
МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ХІМІЧНИХ ЗАБРУДНЮВАЧІВ ДОВКІЛЛЯ

Хижняк Світлана, Самкова Оксана, Войціцький Володимир
DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-539-6-14>

ВСТУП

Антропогенні зміни довкілля, зокрема внаслідок хімічного забруднення, обумовлюють трансформацію природних екосистем, перетворення усіх складників біосфери. Наша планета Земля вступила в нову епоху – людська діяльність нині є найважливішим чинником глобальних змін у довкіллі, які вже мають негативні наслідки та можуть бути незворотними для екологічних систем¹.

Збільшення негативного впливу на довкілля всіх видів людської діяльності потребує контролю екологічних умов стану навколишнього природного середовища в межах певних територій, регіонів, континентів для вироблення заходів на його захист, раціонального використання природних ресурсів, передбачення та запобігання критичним екологічним ситуаціям. В Україні згідно із Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища»² проводяться спостереження за станом навколишнього природного середовища, рівнем його забруднення, що здійснюється центральним органом виконавчої влади (Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України) та іншими відомствами. Місцеві ради відповідальні за стан навколишнього природного середовища на своїй території. Питанням запобігання забрудненню навколишнього природного середовища приділено увагу в Законі України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» від 28.02.2019 № 2697-VIII. Крім того, розробляються і приймаються державні цільові, міждержавні, місцеві програми з метою організації і

¹ Войціцький В.М., Хижняк С.В., Данчук В.В., Мідик С.В. та ін. Глобальне здоров'я, якість і безпека життя. Довідник-монографія. В 3-х томах. / Під загальною редакцією В.О. Ушкалова. К.: ЦК «Компринт», 2019. 640 с.

² Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>.

координації заходів щодо охорони навколишнього природного середовища, забезпечення екологічної безпеки, раціонального використання і відтворення природних ресурсів.

Для виявлення наявності токсичних хімічних забруднювачів та визначення їхнього вмісту в об'єктах довкілля (атмосферному повітрі, ґрунті, воді, біоті), харчових продуктах, кормах для тварин чи питній воді провідна роль належить фізичним і фізико-хімічним методам.³ Володіння інформацією щодо різноманіття та особливостей цих методів сприяють і визначають науково-обґрунтований їх добір для досліджень. Основне в цьому – це застосування для досліджень адекватного методу чи його модифікації, що дозволяє, насамперед, досягнути цілі дослідження і вирішити поставлені задачі. Добір методу досліджень стосовно певного об'єкту базується на його чутливості, точності, продуктивності, автоматизації тощо. Аналіз поширення забруднюючих речовин в об'єктах довкілля та добір стандартизованих методик аналізу дає можливість отримати необхідну інформацію про стан довкілля.

Поданий в роботі узагальнений матеріал стосовно методів контролю хімічних забруднювачів довкілля базується на раніше опублікованих авторами науково-експериментальних даних^{4,5,6,7}. Наведені приклади щодо застосування певних методів та методик отримано в дослідженнях, що проводяться в Українській лабораторії якості та безпеки продукції АПК НУБіП України.

1. Загальна характеристика забруднювачів довкілля

Забруднювачі довкілля – це речовини хімічного або біологічного походження, а також будь-який фізичний чинник. Вони потрапляють у довкілля або виникають в ньому в кількості, яка перевищує звичайну, і викликає забруднення, що шкодить природним екосистемам та людині.

³ Жирнов В.В., Савченко Д.А. Біоконверсія відходів: підручник. К. : ДДП «Експо-Друк», 2017. 302 с.

⁴ Мельничук Д.О., Мельничук С.Д., Войціцький В.М. та ін. Аналітичні методи досліджень. Спектроскопічні методи аналізу: теоретичні основи і методики / за ред. акад. Д.О. Мельничука. Київ : ЦП «Компринт», 2016. 289 с.

⁵ Войціцький В.М. Хижняк С.В., Грищенко В.А., Томчук В.А., Баранов Ю.С. Аналітичні методи досліджень. Хроматографічні та електрофоретичні методи аналізу: теоретичні основи й методики: навчальний посібник. К. : ЦП «Компринт», 2017. 268 с.

⁶ Войціцький В.М., Стародуб М.Ф., Хижняк С. В. Аналітичні методи досліджень. Електрохімічні методи аналізу: теоретичні основи і методики: навчальний посібник. К. : ЦП «Компринт», 2017. 232 с.

⁷ Войціцький В.М., Корнієнко В.І., Хижняк С.В., Самкова О.П., Вишнівський П.С., Альтанова А.Б. Аналітичні методи досліджень сировини і харчових продуктів (спектрофотометричні, хроматографічні, електрохімічні, електрофоретичні, імунологічні): посібник. Київ : Видавництво «Наукова столиця», 2024. 260 с.

За просторовим поширенням забруднення поділяють на:

- *Локальні* – характерні для міст, промислових підприємств, районів видобутку корисних копалин, тваринницьких комплексів.
- *Регіональні* – охоплюють значні території та акваторії, що підлягають впливу значних промислових підприємств.
- *Глобальні* – викликаються атмосферними викидами, поширюються на великі відстані від місця свого виникнення і створюють несприятливий вплив на регіони чи на всю планету.

За своєю природою забруднювачі поділяються на такі основні групи:

1. *Хімічні* – привнесені у біосферу тверді, газоподібні та рідкі речовини, хімічні елементи та сполуки штучного походження.

2. *Фізичні* – шуми, гравітаційні сили, вібрації, які спричинені людиною, а також зміни теплових, світлових, електромагнітних, радіоактивних полів у навколишньому середовищі.

3. *Біологічні* – поява в результаті діяльності людей нових різновидів живих організмів, підвищення патогенності паразитів та збудників хвороб, а також спровоковане людиною катастрофічне розмноження окремих видів тощо.

Забруднювачі докільля бувають природними та антропогенними. *Природні забруднення* – це результат виверження вулканів, землетруси, просідання ґрунту, вивітрювання і вимивання гірських порід і прибережних скель, дегазація земної кори та її тектонічні рухи, що викликані деформацією та розривами шарів, природні пожежі, урагани, повені, селеві потоки, тайфуни, торнадо та інші природні явища. *Антропогенні забруднення* поділяються на промислові (металургійні, хімічні, електротехнічні тощо підприємства, видобування корисних копалин та ін.); сільськогосподарські (використання добрив і отрутохімікатів, зокрема, пестицидів, скиди відходів тваринництва та ін.), військові (внаслідок військових дій, функціонування військових комплексів тощо); промислові і побутові відходи та їх знешкодження; викиди у довкілля продуктів спалювання викопного палива (вугілля, нафти, газу, торфу, сланцю); викиди та скиди транспортного комплексу; потрапляння у довкілля радіоактивних ізотопів (видобуток і переробка руди, функціонування ядерних реакторів, застосування радіоактивних речовин в промисловості, медицині та наукових дослідженнях, наслідки радіаційних аварій та інше).

Повномасштабна війна Російської Федерації проти України спричинила екоцид – навмисний згубний вплив на довкілля та його мешканців, який викликаний використанням та утворенням високотоксичних речовин. Це забруднення довкілля низкою токсичних

речовин воєнного призначення (етиленгліколем, дихлоретаном, трихлоретиленом, чотирехлористим вуглецем та ін., паливно-мастильними речовинами тощо), екологічно небезпечними речовинами пошкоджених або зруйнованих підприємств хімічної, металургійної, нафтопереробної, целюлозно-паперової, текстильної та інших галузей промисловості, а також сховищ паливно-мастильних матеріалів. Забруднення, зокрема ґрунтів і водоймищ, важкими металами зруйнованої військової техніки, залишками снарядів, мін, бомб, збитих ракет та іншими⁸.

За тривалістю дії забруднювачі поділяються на стійкі та нестійкі. Нестійкі забруднювачі під впливом різних факторів і процесів швидко розкладаються та розчиняються в природному середовищі. До стійких належать забруднювачі, які зберігаються в природі тривалий час (пластмаси, поліетилен, скло, радіоактивні речовини з великим періодом напіврозпаду тощо)⁹.

До небезпечних хімічних забруднювачів, які створені людиною, належать поліхлорбіфеніли (ПХБ), полібромні біфеніли (ПББ), поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), нітрузаміни, вінілхлориди (містяться в плівках, пакетах, поліетиленових упаковках, трубах), майже всі синтетичні пральні порошки. Крім того, небезпечними забруднювачами є перхлорати (особливо NH_4ClO_4) – це солі або складні етери перхлоратної кислоти (HClO_4). Вони застосовуються в хімічному синтезі, аналітичній хімії, при виробництві емалей і фарб, як добрива, зокрема амонійне добриво NH_4ClO_4 , а також в якості компонентів ракетного палива, вибухових речовин. Всі перхлорати (як неорганічні, так і органічні) є сильними окиснювачами.

У загальному випадку хімічні забруднювачі, які потрапили до наземних чи водних екосистем, через харчову продукцію та питну воду можуть надходити до організму людини та розподілятися у тканинах і органах. Причому, деякі можуть зберігатися там протягом багатьох років, що може значно впливати на здоров'я людей.

Тому завдання поліпшення навколишнього середовища наразі є досить актуальним, а крім того має економічне значення. Основою формування еколого-економічного зростання може стати *сталий розвиток*. Він включає в себе безліч процесів, механізмів та шляхи їх досягнення. Екологічна складова сталого розвитку полягає

⁸ Військова токсикологія, радіобіологія та медичний захист: підручник / Ю.М. Скалецький та ін. Тернопіль: Укрмедкнига, 2003. 362 с.

⁹ Войцицький В.М., Хижняк С.В., Мідик С.В., Сисолятин С.В., Коверсун І.В. Застосування моделювання для прогнозування міграції екотоксикантів наземними і водними екосистемами: науково-практичні рекомендації для установ України екологічного профілю. К: РВВ НУБіП України, 2019. 31 с.

у забезпеченні цілісності природних систем, їх життєздатність, що забезпечує глобальну стабільність усієї біосфери.

Один із шляхів забезпечення сталості екологічного розвитку України є отримання достовірних і співставних даних та інформації про стан довкілля для прийняття управлінських рішень у сфері охорони навколишнього природного середовища, для оперативного реагування та запобігання надзвичайним ситуаціям екологічного характеру. Крім того, екологізація має охоплювати усі сфери громадського розвитку: науку, промисловість, сільське господарство, соціальну та правову сферу, управління¹⁰.

В Україні наявність хімічних токсичних речовин в об'єктах довкілля (атмосферному повітрі, ґрунті, воді), харчових продуктах і кормах, питній воді регламентується низкою документів, зокрема, Державні санітарні правила і норми (ДСанПін) «Регламент максимальних рівнів окремих забруднюючих речовин у харчових продуктах» (Наказ МОЗ України № 368 від 13.05.2013 р. із змінами). Державні санітарні правила «Транспортування, зберігання та застосування пестицидів у народному господарстві» (ДСанПін 8.8.1.2.001-98) та інші. В основу нормування всіх забруднювачів, для з'ясування ступеня забруднення довкілля, оцінки шкідливості забруднювачів, проведення екологічних експертиз покладено визначення таких показників: гранично допустима концентрація (ГДК), гранично допустимі викиди (ГДВ) і скиди (ГДС), гранично допустимі екологічні навантаження (ГДЕН), максимально допустимий рівень (МДР) та ін.

З метою забезпечення збору, обробки, збереження та аналізу інформації про стан навколишнього природного середовища створена система досліджень і операцій – екологічний моніторинг. Державні органи разом з відповідними науковими установами забезпечують організацію короткострокового і довгострокового прогнозування змін навколишнього природного середовища, які повинні враховуватися при розробці і виконанні програм щодо охорони навколишнього природного середовища, використання і відтворення природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки.

На даний час при оцінці стану забруднення довкілля провідна роль належить інструментальним фізичним і фізико-хімічним методам визначення вмісту (концентрації) забруднювачів в об'єктах довкілля та оцінка ступеню забруднення у відповідності з визначеними нормативами. Застосування конкретного методу або комплексу методів якісного і кількісного визначення забруднювачів довкілля залежить,

¹⁰ Васильченко Л.С. Еколого-економічні аспекти сталого розвитку регіону. *Науковий вісник Херсонського державного університету*. Вип.11. Ч.1. 2015. С.100-103.

насамперед, від об'єкту, мети і задач дослідження, наявності необхідного обладнання і допоміжних матеріалів.

2. Фізичні та фізико-хімічні методи визначення забруднювачів довкілля

Аналітичні інструментальні фізичні та фізико-хімічні методи визначення хімічних забруднювачів довкілля умовно поділяються на два типи: 1) ті, які застосовуються для виділення зі зразка і очищення досліджуваної речовини (зокрема хроматографічні, електрофоретичні); 2) ті, за допомогою яких безпосередньо визначається кількість (концентрація) досліджуваної речовини у зразку (зокрема, спектроскопічні, електрохімічні, імунологічні і радіометричні).

Більш детальна інформація щодо різноманітних фізичні та фізико-хімічні методів визначення токсичних хімічних забруднювачів довкілля подана в наших попередніх виданнях, зокрема^{11,12,13,14,15,16}. Узагальнення відомостей щодо цих методів дає змогу оцінити можливості кожного з них для вирішення поставлених задач.

2.1. Спектроскопічні методи аналізу речовин

Спектроскопічні (лат. *spectrum* – видіння, видиме та грец. *skapeo* – дивитися, спостерігати) **методи** аналізу речовин ґрунтуються на взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, які

¹¹ Мельничук Д.О., Мельничук С.Д., Войціцький В.М. та ін. Аналітичні методи досліджень. Спектроскопічні методи аналізу: теоретичні основи і методики / за ред. акад. Д.О. Мельничука. Київ: ЦП «Компринт», 2016. 289 с.

¹² Войціцький В.М. Хижняк С.В., Грищенко В.А., Томчук В.А., Баранов Ю.С. Аналітичні методи досліджень. Хроматографічні та електрофоретичні методи аналізу: теоретичні основи й методики: навчальний посібник. К.: ЦП «Компринт», 2017. 268 с.

¹³ Войціцький В.М., Стародуб М.Ф., Хижняк С. В. Аналітичні методи досліджень. Електрохімічні методи аналізу: теоретичні основи і методики: навчальний посібник. К.: ЦП «Компринт», 2017. 232 с.

¹⁴ Войціцький В.М., Корнієнко В.І., Хижняк С.В., Самкова О.П., Вишнівський П.С., Альтанова А.Б. Аналітичні методи досліджень сировини і харчових продуктів (спектрофотометричні, хроматографічні, електрохімічні, електрофоретичні, імунологічні): посібник. Київ: Видавництво «Наукова столиця», 2024. 260 с.

¹⁵ Корнієнко В.І. Хижняк С.В., Мідик С.В., Дзядевич І.В., Войціцький В.М. Визначення поліциклічних ароматичних вуглеводнів спектрометричними та хроматографічними методами: методичні рекомендації. К.: Видавництво «Наукова столиця», 2023. 71 с.

¹⁶ Войціцький В.М., Стародуб М.Ф., Хижняк С.В., Мідик С.В., Слива Ю.В., Корнієнко В.І. Безпека. Методи контролю важких металів у довкіллі та сільсько-господарській продукції: навчальний посібник/ за ред. В.І. Корнієнко. К.: Прінтеко, 2022. 253 с.

застосовуються для ідентифікації, кількісного визначення елементів (хімічної речовини), дослідження перебігу хімічних реакцій тощо.

Спектроскопія в оптичній (світловій) області спектру поділяється на: ультрафіолетову (УФ-спектроскопія, довжина хвиль в діапазоні 10 – 380 нм), у видимому світловому діапазоні (довжина хвиль в діапазоні 380 – 750 нм) та інфрачервоному діапазоні (ІЧ-спектроскопія, довжина хвиль від 750 нм до 1 мм). Також існує спектроскопія в радіохвильовій області спектру (довжина хвиль в діапазоні $30 - 3 \cdot 10^3$ см).

У залежності від характеру взаємодії речовини з електромагнітним випромінюванням розділяють:

- абсорбційну спектроскопію – заснована на вимірюванні поглинання речовиною (чи атомами) світлового випромінювання, наприклад, фотокolorиметрія, спектрофотометрія, атомно-адсорбційні методи;
- емісійну спектроскопію – заснована на вимірюванні інтенсивності світла, випромінюваного речовиною (чи атомами), наприклад, спектрофлуориметрія, атомно-емісійний спектральний аналіз.

Сорбційно-фотометричний метод¹⁷ для визначення перхлорату опирається на явищі вимірювання дифузного (розсіяного) відбиття світла – це відбиття світла поверхнею, при якому світлові промені відбиваються в різних напрямках. Спектрофотометр або фотокolorиметр дають змогу вимірювати дифузне (розсіяне) відбиття світла твердих носіїв за довжини хвилі 600 – 640 нм. При цьому проводиться кількісне визначення перхлорат-аніонів у воді (питній, річковій чи озерній, стічній), яка забруднена перхлоратами. Цей метод використовується в межах концентрації від 0,010 мг/дм³ до 0,800 мг/дм³.

Атомно-спектроскопічні методи базуються на визначенні спектрів при зміні енергетичного стану атомів речовин. Вони відрізняються за способом отримання та реєстрації сигналу, однак всі потребують попередньої атомізації проб. Атоми речовин, які випаровуються в полум'ї, випромінюють чи поглинають світло певної довжини хвилі. За інтенсивності смуг у спектрі можна визначити кількість окремих хімічних елементів у зразку. Методи атомної спектроскопії широко використовуються для якісного і кількісного визначення хімічних елементів в об'єктах довкілля (воді, ґрунті, атмосферному повітрі, живих організмах), продуктах харчування та кормах, питній воді.

Розрізняють: *атомно-емісійний спектральний аналіз*, який проводять за спектрами випромінювання атомів, збуджених за використання різних зовнішніх джерел (дуга, іскра, полум'я, плазма тощо); *атомно-абсорбційний спектральний аналіз*, який здійснюється за спектрами

¹⁷ ДСТУ 7147:2010. Якість води. Визначення масової концентрації перхлорат – іонів фотометричним методом.

поглинання при проходженні світла крізь в атомарному стані газу або пари досліджуваного зразка; *атомно-флуоресцентний аналіз*, який полягає в тому, що атомарні гази або пари опромінюють резонансним для елемента випромінюванням і реєструють його флуоресценцію.

Методика проведення атомно-абсорбційного аналізу, порівняно з іншими методами атомного спектрального аналізу, значно простіша і дає змогу визначати до 70 елементів з чутливістю $\sim 10^{-4}$ – $10^{-9}\%$ маси. На сьогодні цей метод вважається одним із найбільш селективних, експресних, продуктивних, точних і водночас відносно дешевих методів.

Метод атомно-емісійної спектроскопії дає змогу досліджувати складні проби і визначати одночасно декілька елементів. Зокрема методом атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою можливе визначення вмісту хімічних елементів (Al, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sr, Zn, Se, As) в різних досліджуваних матрицях (вода, зразки ґрунту, харчова продукція тощо). Умови для визначення важких металів методами атомної спектроскопії та мінімальна частка їх вмісту, яка визначається цими методами, наведені в Таблиці 1.

Таблиця 1

Довжини хвиль, які використовуються в атомно-емісійній та атомно-абсорбційній спектроскопії для визначення деяких хімічних елементів, а також мінімальна межа їх визначення

Хімічні елементи	Атомно-емісійна спектроскопія		Атомно-абсорбційна спектроскопія	
	Довжина хвилі, нм	Мінімальна частка хімічного елементу ($\times 10^{-6}$)	Довжина хвилі, нм	Мінімальна частка хімічного елементу ($\times 10^{-6}$)
Алюміній	484,2	3,0	309,3	1,0
Сурьма	-	-	217,5	0,5
Барій	493,4	0,2	553,6	0,4
Кадмій	326,1	10	228,8	0,03
Цезій	852,1	1,0	-	-
Кальцій	422,7	0,005	357,3	0,1
Хром	425,6	0,5	357,9	0,2
Кобальт	352,7	0,5	240,7	0,2
Купрум	324,8	0,1	324,8	0,1
Ферум	372,0	0,5	248,3	0,2
Плюмбум	-	-	283,3	0,5
Літій	670,7	0,001	543,4	0,03
Магній	285,2	0,1	174,3	0,01
Манган	403,3	0,02	279,5	0,05

Продовження таблиці 1

Меркурій	-	-	253,8	10,0
Нікол	-	-	341,5	0,2
Калій	266,5	0,001	612,5	0,03
Натрій	589,0	0,001	424,6	0,03
Станум	-	-	286,3	2,5
Ванадій	-	-	318,4	1,5
Цинк	-	-	213,9	0,03
Стронцій	460,7	0,01	460,7	0,06

До **методів радіоспектроскопії**, що базуються на спектроскопії в діапазоні радіохвиль відносяться *метод електронного парамагнітного резонансу* (ЕПР), який ґрунтується на визначенні переходів власних моментів руху навколо своєї осі неспарених орбітальних електронів, так званих спінів, які відбуваються внаслідок взаємодії цих електронів із зовнішнім магнітним полем, а також *метод ядерного магнітного резонансу* (ЯМР), в основі якого знаходиться реєстрація переходів магнітного моменту ядер атомів під впливом зовнішнього магнітного поля. Результатом такої взаємодії є генерування відповідних ЕПР-сигналів і ЯМР-сигналів, які формують відповідні їхні спектри.

Цими методами можна отримати цінні відомості про структуру речовини, передусім органічних складових. За цими відомостями речовини ідентифікуються і визначаються їхній вміст (концентрацію) в досліджуваних об'єктах.

Значно розширюють межі застосування ЕПР-спектроскопії використання спінових міток і спінових «пасток». В першому випадку до молекули, яка не містить неспарених електронів, тобто не має ЕПР-сигналу, приєднують стабільний вільний радикал (стійку групу атомів, яка може переходити від однієї сполуки до іншої), що має ЕПР-сигнал, який слугує джерелом інформації про вихідну молекулу. В методі спінових «пасток» в дослідний зразок вводять не парамагнітну «пастку», що сприяє утворенню радикалу, який має ЕПР-сигнал.

Метод ЯМР застосовується для ідентифікації та визначення концентрації речовин за ядрами атомів, які володіють магнітним моментом, а також для визначення реакційної здатності таких атомів (як вільних, так і у складі молекул). Одним із поширених методів ЯМР-спектроскопії є *протонний магнітний резонанс* (ПМР), оскільки протони (H^+) не тільки поширені в хімічній структурі атомів і молекул, але і володіють вираженими магнітними властивостями.

Мас-спектроскопія (чи мас-спектрометрія) – це метод аналізу речовин, визначення хімічного складу і молекулярної структури, який

базується на реєстрації спектру мас іонів, утворених внаслідок іонізації атомів і (або) молекул проби. Іони розділяють після прискорення в магнітному полі за величиною відношення маси до заряду (m/e). Інтенсивність (амплітуду піків) у мас-спектрі, яка відповідає кількості відповідного іону, виражають, як правило, у відсотках до інтенсивності основного піка (вісь ординат на мас-спектрі). При кількісному визначенні проводять відповідні перерахунки. Число хімічних елементів, що одночасно визначаються у природних об'єктах – до 40. Абсолютна межа виявлення: 10^{-10} - 10^{-19} г.

В методі мас-спектроскопії дослідження проводиться з високоочищеними речовинами, тому застосовується, як правило комбінація цього методу з хроматографією (див.нижче), з метою очищення досліджуваного зразка. Мас-спектрометрія належить до найінформативніших методів і відрізняється високими аналітичними характеристиками, дозволяє провести аналіз твердих, рідких і газоподібних речовин.

До *молекулярних абсорбційних методів* відноситься *спектрофотометрія*, яка базується на визначенні спектру поглинання або вимірюванні інтенсивності світлопоглинання досліджуваної речовини. У цьому методі використовується світло як у видимій, так і ультрафіолетовій та інфрачервоній частинах оптичного спектру.

Дослідження проводять за використання приладів – *спектрофотометрів*, основні частини якого: джерело світла, диспергуючий елемент, кювета з досліджуваною речовиною, приймач випромінювання (детектор), реєструючий пристрій. У якості джерела випромінювання в УФ-області застосовують дейтерієву (або водневу) лампу, а у видимій і ближній ІЧ областях спектру – вольфрамову лампу розжарювання. Підсилювачем світлового сигналу служать фотоелектронні помножувачі та фотоелементи. Диспергуючими елементами приладу є призматичні монохроматори або як монохроматори – дифракційні ґратки. Приймач випромінювання (детектор) – пристрій, який перетворює світлову енергію в електричні сигнали. Для подальшого перетворення та підсилення сигналу використовують помножувачі постійного та змінного струму. Після підсилення сигнал потрапляє на реєструючий пристрій. Спектр отримують в графічній чи цифровій формах. Вибір для досліджень певного типу спектрофотометра визначається, в першу чергу, метою досліджень та поставленими задачами. Важливим є також вартість і доступність необхідної апаратури, наявність у дослідників необхідних навичок.

Спектрофотометрію широко застосовують для якісного і кількісного аналізу речовин у різних природних об'єктах. Поширеним є методичний підхід визначення концентрації (вмісту) досліджуваної речовини за ступенем інтенсивності забарвлення утвореної сполуки.

Використання спектрофотометричних методів для визначення токсичних забрудників довкілля.

При якісному та кількісному визначенні важких металів, наприклад, Купруму, Цинку, Феруму, Плюмбуму у воді (природній чи стічній), витяжках (екстрактах) ґрунту, органах і тканинах рослин та тварин, зразки попередньо піддають обробці для отримання сульфатів, а потім внаслідок проведеної специфічної (для кожного елементу) хімічної реакції утворюється забарвлена сполука яку визначають спектрофотометрично у видимій області спектру. Для кількісного визначення досліджуваної речовин проводять відповідні перерахунки.

При визначенні Феруму, характерною реакцією є взаємодія цього елементу з калію роданідом, внаслідок якої утворюється сполука ферум роданід червоного кольору. В реакції Купруму з діетилтіофосфатом утворюється сполука жовто-оранжевого кольору, Цинку з дифенілтіокарбазоном – яскраво-червоного кольору, Мангану з амонію персульфатом в присутності іонів Аргентуму – пурпурового кольору та ін.

Подібним чином можлива ідентифікація та кількісне визначення певних пестицидів, при утворенні забарвлених сполук, методом абсорбційної спектрофотометрії у видимій області спектру світла.

Визначення купрум-вмісних пестицидів за реакціями комплексних солей Купруму. За цією реакцією визначають такі пестициди як цирам, купроцин-I, купроцин-II, манеб, марцин та деякі інші у повітрі.

Визначення утворених вторинних аліфатичних амінів. На цій реакції базується визначення фунгіциду тетраетилтинурамди-сульфіду (ТМТД), який є похідною сполукою дітіокарбамінової кислоти.

Визначення пестицидів за утворенням забарвлених сполук з резорцином. Резорцин є широкоживим барвником. На реакції з цим барвником, внаслідок утворення забарвленої сполуки, визначають інсектоакарицид диметил-дихлорвінілфосфат (ДДВФ).

Визначення пестицидів за утворенням забарвлених сполук з бутілпропаміном. Бутілпропамін – широкоживим барвник, який утворює забарвлену сполуку з гербіцидом 2,4 – Д (похідна хлорфенооцетової кислоти, а саме 2,4 – дихлорфенооцетової кислоти). Подібні реакції притаманні також похідним 2,4 – Д, що дозволяє їх ідентифікації та кількісному визначенню спектрофотометричним методом.

Визначення пестицидів за утворенням забарвлених сполук в реакції з о-толїдином. Ряд пестицидів, зокрема етерсульфонат, хлорофос, ДДВД, утворюють з о-толїдином забарвлені продукти реакції, що дозволяє їх ідентифікації спектрофотометричним методом.

Визначення забруднюючих речовин методом абсорбційної спектроскопії в ультрафіолетовій області спектру. Спектроскопію

в УФ-діапазоні проводять як для ідентифікації (якісного аналізу) так і кількісного аналізу речовин, зокрема пестицидів. Основна вимога до речовини, що піддається аналізу в УФ-діапазоні – наявність у молекулах відповідних хромофорних груп, які здатні поглинати УФ-випромінювання (при абсорбційній спектроскопії в УФ-області спектра світла). Це, зокрема, подвійні зв'язки (наприклад, $-\text{C}=\text{C}-$), системи типу $-\text{C}=\text{C}-\text{C}=\text{O}$, ароматичні групи, функціональні групи, які мають подвійний чи потрійний зв'язок.

Використання методів інфрачервоної спектроскопії для визначення токсичних забрудників довкілля. Спектроскопія в ІЧ-області спектру має ряд переваг перед спектроскопією у видимій і ультрафіолетовій областях спектру, оскільки дозволяє розрізнити речовини з близькою структурою і хімічними властивостями, виявити типи зв'язків у молекулах, що дає можливість визначити структуру молекул без руйнування досліджуваної речовини.

Інфрачервоною спектроскопією можна визначати найрізноманітніші речовини, зокрема і органічні токсиканти. Так, вона відносно широко застосовується для визначення пестицидів, спектри яких обумовлені певними функціональними групами, що може бути використано для селективного визначення даного пестициду. Так, наприклад, $\text{P}=\text{O}$ і $\text{P}=\text{S}$ групи можуть бути використані для визначення фосфорорганічних пестицидів (ФОП), зокрема, ІЧ-спектри поглинання тіо- і дитіофосфорної кислоти мають характеристичні лінії (смуги) в зоні 690 см^{-1} , які обумовлені валентними коливаннями $\text{P}=\text{S}$ -зв'язку. Валентні коливання $\text{P}=\text{O}$ -зв'язку обумовлюють лінії в зоні $1300 - 1120\text{ см}^{-1}$. За ІЧ-спектрами можна розрізняти ізомери пестицидів, зокрема α - і β -ізомери деяких галогеновуглеводнів, що дає змогу їх ідентифікувати. Так, наприклад, основна смуга поглинання α -ізомеру ендосульфату – 1200 см^{-1} , а β -ізомеру – 2950 і 4112 см^{-1} .

На даний момент межа виявлення і, головне, розшифровки ІЧ-спектрів речовин значно поліпшена в зв'язку із застосуванням перетворення Фур'є, яке дає змогу підвищити чутливість ІЧ-методу. Ця процедура дозволяє провести цифрову обробку великої кількості сигналів для визначення їх складу. Молекулярна специфічність методу ІЧ-спектроскопії поступається, мабуть, тільки методу мас-спектроскопії.

Використання спектрофлуориметрії для визначення токсичних речовин. Випромінювання квантів світла збудженими молекулами речовини за рахунок поглинутого світла називається *флуоресценція*. У складі речовин можуть існувати власні *флуоресцентні хромофори* (групи атомів, які здатні до поглинання і випромінювання світла); *флуоресцентні мітки* – це флуоресцентні хромофори, які приєднано до

молекул у ході хімічних реакцій ковалентним зв'язком; *флуоресцентні зонди* – це флуоресцентні хромофори, які приєднані до молекули нековалентним зв'язком.

Застосування *спектрофлуоресцентного методу* (вимір флуоресцентних характеристик досліджуваної речовини) дозволяє проводити якісний і кількісний аналіз речовин, в тому числі органічних токсикантів. В дослідження застосовують спектрофлуориметри в яких, як правило, використовують джерела світла з широким спектральним діапазоном.

Флуоресцентним методом за кольором флуоресценції визначають ряд речовин: при поглинанні ультрафіолетового світла за кольором флуоресценції визначають афлатоксини B_1 і B_2 (синьо-блакитна флуоресценція), а також G_1 і G_2 (зелена флуоресценція), M_1 і M_2 (синьо-фіолетова флуоресценція).

Враховуючи, що ряд пестицидів складні органічні сполуки, які містять власні флуоресцентні хромофори, – це дозволяє визначати ці речовини флуоресцентним методом (рис. 1).

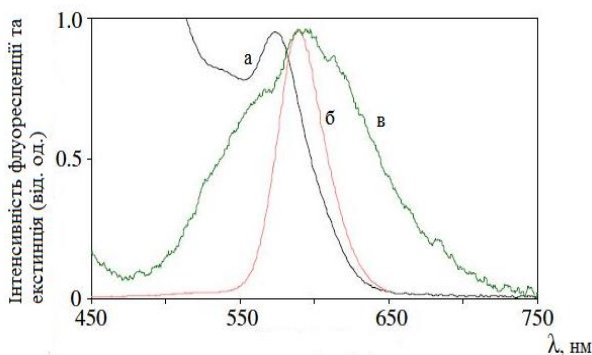


Рис. 1. Спектри поглинання (а) і флуоресценції іммобілізованого на тонкій плівці наночастинок ZnCdSe (б) та в розчині (в) комерційного пестициду

Методи спектрального аналізу стандартизовані, інформація про характерні спектри більшості елементів і багатьох молекул знаходиться в базах даних, що значно прискорює аналіз та ідентифікацію хімічних речовин. Спектральний аналіз можливо використовувати навіть для визначення «слідових» кількостей елементів. Крім самостійного використання, спектроскопічні методи широко застосовуються з іншими аналітичними методами (зокрема хроматографічними та електрофоретичними) для детектування речовин.

2.2. Хроматографічні методи аналізу речовин

Хроматографічні (грецьк. *chroma* – колір та *graho* – пишу) **методи** – це методи розділення суміші речовин, ідентифікації та визначення вмісту (концентрації) досліджуваних речовин. Вони базуються на різній взаємодії компонентів суміші з рухомою і нерухомою фазами, що не змішуються в динамічних умовах. В процесі хроматографії рухома фаза (газ або рідина), яка містить досліджувану речовину, перемішуються через нерухому фазу (рідина або тверде тіло). Розділення речовин досягається внаслідок сорбції компонентів суміші нерухомою фазою з наступним вимиванням, що відбувається з різною швидкістю.

При проведенні хроматографічного аналізу використовують *хроматографи*, невід'ємною частиною яких є детектори у яких відбувається реєстрація хроматографічного сигналу та його перетворення у електричний сигнал, що використовується для ідентифікації та кількісного визначення досліджуваних речовин. *Детектор електронного захвату* (ДЕЗ) застосовується для визначення сполук, що володіють великою спорідненістю до електронів. В основі роботи *полум'яно-іонізаційного детектору* (ПІД) покладена залежність електричної провідності іонізованого газу від його складу. Детектор використовується, в основному, для визначення в газовій суміші органічних сполук. *Термоіонний детектор* (ТІД) – це один з найбільш чутливих і селективних детекторів до фосфорорганічних речовин. *Полум'яно-фотометричний детектор* (ПФД) є селективним по відношенню до фосфор- та сірковмісних речовин. У *атомно-емісійному детекторі* (АЕД) проба переводиться в атомарний стан, а атоми, що утворилися, переходять в збуджений стан. За використання *фотоіонізаційного детектору* (ДФІ), в якому відбувається реєстрація спектрів, що виникають внаслідок іонізації атомів, детектуються всі сполуки, у тому числі і неорганічні. Робота *мас-спектрометричного детектору* (МСД) базується на розділенні утворених, зокрема, після бомбардування електронами молекул газоподібної речовини прискорених в магнітному полі за відношенням маси до заряду – m/e . *Флуоресцентний детектор* (ФЛД) реєструє флуоресценцію власних флуоресцентних хромофорів дослідних речовин або зв'язаних з цими речовинами флуоресцентних міток чи зондів.

Крива елюювання (*хроматограма*) характеризує вихід розділених речовин суміші. Кожен пік на цій кривій відповідає окремому компоненту, а площа кожного піка характеризує відносний вміст цього компонента в суміші. Основні характеристики піків хроматограми (рис. 2) – віддаленість їх центрів «ваги» від точки, яка відмічає момент введення в хроматограф суміші, що досліджується, а також ширина

піка. Ідентифікацію речовин, які розділені хроматографічним методом, проводять, зазвичай, з використанням стандартних речовин (тест-стандартів).

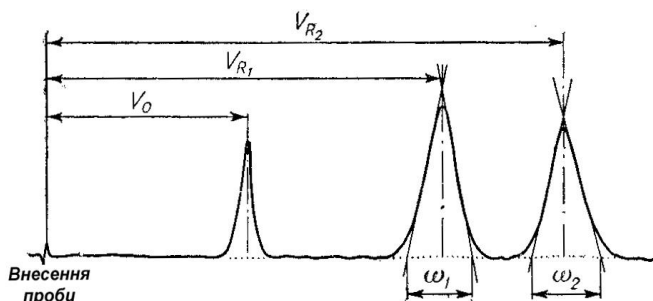


Рис. 2. Параметри хроматограми:

V_0 – мінімальний утримуючий об'єм (вільний об'єм);
 V_{R1} і V_{R2} – об'єми утримання речовини 1 і 2, відповідно;
 ω_1 і ω_2 – об'єми витрат елюента.

Враховуючи значну різноманітність хроматографічних методів, існують їх різні класифікації. За агрегатним станом розрізняються: *газова хроматографія*, у якій рухома фаза – інертний газ (газ-носії, зокрема, аргон, гелій, азот, водень), що протікає через нерухому фазу з великою поверхнею; *рідинна хроматографія*, у якій рухома фаза – рідина; *рідинно-рідинна* розподільна хроматографія, у якій рідину, яку нанесено на носій, називають нерухомою рідкою фазою, а розчинник, що пересувається через носій, – рухомою рідкою фазою; *газорідинна хроматографія*, у якій рухома фаза – газ, а нерухома – рідина, що нанесена на поверхню твердого носія.

За механізмами розділення (тобто характером взаємодії між сорбентом та сорбатом) розрізняють, наприклад: *Адсорбційна хроматографія* – розділення відбувається на поверхні адсорбенту в умовах рівноваги між рухомою і нерухомою фазами. В цій хроматографії нерухомою фазою, зазвичай, є полярний адсорбент, який володіє вибірковістю (специфічністю), хімічною інертністю тощо. *Розподільна хроматографія* – розділення ґрунтується на відмінності в розчинності речовин, що розділяються, в нерухомій фазі (газова хроматографія) та на відмінності в розчинності речовин, що розділяються, в рухомій та нерухомій рідких фазах. *Іонообмінна хроматографія* – розділення ґрунтується на відмінності в здатності речовин, що розділяються, до іонного обміну.

За характером техніки, що застосовується: хроматографія на колонці – розділення речовин проводиться в спеціальних колонках; тонкошарова хроматографія – поділ речовин проводиться в тонкому шарі сорбенту.

Один з найсучасніших хроматографічних методів багатокомпонентного аналізу – газорідинна хроматографія (ГРХ) її особливість – експресивність, висока точність, чутливість, можливість автоматизації. Метод дозволяє вирішити багато аналітичних проблем. Саме ГРХ стала одним із самих універсальних методів розділення сумішей низькомолекулярних сполук (із молекулярною масою, як правило, меншою 1000 Да) та визначення залишкових кількостей пестицидів.

Досить ефективним є використання методу *хромато-мас-спектрометрії* – поєднання газового хроматографа з мас-спектрометром (ГХ/МС), при цьому чутливість такого приладу складає декілька пікограм (пг, 10–12 г) досліджуваної речовини. Це дозволяє виконувати якісний і кількісний аналіз дуже малих кількостей досліджуваних речовин (рис. 3).

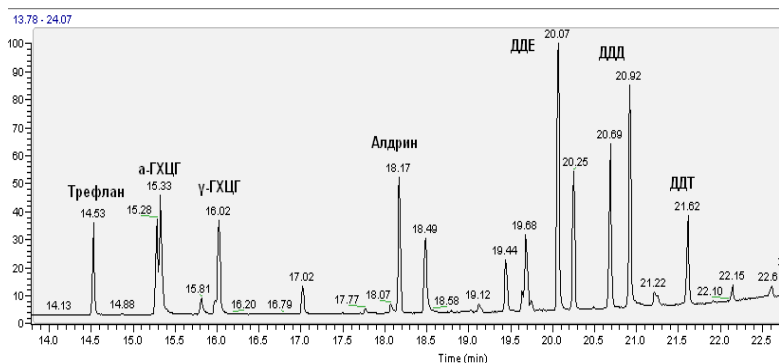
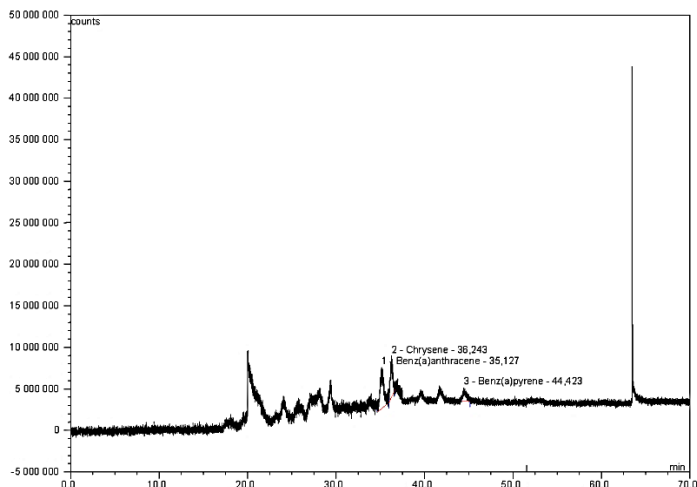


Рис. 3. Хроматограма визначення деяких хлорорганічних пестицидів, методом ГХ з мас-спектрометричним детектором (МСД), хроматограф «Thermo Finnigan GC Ultra»

Мас-спектрометрію також використовують з *високоєфективною рідинною хроматографією* (ВЕРХ, англ. HPLC, High performance liquid chromatography). Це один з ефективних методів розділення складних сумішей речовин та швидкістю проведення аналізу. Системи на основі ВЕРХ/МС можуть проводити аналіз мікродомішок, а також ідентифікацію цільових компонентів у складній суміші речовин завдяки високій чутливості мас-спектрометричного детектування, особливо в режимі

селективного детектування, насамперед, речовин які важко піддаються аналізу методом газової хроматографії. У методі ВЕРХ використовуються і інші детектори, зокрема ВЕРХ/СФД, ВЕРХ/ФЛД та ін. Приклад застосування ВЕРХ для визначення ПАВ у соняшникової олії наведено на Рисунку 4.

Таким чином, хроматографічні методи надзвичайно широко поширені для визначення токсичних забрудників в об'єктах довкілля (атмосферне повітря, ґрунт, вода) харчових продуктах та питній воді.



**Рис. 4. Хроматограма соняшникової олії, що містить поліциклічні ароматичні вуглеводні, яка отримана методом високоефективної рідинної хроматографії з флуоресцентним детектором.
Хроматограф Dionex UltiMate 3000 Dual/FLD**

2.3. Електрохімічні методи аналізу речовин

Електрохімічні методи – це група методів якісного і кількісного аналізу речовин, які ґрунтуються на вимірюванні електричних явищ, що виникають у досліджуваному розчині або на поверхні занурених в розчин електродів. Електрохімічні процеси використані при створенні детекторів (приладів для аналізу речовин), розробці та застосуванню *селективних електродів*, яким притаманна вибірковість і достатня чутливість. Саме селективні електроди широко використовують для визначення ряду токсичних речовин в об'єктах довкілля, зокрема, нітратів, важких металів та інших.

Іонселективні (мембранні) електроди – електрохімічна система, основним елементом якої є мембрана, проникна виключно для іона, який аналізують. Мембрана розділяє два розчини електроліту: розчин, що аналізують (зовнішній розчин), та стандартний розчин (внутрішній) із відомою концентрацією іону. Між розчинами виникає різниця потенціалів, визначення величини якої дає можливість виміряти концентрацію іону, що аналізують. Розрізняють іонселективні електроди з *твердофазною чи рідинною* мембраною. Твердофазні мембрани електродів можуть бути гомогенними, виготовленими з моно– або полікристалів важкорозчинних солей, та гетерогенними, виготовленими з тих же солей, але у суміші з інертною матрицею. Рідинна мембрана електродів – це рідинна фаза, яка складається з органічного розчинника, що не змішується з водою, в якому розчинені катіоніти або аніоніти.

Розглянемо деякі з них, що застосовують для визначення токсичних хімічних елементів. В *Cl-чутливих* електродах основою Cl-селективних твердофазних мембран є AgCl. Такі електроди використовують для визначення аніону Хлору (Cl^-) у повітрі, ґрунті та воді, біологічних рідинах (крові, сечі), витяжках з рослинних і тваринних продуктів та їх сировини.

Для *ціанід-селективних електродів* твердофазні мембрани виготовляються на основі галогенових срібних електродів (AgCl , AgBr , AgI). Ці електроди, які формуються вбудовуванням галогенідів срібла в силіконовий каучук і наступним пресуванням у, наприклад, поліетилен, застосовуються для визначення концентрації ціаніду (CN^-) в різноманітних об'єктах (воді, біологічних рідинах, витяжках тощо).

Сульфур-селективні електроди з твердофазною мембраною використовують для визначення концентрації аніона Сульфору (S^{2-}) у воді, потенціометричного титрування тіосечовини, тіоацетатамідів та ін. В основі робочого елемента цих електродів знаходиться срібла сульфід (Ag_2S). Мембрани цих електродів виготовляють пресуванням Ag_2S при введенні осаду цієї сполуки у матрицю з силіконового каучуку з наступним термоформуванням отриманої суміші в термопластичний полімер, наприклад, поліетилен.

Cd-селективні електроди з твердофазною мембраною можна отримати пресуванням у пігулки або спіканням сумішей CdS і Ag_2S чи CdS і Ag_2S з CuS при попередньому нанесенні на керамічну пластинку; вбудовуванням суміші CdS і Ag_2S у силіконовий каучук; пресуванням суміші CdS і Ag_2S з поліетиленом тощо. Найкращим на даний час є Cd-електрод, який отриманий наступним чином: осад $\text{CdS}-\text{Ag}_2\text{S}$, який осаджують з кислотного розчину Cd і Ag пропусканням через нього H_2S , піддають термообробці на керамічній пластинці. Отримані таким чином Cd-селективні електроди використовуються для визначення Кадмію в повітрі, воді та ґрунті, с/г продукції.

Ферум-селективні електроди з твердофазною мембраною мають кілька конструкцій. Так, в основному, для створення селективної до Феруму (Fe^{3+}) мембрани застосовують халькогенідне скло (60% Se, 28% Ge і 12% Sb) з добавками Fe, Co і Ni. Для збільшення чутливості таких електродів до Феруму, його поверхню протравлюють розчином каустичної соди і активують зануренням в 10^{-3} М розчин Fe^{3+} . Використання Fe-селективних електродів надзвичайно широке. Вони використовуються для визначення Феруму в об'єктах довкілля (атмосфері, воді, ґрунті, руді, мінералах та ін.), сільськогосподарській продукції.

Купрум-селективні електроди з твердофазною мембраною отримують декількома методами. Так, зокрема, Cu-селективний електрод становить полівінілхлоридну матрицю з осадом купруму йодиду (CuI_2), яка вимочена в 0,2 М розчині KI. Використовуються Cu-селективні електроди для визначення Купруму в об'єктах довкілля (атмосферному повітрі, воді, ґрунті, руді та мінералах), різних технологічних матеріалах, сільськогосподарській продукції.

Плюмбум-селективні електроди з твердофазною мембраною виготовляють, в основному, з суміші PbS і Ag_2S , які пресують у пігулки. Селективні Pb-твердофазні мембранні електроди отримують також вбудовуванням PbS і Ag_2S в силіконовий каучук або спіканням суміші цих речовин з полімером. Використовують Pb-селективні електроди для визначення концентрації цього хімічного елемента в рудах і мінералах, у воді, ґрунті та атмосферному повітрі, дизельному паливі та бензині, в тваринних і рослинних продуктах харчування.

Цезій-селективні електроди з твердофазною мембраною виготовляють наступним чином: осад цезієвої солі молібденофосфорної кислоти (Cs – Mo – P) змішують з силіконовим каучуком і запресовують у пігулки (диски), які закріплюють в кінці скляної трубки і до яких приєднують струмопровідний дріт. Такі електроди використовують для визначення Cs в концентраціях до 10^{-5} М. Застосовують Cs-селективні електроди для визначення цього хімічного елемента у воді, ґрунті, мінералах, кормах для тварин, харчових продуктах тваринного і рослинного походження тощо.

Купрум-селективні електроди з рідинною мембраною – це, як правило, целюлозна плівка, яка просякнута іонообмінником, що містить хімічну групу $-\text{S}-\text{CH}_2\text{OO}^-$, яка приймає участь в обміні з Cu^{2+} .

Ферум-селективні електроди з рідинною мембраною містять гемін в нітробензолі. Такий електрод здатний вимірювати Fe^{3+} в межах концентрацій $10^{-1} - 10^{-4}$ М в розчинах (зокрема, кислот), де не утворюються комплекси Ферума з іншими сполуками.

Цинк-селективні електроди з рідинною мембраною проявляють селективність до Zn^{2+} в межах концентрацій $10^{-1} - 10^{-4}$ М.

Розроблено і використовуються багато конструкцій електродів, які чутливі до газів: O_2 , CO_2 , NH_3 , NO_2 , SO_2 , H_2S , HCN , HF , Cl_2 , Br_2 , I_2 та ін.

Для селективного визначення декількох речовин використовуються *багатоканальні електроди*. Їх створюють шляхом поєднання декількох модифікованих електродів, в основному, на польових транзисторах.

2.4. Імунологічні методи аналізу речовин

Імунологічні методи – це група методів, що базуються на реакції “антиген – антитіло”, які можна використати для якісного і кількісного визначення токсичних забруднювачів довкілля. В основі імунологічних методів використовується унікальна специфічність антитіл (речовин білкової природи, які синтезуються під впливом антигенів і здатні специфічно взаємодіяти з ними) селективно зв’язуватися з антигенами (їх розпізнавати), що надає можливість їх кількісного визначення.

На сьогодні, на основі реакцій «антиген – антитіло» розроблені нові, дуже специфічні і чутливі методи, такі як: імуоелектрофорез; імуоблотинг; імуоафінна хроматографія; імуоферментний аналіз (ІФА); радіоімунний аналіз (РІМ) та ін.

Завдяки високій специфічності при визначенні токсичних речовин важливого значення набув метод *флуоресцентного імуоаналізу* (ФІА), який заснований на використанні специфічної імунної реакції та високої чутливості виміру флуоресценції. У цьому методі мітять флуоресцентною міткою антитіла (речовини білкової природи), які синтезуються під впливом чужорідних для організму речовин (антигенів).

Імунологічні методи застосовуються для якісного і кількісного аналізу пестицидів особливо в поєднанні з іншими методами¹⁸. Так, розроблено радіоімунний метод аналізу 2,4-D і 2, 4,5-трихлорфенолу у воді з чутливістю $1 \cdot 10^{-15}$ мг/дм³; деяких ФОП, перетроїдів, сим-триазинів та інших пестицидів у ґрунті, воді, продуктах харчування, тощо.

2.5. Радіометричні методи аналізу речовин

Радіометричні методи базуються на реєстрації іонізуючих випромінювань, які здатні безпосередньо або опосередковано іонізувати атоми чи молекули, тобто утворювати іони (позитивно електрично заряджені

¹⁸ Аналітична хімія залишкових кількостей пестицидів : навч. посіб. / М. А. Клисенко, Л. Г. Александрова, В. Ф. Демченко, Т. Л. Макачук. К.: Ін-т екології і токсикології ім. Л.І.Медведя, 1999. 238 с.

частинки) і вільні електрони¹⁹. Іонізуючі випромінювання дефектуються за допомогою пристосувань і приладів, робота яких базується на фізико-хімічних ефектах, що виникають при взаємодії випромінювань з речовиною детектора. Детектори іонізуючих випромінювань поділяються на ряд типів, найбільш поширені іонізаційні, сцинтиляційні та напівпровідникові.

В *іонізаційних детекторах* використовують здатність радіаційних випромінювань іонізувати гази (зокрема інертні гази аргон, гелій, неон та ін.) або спеціальні газові суміші з низьким потенціалом іонізації. Іонізацію атомів і молекул газів реєструють за виникненням і величиною електричного струму.

В *сцинтиляційних детекторах* використовується здатність радіоактивних випромінювань при взаємодії з певними речовинами викликати явище сцинтиляції – виникнення короточасних слабких спалахів світла. Це є наслідком того, що молекули деяких речовин (називаються сцинтиляторами) при поглинанні енергії випромінювання переходять у збуджений стан, а при поверненні в основний стан випромінюють поглинуту енергію (за виключенням частини, що перетворюється у тепло) у вигляді світла, яке реєструється.

Функціонування *напівпровідникових детекторів* базується на властивості напівпровідників проводити електричний імпульс, який викликається дією радіоактивного випромінювання. Використання того чи іншого детектора радіоактивності, що мають свої переваги і недоліки, визначається, насамперед, метою і цілями досліджень.

Необхідність визначення в об'єктах довкілля (грунті, воді, атмосфері, організмах) та харчових продуктах і кормах радіоактивних речовин, пов'язана, зокрема, з наслідки радіаційних аварій, глобальною техногенною з яких є аварія на Чорнобильській АЕС. На даний час основними дозоутворюючими є радіоізотопи ^{90}Sr і ^{137}Cs (хоча вже минув один період їх напіврозпаду, 29,12 та 30,017 років відповідно), а також в місцях випадання паливних частинок радіоізотоп ^{241}Am (період напіврозпаду 432,2 роки), який утворився з ^{141}Pu (період напіврозпаду 14,38 років), причому, переважно за рахунок внутрішнього опромінення (потрапляють в організм з продуктами харчування і питною водою, значно менше контактним шляхом через шкіру).

Тому залишається необхідність визначення радіометричними методами радіоізотопів різних хімічних елементів.

¹⁹ Кутлахмедов Ю.О., Войціцький В.М., Хижняк С.В. Радіобіологія: підручник. К:ВІПЦ «Київський університет», 2011. 543 с.

ВИСНОВКИ

Екологічна ситуація в Україні залишається тривожною, особливо це пов'язано з триваючою російсько-українською війною, яка наносить згубний вплив на довкілля та його мешканців. Вихід із ситуації, яка склалася в Україні та, зокрема, регіонах, можливий у практичній реалізації ідей сталого еколого-економічного розвитку, пошуку стратегії взаємодії людини з природою для забезпечення стимулювання реалізації сталого розвитку регіонів України.

Оскільки, в найближчі роки неможливо вплинути на структуру існуючого виробництва та його потужності, однак, в перспективі напрями розвитку економіки мають бути спрямовані на збереження довкілля. Ефективне функціонування державної системи моніторингу довкілля забезпечить інформаційні потреби управління в галузі охорони навколишнього природного середовища. Дослідження екологічного стану довкілля (для України це особливо актуально в зв'язку з військовим екоцидом) надає можливість оцінити в динаміці забруднення як природних екосистем, так і агроекосистем.

Кожний із розглянутих аналітичних інструментальних методів якісного і кількісного виявлення забруднювачів довкілля, а також забруднення харчових продуктів і кормів, питної води, має свої особливості, характеризується відмінностями в чутливості, мобільності, точності та можливості автоматизації. Принциповим є поєднання методів у проведенні досліджень, що підвищує їх ефективність. Саме узагальнення відомостей щодо фізичних та фізико-хімічних методів з оцінки хімічного забруднення довкілля дає можливість обрати адекватний метод з урахуванням, насамперед, мети і задач дослідження, наявності необхідної апаратури і матеріалів, висококваліфікованих спеціалістів.

Моніторинг об'єктів довкілля (атмосфери, ґрунту, води, біоти), результати якого слугують обґрунтуванням управлінських рішень по забезпеченню безпеки людей та збереженню біорізноманіття, потребує застосування адекватних чутливих і точних фізичних і фізико-хімічних методів.

АНОТАЦІЯ

Акцентується увага, що забруднення довкілля – це глобальна екологічна проблема, що призводить до трансформації екосистем. Екологічна ситуація в Україні, особливо пов'язана з триваючою російсько-українською війною, потребує пошуку стратегії для забезпечення реалізації сталого розвитку регіонів України. Відмічається необхідність екологізації розвитку України та зменшення навантаження на природні екосистеми для досягнення рівноваги між економічним зростанням регіонів України та довкіллям, забезпечуючи добробут майбутніх поколінь. Стаття присвячена аналізу, із залученням науково-навчальної літератури, аналітичних методів ідентифікації та кількісного

визначення забруднювачів об'єктів довкілля. На даний час при оцінці стану довкілля провідна роль належить фізичним і хімічним методам. Це, насамперед, методи спектрофотометрії в ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоній областях світлового спектру, спектрофлуоресценції, атомно-емісійної та атомно-абсорбційної спектроскопії (особливо для визначення хімічних елементів), мас-спектроскопії, хроматографії, електрохімії та радіометрії. Володіння матеріалом стосовно аналітичних методів дає можливість їхнього вибору при вирішенні задач визначення хімічних забруднювачів довкілля з метою контролю їх безпечності та обґрунтування управлін-ських рішень щодо збереження довкілля та забезпечення безпеки людей.

Література

1. Войціцький В.М., Хижняк С.В., Данчук В.В., Мідик С.В. та ін. Глобальне здоров'я, якість і безпека життя. Довідник-монографія. В 3-х томах. / Під загальною редакцією В.О. Ушкалова. К.: ЦК «Компринт», 2019. 640 с.
2. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>.
3. Жирнов В.В., Савченко Д.А. Біоконверсія відходів: підручник. К.: ДДП «Експо-Друк», 2017. 302 с.
4. Мельничук Д.О., Мельничук С.Д., Войціцький В.М. та ін. Аналітичні методи досліджень. Спектроскопічні методи аналізу: теоретичні основи і методики/за ред. акад. Д.О. Мельничука. Київ: ЦП «Компринт», 2016. 289 с.
5. Войціцький В.М. Хижняк С.В., Грищенко В.А., Томчук В.А., Баранов Ю.С. Аналітичні методи досліджень. Хроматографічні та електрофоретичні методи аналізу: теоретичні основи й методики: навчальний посібник. К.: ЦП «Компринт», 2017. 268 с.
6. Войціцький В.М., Стародуб М.Ф., Хижняк С. В. Аналітичні методи досліджень. Електрохімічні методи аналізу: теоретичні основи і методики: навчальний посібник. К.: ЦП «Компринт», 2017. 232 с.
7. Войціцький В.М., Корнієнко В.І., Хижняк С.В., Самкова О.П., Вишнівський П.С., Альтанова А.Б. Аналітичні методи досліджень сировини і харчових продуктів (спектрофотометричні, хроматографічні, електрохімічні, електрофоретичні, імунологічні): посібник. К. : Видавництво «Наукова столиця», 2024. 260 с.
8. Військова токсикологія, радіобіологія та медичний захист: підручник/ Ю.М. Скалецький та ін. Тернопіль : В-во Укрмедкнига, 2003. 362 с.
9. Войціцький В.М., Хижняк С.В., Мідик С.В., Сисолятин С.В., Коверсун І.В. Застосування моделювання для прогнозування міграції екотоксикантів наземними і водними екосистемами: науково-практичні

рекомендації для установ України екологічного профілю. К. : РВВ НУБіП України, 2019, 31 с.

10. Васильченко Л.С. Еколого-економічні аспекти сталого розвитку регіону. *Науковий вісник Херсонського державного університету*. Вип.11. Ч.1. 2015. С.100-103.

11. Корнієнко В.І. Хижняк С.В., Мідик С.В., Дзядевич І.В., Войціцький В.М. Визначення поліциклічних ароматичних вуглеводнів спектрометричними та хроматографічними методами: методичні рекомендації. К. : Видавництво «Наукова столиця», 2023. 71 с.

12. Войціцький В.М., Стародуб М.Ф., Хижняк С.В., Мідик С.В., Слива Ю.В., Корнієнко В.І. Безпека. Методи контролю важких металів у довкіллі та сільськогосподарській продукції: навчальний посібник/ за ред. В.І. Корнієнко. К. : Прінтеко, 2022. 253 с.

13. ДСТУ 7147:2010. Якість води. Визначення масової концентрації перхлорат – іонів фотометричним методом.

14. Клісенко М.А., Александрова Л.Г., Демченко В.Ф., Макаруч Т. Л. Аналітична хімія залишкових кількостей пестицидів: навч. посібник / К. : Ін-т екології і токсикології ім. Л.І.Медведя, 1999. 238 с.

15. Кутлахмедов Ю.О., Войціцький В.М., Хижняк С.В. Радіобіологія: підручник. К. : ВПЦ «Київський університет», 2011. 543 с.

Information about the authors:

Khyzhnyak Svitlana Volodymyrivna,

Doctor of Biological Sciences, Professor
Leading Researcher at the Ukrainian Laboratory
of Quality and Safety of Agricultural Products

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

Samkova Oksana Petrivna,

Senior Researcher at the Ukrainian Laboratory of Quality
and Safety of Agricultural Products

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

Voitsitskiy Volodymyr Mikhaylovych,

Doctor of Biological Sciences, Professor,
Leading Researcher at the Ukrainian Laboratory of Quality and Safety
of Agricultural Products

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