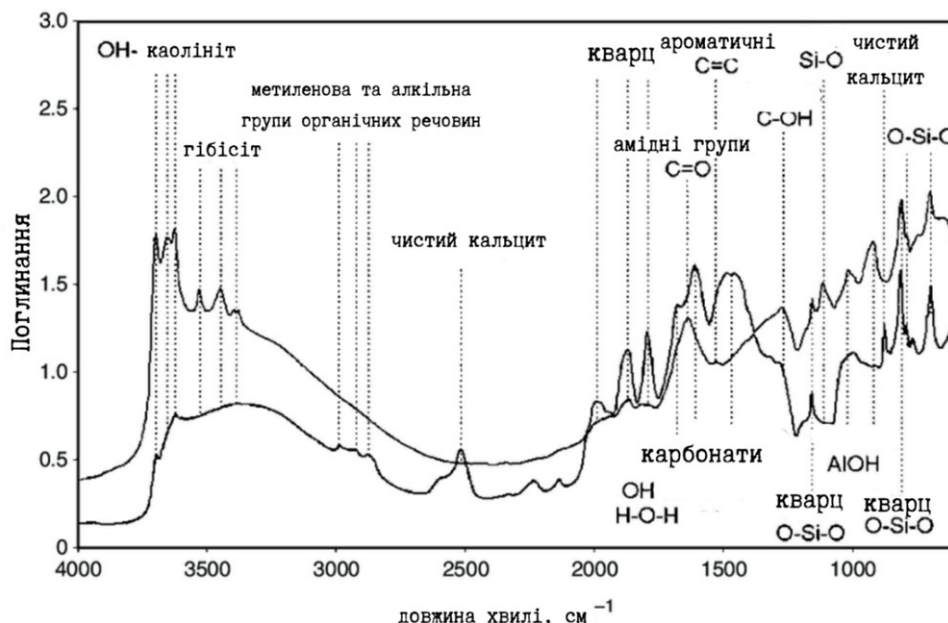


Рис. 2. Приклади характеристичних піків органічних та мінеральних речовин [12]

антропогенного навантаження на ґрунт, бо різниця між кількістю органічних речовин, що потрапила у ґрунт природним шляхом менша, ніж кількість таких речовин, джерелом яких є сучасна чи давня діяльність людини. Так, на отриманих спектрах пропускання, коливання метильних та алкільних груп спостерігаються у діапазоні при 2920 і 2850  $\text{cm}^{-1}$ . Піки мають більшу інтенсивність, якщо у зразку присутні довголанцюгові молекули, а також більшу ширину, якщо у досліджуються полісахариди. Розтягнення групи  $\text{C}=\text{O}$ , що характерно для полісахаридів припадає на 1030  $\text{cm}^{-1}$ , у цьому ж діапазоні спостерігаються коливання груп  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ , які складають основу кварцу, а тому такі спектри потребують додаткової математичної обробки. Для гідроксильних груп органічної речовини характерні піки у діапазоні 3600 і 3200  $\text{cm}^{-1}$ , але при високій вологості зразка з'являється широкий пік у межах 3800–3200  $\text{cm}^{-1}$  [13].

Дослідження методом FTIR спектроскопії є дієвим методом для визначення фізичних властивостей ґрунту та його хімічних складових, проте особливості складу цієї суміші є причиною застосування додаткових методів при обробці вихідних спектрів. Одним із викликів є превалювання інтенсивності піків мінеральних речовин ґрунту над піками органічних речовин. Для розв'язання цієї проблеми використовують математичну обробку спектрів, наприклад, віднімання спектру контрольного зразка від спектра досліджуваного зразка. Такий підхід використовується, зокрема, в археологічних дослідженнях, де є можливість дослідити ґрунт культурного шару та ґрунт, що не піддавався дії антропогенного впливу. Також проблеми при аналізі характеристичних піків можуть виникнути тоді, коли певні піки органічної та мінеральної речовини перекриваються, напри-

клад, білки, ДНК та пік, що притаманний силікатам. До таких випадків належать також утворення суцільного широкого піку у діапазоні 3800–3200  $\text{cm}^{-1}$ , що відповідає одночасно гідроксильним групам в органічних речовинах, утворенню зв'язків в каолінітах та залежить від міри вологості зразка. При утворенні суцільних піків, тобто їх перекриванні, використовується математична операція – деконволюція, яка дозволяє вирізнити окремі піки.

Таким чином, метод інфрачервоної спектроскопії має широке застосування у дослідженні ґрунтів. За допомогою FTIR можна ідентифікувати якісний склад, фізико-хімічні властивості, наявність органічних забруднювачів у ґрунтах, що є перспективним та швидким методом дослідження, який не потребує великої кількості обладнання та володіє високою швидкістю і точністю аналізу [12].

У сільськогосподарському та екологічному моніторингу визначення вмісту фосфору в ґрунті є найважливішим завданням, бо одним із найважливіших макроелементів, необхідних рослинам для росту і розвитку, є фосфор. Він є компонентом фосфоліпідів, РНК, ДНК та інших найважливіших біологічних компонентів. Можна визначити, чи достатньо в ґрунті фосфору для розвитку рослин, аналізуючи його кількісний склад. Урожайність і якість культурних рослин можна поліпшити шляхом додавання фосфору у вигляді добрив, якщо концентрація цього елемента в ґрунті низька.

Надмірна кількість фосфору в ґрунті може спричинити екологічні проблеми, включаючи забруднення води. Водні об'єкти можуть забруднюватися фосфором через атмосферні опади або сільськогосподарські культури. Внаслідок цього водойми можуть стати евтрофними, і це сприятливе середо-



вище для росту водоростей. Можна виміряти кількість фосфору в ґрунті, щоб допомогти вам керувати цим процесом і вжити заходів, щоб уникнути забруднення джерела води.

Кількість фосфору в ґрунті можна визначити за допомогою різних методів, у тому числі інструментальних і колориметричних. Аналіз фосфору на основі хімічних реактивів є одним із поширених методів. Для цього необхідно зібрати близько 100 г ґрунту, гомогенізувати його та зважити 5 г зразку для подальшого дослідження. Фосфор виділяється з органічних речовин під час попередньої процедури екстракції за допомогою азотної кислоти або гідроксиду натрію. Тому дуже важливо правильно виконати екстракцію, щоб звільнити фосфор з його компонентів і перевести його в розчин, а потім оцінити кількість фосфору, присутнього в сумішах мінерального та органічного походження. Для екстракції використовують метод сплавлення порошкоподібного зразка із лугами, при цьому процедуру проводять у платиновому посуді. У подальшому для розкладання використовується плавикова кислота. Порівнюючи вміст фосфору в кальцинованому та некальцинованому ґрунті, цей підхід дозволяє оцінити 75–95% валового вмісту фосфору. Найбільш трудомною процедурою при цьому є саме пробопідготовка [14].

На відміну від традиційних колориметричних методів, аналіз вмісту фосфору за допомогою інфрачервоної спектроскопії забезпечує швидкий і точний спосіб дізнатися, скільки фосфору міститься в зразку, не потребуючи при цьому проведення хімічних реакцій або деструкції зразка. Єдиним необхідним кроком для використання цього підходу є належна підготовка зразка, що зазвичай включає висушування та гомогенізацію зразка ґрунту. Дослідження

поглинання та розсіювання інфрачервоного випромінювання різними матеріалами та речовинами є основою для самого методу спектроскопії FTIR. Висока аналітична швидкість, мінімальна потреба в хімічних реакціях і менше відходів – усе це переваги спектроскопії FTIR. Це може бути корисним якісного та напівкількісного визначення вмісту фосфору в багатьох різних матеріалах, включаючи їжу, ліки та ґрунт [15].

Із усіх переваг застосування інфрачервоної спектроскопії у дослідженні речовин та матеріалів, окремим аспектом є вищий рівень безпеки для навколишнього середовища. Так, при методі визначення, наприклад, вмісту фосфору у ґрунті, використовують тривалий етап екстракції, що потребує небезпечних для навколишнього середовища реагентів та продукує хімічні відходи, які потребують безпечної утилізації. В той час, як застосування інфрачервоної спектроскопії потребує тільки достатнього висушування зразка, для чого не потрібні інші реагенти.

Отже, використання як традиційних хімічних методів, так і новітніх, зокрема, спектроскопічних, є способами дослідження речовин та матеріалів. Дослідження ґрунту проводиться у різноманітних сферах: для сільського господарства, ювелірної справи, криміналістики, для археологічних та екологічних досліджень. Через такий спектр застосувань, вивчення якісного та кількісного складу ґрунту мають бути швидкими, точними, а метод, який використовується – чутливим і потребувати якнайменше затрат. Таким чином, інфрачервона спектроскопія як метод дослідження ґрунту, має усі вищезазвані переваги, а додатково забезпечує чутливий та неруйнівний аналіз зразків, що займає особливе місце в археології та ювелірній справі.

### Література

1. Lehmann J., Bossio D. A., Kögel-Knabner I., Rillig M. C. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2020. Vol. 1, № 10. P. 544–553. DOI: 10.1038/s43017-020-0080-8.
2. Testoni S. A., Melo V. F., Dawson L. A., Salvador F. A. S., Kunii P. A. Validation of a standard operating procedure (SOP) for forensic soils investigation in Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2019. Vol. 43. P. e0190010. DOI: 10.1590/18069657rbc20190010.
3. Zhang S., Xishan L., Gu X., Jiang P., Sun J. Flammability and thermal behavior of polypropylene composites containing dihydrogen phosphate anion-intercalated layered double hydroxides. *Polymer Composites*. 2015. Vol. 36. P. 2230–2237. DOI: 10.1002/PC.23135
4. Nadporozhskaya M., Kovsh N., Paolesse R., Lvova L. Recent advances in chemical sensors for soil analysis: a review. *Chemosensors*. 2022. Vol. 10, № 1. P. 35. DOI: 10.3390/chemosensors10010035.
5. Riedo J., Wettstein F. E., Rösch A., Herzog C., Banerjee S., Büchi L., Charles R., Wächter D., Martin-Laurent F., Bucheli T. D., Walder F., van der Heijden M. G. A. Widespread occurrence of pesticides in organically managed agricultural soils—the ghost of a conventional agricultural past? *Environmental science & technology*. 2021. Vol. 55, № 5. P. 2919–2928. DOI: 10.1021/acs.est.0c06405.
6. Morton S., Edwards M. Reduced Phosphorus Compounds in the Environment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2005. Vol. 35. P. 333–364. DOI: 10.1080/10643380590944978.
7. Djurkin V., Kirkbright G., West T. A sensitive and selective spectrophotometric procedure for the determination of phosphorus. *Analyst*. 1966. Vol. 91. P. 89–93. DOI: 10.1039/AN9669100089.
8. Tkachenko Y., Niedzielski P. FTIR as a method for qualitative assessment of solid samples in geochemical research: A review. *Molecules*. 2022. Vol. 27, № 24. P. 8846. DOI: 10.3390/molecules27248846.
9. Li H., Rahimi F., Sinha S., Maiti P. Amyloids and protein aggregation—analytical methods. *Encyclopedia of analytical chemistry*. 2009. P. 1–32. DOI: 10.1002/9780470027318.a9038.
10. Alkhuder K. Attenuated total reflection-Fourier transform infrared spectroscopy: A universal analytical technique with promising applications in forensic analyses. *International Journal of Legal Medicine*. 2022. Vol. 136, № 6. P. 1717–1736. DOI: 10.1007/s00414-022-02882-2.

11. Xing Z., Tian K., Du C., Li C., Zhou J., Chen Z. Agricultural soil characterization by FTIR spectroscopy at micrometer scales: Depth profiling by photoacoustic spectroscopy. *Geoderma*. 2019. Vol. 335. P. 94–103. DOI: 10.1016/J.GEODERMA.2018.08.003.
12. Le Guillou F., Wetterlind W., Rossel R. A. V., Hicks W. S. How does grinding affect the mid-infrared spectra of soil and their multivariate calibrations to texture and organic carbon? *Soil Research*. 2015. Vol. 53, № 8. P. 913–921. DOI:10.1071/SR15019
13. Robinson L. J., Robertson A. H. J., Dawson L. A., Main A. M. In situ FTIR analysis of soils for forensic applications. *Spectroscopy*. 2015. Vol. 30, № 8. P. 22–30.
14. Li H., Guo J., Ping H., Liu L., Zhang M., Guan F., Sun C., Zhang Q. Visual detection of organophosphorus pesticides represented by mathamidophos using Au nanoparticles as colorimetric probe. *Talanta*. 2011. Vol. 87. P. 93–99. DOI: 10.1016/j.talanta.2011.09.046.
15. Yang L., Pagliano E., Mester Z. Direct determination of dissolved phosphate and silicate in seawater by ion exclusion chromatography sector field inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analytical chemistry*. 2014. Vol. 86, № 6. P. 3222–3226. DOI: 10.1021/ac5002228.