

УДК 543.544:641/642-047.44

<https://doi.org/10.37827/ntsh.chem.2025.78.069>

Тетяна САВЧУК, Світлана КОРОЛЬЧУК

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ХРОМАТОГРАФІЇ В АНАЛІЗІ ВОДИ ТА ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ

*Волинський національний університет імені Лесі Українки,
проспект Волі, 13, 43025 Луцьк, Україна
e-mail: savchuk.tanja@vnu.edu.ua*

Розглянуто класифікацію методів хроматографічного аналізу. Обґрунтовано застосування хроматографічних методів для аналізу води та продуктів харчування. Описано застосування хроматографічних методів аналізу для визначення мікрокількостей металів у воді. З'ясовано, що найчастіше використовують для аналізу важких металів у воді метод іонної та оберненофазової хроматографії. Дослідження харчової продукції виконують за допомогою іонної хроматографії при аналізі радіоактивних компонентів. Визначення пестицидів у харчових продуктах та об'єктах навколишнього середовища проводять за допомогою: газової хроматографії, що допомагає визначати леткі неполярні пестициди та рідинної хроматографії, де визначаються пестициди середньої полярності. Іонна хроматографія дає змогу визначати також високополярні аніонні пестициди. Є багато сполук, де потрібно застосовувати одночасно два методи аналізу

Keywords: хроматографія, методи аналізу, важкі метали, пестициди, гранично допустима концентрація.

В аналізі об'єктів аналіз води та продуктів харчування займає одне з перших місць. Оскільки людина є споживачем, то стан здоров'я напряму залежить від стану довкілля, від складу тієї самої води та продуктів харчування. Не завжди стан довкілля та продукти харчування відповідають стандартам і нормам, що також негативно впливає на нормальне функціонування всіх живих організмів. Варто врахувати те, що вода різних типів і харчові продукти мають свої особливості: нестабільний різноманітний склад, висока мінералізація, низька концентрація визначуваних компонентів. Особливо важливо визначати компоненти, наявність яких небажана або неприпустима. Для цього існують різні методи аналізу, за допомогою яких визначають точний хімічний склад води та харчових продуктів. Такий підхід дає змогу контролювати їхню якість і дбати про здоров'я споживачів. Серед таких методів є хроматографічні методи аналізу. Адже основа цих методів – це різноманітні фізичні та хімічні процеси, які дають змогу вирішувати складні завдання розділення і визначення досить малих кількостей концентрацій близьких за хімічними властивостями речовин

Мета праці – огляд літературних джерел останніх десятиліть щодо використання хроматографічних методів аналізу у продуктах харчування та води.

Результати аналізу літературних джерел

Історія хроматографічного аналізу

Засновником хроматографічного аналізу вважають ботаніка Михайла Цвета. Він вперше описав хроматографію як метод розділення пігментів рослин (хлорофілу, каротиноїдів) шляхом адсорбції на колонці з крейди та кальцій карбонату. Він використовував ефірні та спиртові розчини для елюювання компонентів. У подальшому такий підхід запропонували для хроматографічного розділення складних сумішей газуватих речовин, а також для розділення розчинних сполук у тонкому шарі адсорбенту. Упродовж кількох десятиліть хроматографічні методи не отримували широкого визнання, але в 1941 році британські вчені Арчер Мартін і Річард Сіндж винайшли розподільну хроматографію та заклали теоретичні основи розділення сумішей за розчинністю компонентів у двох фазах. За це вони отримали Нобелівську премію з хімії 1952 року [1–3].

Ера газової та рідинної хроматографії припадає на 50–70-ті роки XX століття. У 1950 році з'явилася газова хроматографія, яка давала змогу аналізувати леткі сполуки. 1960 рік став розвитком тонкошарової хроматографії та рідинної колонкової хроматографії. У 1970 році створили вискоєфективну рідинну хроматографію (ВЕРХ), що допомогло аналізувати складні об'єкти. Розвиток сучасної хроматографії припадає на 1980–2020 роки й дотепер. Розвиток мас-спектрометрії дозволив поєднати її з хроматографічними методами (ГХ-МС, ВЕРХ-МС) [4–6].

Класифікація хроматографічних методів аналізу

Газова хроматографія

Газова хроматографія – один із найефективніших і найпоширеніших методів розділення та визначення хімічних сполук, зокрема летких і напівлетких, що перебувають в газоподібному та пароподібному станах. Висока роздільна здатність, висока чутливість, хороша відносна точність, можливість автоматизації та невелика кількість досліджуваної проби дає підстави використати і застосувати цей метод у харчовій промисловості для визначення: ароматизаторів і консервантів, пестицидів і хімічних добавок, жирів і органічних забруднювачів. В аналізі води газова хроматографія допомагає визначити: органічні забруднювачі (наприклад, пестициди, бензен, феноли), леткі органічні сполуки [1–3, 8].

Рідинна хроматографія

Рідинна хроматографія – це метод, який застосовують для аналізу розчинних у воді сполук. Це найпоширеніший метод для аналізу: вмісту вітамінів, амінокислот, кофеїну, антиоксидантів у харчових продуктах, цукрів і органічних кислот, наркотичних речовин, пестицидів, токсинів. У водному аналізі вискоєфективну рідинну хроматографію використовують для визначення: мікроорганізмів, забруднювачів (наприклад, феноли, ароматичні сполуки), металів і їхніх сполук, наприклад, важких металів у воді [1, 7–8].

Іонна хроматографія

Переважає більшість неорганічних і певна частина органічних сполук у водних розчинах дисоціює в розчині з утворенням катіонів, аніонів, комплексних іонів. Для їхнього розділення застосовують сорбенти, які мають здатність до обміну на інші йони, що є в розчині. Йонну хроматографію використовують для аналізу йонних сполук, таких як: харчові добавки, органічні та неорганічні аніони, катіони. Водний аналіз з використанням іонної хроматографії дає змогу визначати: рівень

аніонів, таких як хлориди, сульфати, нітрати та фториди, токсичні метали та їх іонні форми [1–3, 7].

Тонкошарова хроматографія

Тонкошарова хроматографія більш проста та менш дороговартісна, але все ще корисна для попереднього аналізу. Її застосовують для: аналізу жирів, харчових барвників і консервантів, швидкої ідентифікації пестицидів, антибіотиків у продуктах харчування. В аналізі води може використовуватися для визначення органічних забруднювачів, таких як пестициди та хімічні добавки [3, 7].

Обґрунтування застосування хроматографічних методів аналізу у воді та продуктах харчування

На виробництвах сучасного рівня для контролю якості сировини і води зі збільшенням кількості об'єктів аналізу, різноманітних за складністю і специфічними властивостями та необхідність визначення в них одночасно багатьох компонентів постійно ставиться завдання удосконалення існуючих і розроблення нових хроматографічних методів.

Для контролю природних вод і продуктів харчування потрібно враховувати рівень гранично допустимої концентрації аналітів. Багато методик визначень повинні задовольняти вимогу, що аналіз можна проводити на рівні $\frac{1}{2}$ гранично допустимої концентрації [9]. Якщо проаналізувати, то сьогодні в Україні у водах різного типу міститься півтори тисячі сполук, а це означає, що повинна бути така ж кількість методик. Реально такої кількості методик немає, на додачу вони можуть бути застарілі. Тому важливо обирати метод аналізу для масового контролю відібраних проб. Виникає потреба залучати так звані оглядові методи аналізу [1, 10]: газової, високоефективної рідинної й надкритичної флюїдної хроматографії, хромато-мас- і хромато-ІЧ-Фур'є-спектрометрії, атомно-емісійної спектрометрії і мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою, рентгенофлуоресцентної спектрометрії та радіометрії. Фахівець повинен обґрунтувати вибраний ним метод аналізу, щоб було технічно й економічно вигідно. Наприклад недоцільно використовувати дорогу хромато-мас-спектрометрію для визначення порівняно високих концентрацій речовин; через високу вартість аналізу цей метод доцільно використовувати лише для визначення найбільш небезпечних речовин з дуже низькими ГДК.

Визначення вмісту токсичних речовин у воді хроматографічними методами

Проблема забруднення довкілля важкими металами є серйозною загрозою для здоров'я людини та екосистем. Урбанізація та промислове виробництво значно підвищують концентрацію токсичних металів у воді, повітрі та ґрунті, що призводить до накопичення цих речовин в організмах людей і тварин. Основними джерелами забруднення важкими металами є промислові викиди – металургія, хімічна промисловість, виробництво батарейок, електроніки; автотранспорт – димові гази, зношування гальмівних колодок, шин; сільське господарство – використання пестицидів, гербіцидів, фосфатних добрив; побутові відходи – електроніка, пластмаси, батарейки, фарби; стічні води – скиди з підприємств, каналізаційні води міст. Основні шляхи потрапляння в організм: вживання забрудненої води та їжі (особливо морепродуктів, рису, овочів); вдихання забрудненого повітря (пил, промислові гази); контакт із забрудненим ґрунтом (через шкіру або при вирощуванні продуктів на забруднених територіях). Як бачимо, що вплив важких металів на організм людини має накопичувальну дію, а з цього випливає, що навіть мінімальні дози можуть спричинити серйозні захворювання у разі постійного

контакту. Тому моніторинг довкілля та заходи зменшення їхнього впливу вкрай важливі для здоров'я населення та екології.

Цікаво дослідити, які методи та види хроматографічного аналізу застосовують для багатоелементного визначення мікрокількостей металів у воді. Автори [11] пропонують атомно-адсорбційний метод аналізу для визначення Cd, Co, Cu, Fe, Ni, Pb у морській воді. Межа визначення становить 3–20 нг/дм³. Використовують метод атомно-емісійний з індуктивно-зв'язаною плазмою, він дозволяє визначати Al, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Sn, V, Zn у природній воді з межею виявлення 0,03–4,8 мкг/дм³ та рентгено-флуоресцентний аналіз визначають Ag, Cr, Cu, Fe, Hg, Mo, Ni, Pd, V, Zn, Zr, також для визначення Cd, Co, Cr(III), Cu, Mn(II), V(VI), Zn у морській воді використовують нейтронно-активаційний аналіз межа визначення 5–300 нг та іскрову мас-спектрометрію для визначення металів Cd, Co, Cu, Fe, Ni, Pb, V, Zn нг/см³ [12]. Для визначення Cd, Co, Cu, Bi, Pb у природній воді використовують інверсійну вольтамперометрію з межею визначення 0,1–20 мкг/дм³ [13].

Серед хроматографічних методів аналізу найчастіше використовують іонну хроматографію для визначення Cu, Co, Zn, Cd, Fe(II, III), Mn(II) у стічних водах з межею виявлення 15–45 мкг/дм³ [14]. Відомий також метод оберненофазової хроматографії. Межа визначення такого методу 0,5–10 мкг/дм³ при аналізі природних вод [15], у питній воді цим методом можна визначити Cu, Co, Pb, Hg з межею визначення 0,2–2 нг [16], а у стічних водах визначають Cd, Cu, Co, Pb, Ni, Hg із межею визначення 2–10 нг [17]. Відомий метод оберненофазової високоефективної рідинної хроматографії з діетилдитіокарбамінатів для одночасного визначення Кадмію, Кобальту, Купруму, Меркурію, Ніколу, Плюмбуму та Цинку в різних типах вод. Метод передбачає попереднє екстракційне концентрування мікроелементів у вигляді діетилдитіокарбамінатних комплексів після ультрафіолетового опромінення проб у присутності калій персульфату й одночасне визначення згаданих мікроелементів методом оберненофазової високоефективної рідинної хроматографії. Межа визначення 50 нг цього методу. Визначенню не заважають Хром, Манган, Ферум. Метод достатньо простий, експресний, забезпечує високу селективність, точність і чутливість визначення [18]. Основні кроки у проведенні хроматографічних визначень за різними методиками у природних і стічних водах наведено у табл. 1.

У таблиці наведено порівняльну характеристику сучасних хроматографічних методів визначення йонів важких металів у різних типах вод – стічних, природних і питних. Методи охоплюють іонну хроматографію (ІХ) та високоефективну рідинну хроматографію (ВЕРХ) у поєднанні з попередньою хімічною модифікацією аналітів. Зазначено типи цільових аналітів (іони металів), специфіку досліджуваної матриці, межу виявлення (яка демонструє чутливість методу), а також основні аналітичні кроки, що забезпечують точне й селективне визначення.

Зокрема: йонна хроматографія дає змогу визначати метали в середньому концентраційному діапазоні (15–45 мкг/дм³) з використанням амоній-ацетатного елюенту та провіднісної або ICP-OES детекції [14]. RP-HPLC з хелатоутворенням за участю APDC забезпечує надзвичайно низькі межі виявлення (до 0,2 нг/дм³) та підходить для аналізу навіть слідових концентрацій металів у воді після попередньої твердофазової екстракції (SPE) [15–17]. RP-HPLC з QAMDHB (реакція з утворенням тіокарбамідних комплексів) є чутливим методом для широкого спектра металів і забезпечує межі виявлення на рівні ~50 нг/дм³ після фотоокиснення з

калій пероксодисульфатом [18]. Наведені методи мають значення для моніторингу якості води, виявлення техногенного забруднення та забезпечення санітарно-хімічного контролю.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика хроматографічних методів аналізу у природних і стічних водах

Table 1

Comparative Characteristics of Chromatographic Methods for Analyzing Natural and Wastewater

Метод	Аналіти	Матриця	Межа виявлення	Основні кроки
Іонна хроматографія [14]	Cu, Co, Zn, Cd, Fe(II, III), Mn(II)	Стічні води	15–45 мг/дм ³	Фільтрація, елюент NH ₄ -ацетат, детекція: провідність або *ICP-OES
*RP-HPLC + APDC [15–17]	Cu, Co, Ni, Cd, Pb, Hg, Zn	Природна, питна, стічна	0,2–10 нг/дм	Хелатоутворення (з APDC), *SPE, UV-опромінення, RP-*HPLC (колонка Waters Xterra)
*RP-HPLC + QAMDNB [18]	Cd, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	Природна, стічна, питна	~50 нг/дм ³	УФ-опромінення з K ₂ S ₂ O ₈ , утворення DTC-комплексів, RP-HPLC

*RP-HPLC + APDC Високоєфективна рідинна хроматографія в оберненій фазі з використанням амоній піролідиндітокарбамату

*RP-HPLC + QAMDNB Високоєфективна рідинна хроматографія в оберненій фазі з використанням кватернерне похідне амінометилдихідрооксибензолу

*ICP-OES Індуктивно зв'язана плазма – оптична емісія S

*SPE твердофазна екстракція

*HPLC Зворотно-фазова високоєфективна рідинна хроматографія

Визначення вмісту токсичних речовин у продуктах харчування хроматографічними методами

Дослідження харчових продуктів з метою контролю їх якості та безпеки є однією з найважливіших задач у технологіях харчування. Останнім часом виробники, щоб розширити ринки збуту безперервно збільшують номенклатуру харчових продуктів, змінюють рецептуру їх приготування, зовнішній вигляд, використовують перспективні з їхнього погляду види сировини, розробляють нові типи харчових продуктів. Це призводить до суттєвої зміни складу сучасних продуктів, де виникає потреба визначати вміст консервантів, штучних барвників і ароматизаторів, важких металів, пестицидів, радіоактивних ізотопів, патогенних мікроорганізмів, канцерогенних вуглеводнів та інших. Небезпеку створюють токсичні речовини та патогенні мікроорганізми. До них належать важкі метали, радіонукліди, мікотоксини, пестициди, нітрати й інші хімічні сполуки, кількість яких постійно збільшується [30–33]. Тому інформація про вміст шкідливих речовин у харчових продуктах має важливе значення.

Дослідження харчової продукції виконують за допомогою великої кількості методів, які поділяють залежно від вибраних для вимірювань властивостей речовин і застосовного обладнання на групи: хімічні, біохімічні, електрохімічні, оптичні, резонансні, термічні, хроматографічні, спектральні, реологічні [19]. Кожна з названих вище груп охоплює кілька конкретних видів аналізу. Поряд із існуванням стандартизованих методів аналізу, виникають нові методи дослідження, такі як

адсорбційна мас-спектрометрія та емісійна спектроскопія, йонна хроматографія, ядерний магнітний резонанс, електронна мікроскопія. Створюються сучасніші прилади, спеціалізовані датчики, збільшується кількість контрольно-вимірювальної апаратури. Аналіз літератури дає змогу зробити висновок, що хроматографічні методи аналізу досить чутливі, точні й експресні.

Визначення радіоактивності у харчових продуктах. Дослідження вмісту радіоактивних елементів у продуктах харчування розглянемо на прикладі визначення стронцію-90 у сухому молоці. Для аналізу згідно з [20] використовують іонообмінну хроматографію, де для початку аналізу зразок озолують, а потім елюють зразок і на виході вилучають Sr-90 понад 90%. Для визначення важких металів, згідно з [21], використовують рухому фазу, яка складалася з PDCA, натрій ацетату, ацетатної кислоти та аскорбінової кислоти при pH 4,3.

Основними забруднювачами води та продуктів харчування вважають пестициди. Для моніторингу їхньої кількості головну роль відіграють хроматографічні методи аналізу. Позаяк хімічні та фізичні властивості пестицидів дуже різняться, то немає єдиного універсального методу аналізу. Тому, залежно від фізико-хімічних властивостей, молекули пестицидів, аналіз його вмісту у харчових продуктах та об'єктах навколишнього середовища проводять за допомогою: газової хроматографії, яка допомагає визначати легкі неполярні пестициди; рідинної хроматографії – визначаються пестициди середньої полярності; йонна хроматографія дає змогу визначати високополярні аніонні пестициди. Існують сполуки, які одночасно аналізують двома методами. Визначення пестицидів розглянемо на дослідженні регулятора росту хлормекват-хлориду 750, який застосовують для запобігання вилягання посівів зернових культур від BASF. Хлормекват хлоридний технічний концентрат, згідно з [22], розчиняють у воді та визначають іонною хроматографією на катіонообмінній колонці на основі кремнезему. Визначення та ідентифікація мікотоксинів, зокрема визначення моніліформіну в кукурудзі проводять методом іонної хроматографії. Змішаний зразок кукурудзи, згідно з [23], екстрагують на ротаційному перемішувачі зі швидкістю (170 об/хв) протягом 30 хв. Досліджуючи мікотоксини таким методом, можна отримати повну йонну хроматограму очищеного екстракту з природно забрудненого зразка кукурудзи. Концентрація моніліформіну, визначена за допомогою йонної хроматографії, становить приблизно 0,94 мг/кг.

Для вилучення залишкових кількостей пестицидів із продуктів харчування запропонували метод твердофазової екстракції для визначення залишків пестицидів, антибіотиків, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, поліхлорованих дифенілів та інших сполук у продуктах харчування (QuEChERS) (швидкий, простий, дешевий, ефективний, надійний і безпечний) – це метод підготовки проб, який широко використовується для виділення пестицидів та інших забруднювачів у харчових продуктах перед хроматографічним аналізом) із подальшим очищенням дисперсною твердофазною екстракцією (dSPE) (твердофазна екстракція). Базуючись на його основі, ISO EN 15662:2018 описує модульний метод пробопідготовки та аналізу продуктів харчування рослинного походження методом газової хроматографії, газової хромато-мас-спектрометрії або високоефективної рідинної хроматографії мас-спектрометрії [26]. У праці [24] розглянуто основні принципи та стадії методу підготовки проб (QuEChERS), проаналізовано можливості використання методу (QuEChERS) для підготовки проб щодо визначення поліхлорованих біфенілів у харчових продуктах за допомогою поєднання капілярної газової хроматографії з мас-спектрометрією високої роздільної здатності. Також автори запропонували

алгоритм процедури екстракції поліхлорованих біфінілів з проб риби і рибних продуктів з використанням методу (QuEChERS) для подальшого визначення в них діоксиноподібних поліхлорованих біфінілів – орто-незаміщених і моно-орто-заміщених поліхлорованих біфінілів за допомогою сполучення капілярної газової хроматографії з мас-спектрометрією високої роздільної здатності [24–25, 27–28].

У сучасній аналітичній практиці для визначення залишкових кількостей пестицидів, важких металів і мікотоксинів у харчових продуктах активно використовують багатокомпонентні методики, зокрема модифікований підхід QuEChERS. В останні роки спостерігається зростання інтересу до варіантів методу з розширеним застосуванням очищення сорбентами PSA (Первинний Вторинний Амін), C18 (силілований силікон), GCB (Графітізований вуглецевий чорний), а також включенням криогенної обробки, що допомагає адаптувати підхід до складних харчових матриць, таких як молочна продукція чи олії [34].

Зокрема, в оглядовій роботі Сантана-Майор (Santana-Major) і співавторів [34] наведено аналіз понад 50 досліджень, в яких доведено високу ефективність QuEChERS у поєднанні з газовою та рідинною хроматографією, чутливістю до рівнів менше 10 нг/г [34]. Подібні результати підтверджені також у дослідженнях автора Смітерс (Smithers) [35], де методика успішно адаптована до продуктів бджільництва з високим вмістом білкових і жирних домішок [35].

Для виявлення йонних забруднювачів – наприклад, залишків перхлоратів, фосфорорганічних сполук – застосовують іонну хроматографію з мас-спектрометрією (IC-MS), яка забезпечує межі виявлення на рівні нг/л і дає змогу працювати з високополярними аналітами [36]. Це особливо актуально при оцінці токсикологічної безпеки продуктів дитячого харчування або напоїв.

У табл. 2 наведено порівняльну характеристику основних хроматографічних методів, які застосовують для аналізу харчових продуктів і стічних вод. Подано п'ять найпоширеніших методів: газову хроматографію (ГХ), високоефективну рідинну хроматографію (ВЕРХ), іонну хроматографію (ІХ), тонкошарову хроматографію (ТСХ) і комбінований метод хромато-мас-спектрометрії. Порівняння охоплює принцип дії кожного методу, основні сфери його застосування, ключові переваги й обмеження. Також зазначено приклади сучасних наукових досліджень, в яких описані відповідні методи. Ці дані дають підстави зробити висновки щодо доцільності використання конкретного хроматографічного підходу залежно від типу зразка, цілей аналізу та вимог до точності й чутливості.

Зокрема, для аналізу летких органічних речовин у харчових продуктах і воді доцільно використовувати газову хроматографію, тоді як для іонів у водному середовищі ефективною є йонна хроматографія. ВЕРХ демонструє універсальність щодо органічних сполук різної полярності, а хромато-мас-спектрометрія забезпечує максимальну точність для слідових концентрацій. Тонкошарова хроматографія залишається доступним методом для первинного скринінгу.

Висновки

Аналіз літературних джерел по методах хроматографічного аналізу виявив, що завдяки своїй високій точності, чутливості і універсальності хроматографія є незамінним методом аналізу в різних сферах – від харчової промисловості до екологічного моніторингу. Постійний розвиток цього методу сприяє поліпшенню якості продукції, збереженню здоров'я людей і захисту довкілля [21–37].

Таблиця 2

**Порівняльна характеристика хроматографічних методів аналізу
у продуктах харчування та стічних водах**

Table 2

**Comparative Characteristics of Chromatographic Methods for Analysis
in Food Products and Wastewater**

Метод хроматографії	Принцип роботи	Область застосування	Переваги	Обмеження	Приклади сучасних досліджень
Газова хроматографія (ГХ)	Розділення летких сполук у газовій фазі	Аналіз летких органічних сполук, пестицидів, ароматизаторів у харчових продуктах і воді	Висока роздільна здатність, чутливість, автоматизація	Потребує летких або леткозамінних аналітів	[27, 34]
Високоєфективна рідинна хроматографія (ВЕРХ)	Розділення розчинних у воді речовин у рідкій фазі	Аналіз вітамінів, амінокислот, пестицидів, токсинів у харчових продуктах і воді	Широка сфера застосування, чутливість	Складність підготовки проб	[34–35]
Іонна хроматографія (ІХ)	Розділення йонів на основі їхньої взаємодії з іонообмінником	Визначення аніонів (NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) та катіонів (Na^+ , K^+ , важкі метали) у воді та продуктах	Висока селективність для йонів	Не придатна для нелетких або нейтральних сполук	[22, 37]
Тонкошарова хроматографія (ТШХ)	Розділення суміші на тонкому шарі сорбенту	Попередній скринінг пестицидів, барвників, консервантів у харчових продуктах	Проста, недорога, швидка	Низька точність і роздільна здатність	[23–24]
Хромато-мас-спектрометрія	Комбінований метод хроматографії та мас-аналізу	Визначення слідових кількостей токсичних сполук у воді, продуктах	Висока точність, чутливість до низьких концентрацій	Висока вартість обладнання	[25, 34]

ЛІТЕРАТУРА

1. *Minaieva V. O.* Chromatographic Analysis. – Cherkasy: Vyd. vid. ChNU imeni Bohdana Khmelnytskoho, 2013. 284 p. (in Ukrainian).
2. *Skoog D.A., Holler F.J., Crouch S.R.* Principles of instrumental analysis – Belmont: Brooks/Cole, 2017. 672 p.
3. *Felinger A., Felinger A. Jr.* Advances in chromatography and mass spectrometry. – Amsterdam: Elsevier, 2020. 432 p.

4. *Beyer, L.* Chromatography. Fundamentals and Applications of Chromatography and Related Differential Migration Methods. – Hoboken: Wiley, 2013. 430 p.
5. *Snyder L.R., Kirkland J.J., Dolan J.W.* Introduction to modern liquid chromatography. – Hoboken: Wiley, 2011. 528 p.
6. *Gross M.L.* Mass spectrometry: a textbook. – Berlin : Springer, 2017. 606 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54398-7>.
7. *Fedorchenko S. V.* Chromatographic analysis method. Prykarp. nats. un-t im. V. Stefanyka, 2012. 146 s. (in Ukrainian).
8. *Ettre, L.S.* Chapters in the Evolution of Chromatography. Imperial College Press, 2008. 520 p. <https://doi.org/10.1142/p529>.
9. *Honcharuk V.T.* Water Chemistry and Water Treatment. – Kyiv: Naukova Dumka, 2016. 432 p. (in Ukrainian).
10. *Shvaika O.L.* Analytical Methods for Food Quality Control. – Lviv: vydavnytstvo LNU, 2020. 240 p. (in Ukrainian).
11. *Batterham G., Munksgaard N., Parry D.* Determination of Metals in Seawater by Inductively Couplet Plasma Mass Spectrometry After Off-line Dithiocarbamate Solvent Extraction. J. Anal. Atomic Spectrometry. 1997. Vol. 12. P. 1277–1280. <https://doi.org/10.1039/a704309k>.
12. *Vakh I., Podtynnykh V., Andriieva O., Bakulin O.* Neutron Activation Analysis (NAA) Based on a Research Reactor DR-100. Lviv: Visnyk Lviv Univ. Ser. Fiz. 2009. Vol. 44. P. 294–299. (in Ukrainian).
13. *Snytynskyi V. V., Khirivskyi P. R., Hnativ P. S.* Ecotoxicology. Kherson: Oldi-plus, 2011. 330 p. (in Ukrainian).
14. *Michalski R.* Ion Chromatography Applications in Wastewater Analysis. Separations. 2018. Vol. 5(1). P. 16–28. <https://doi.org/10.3390/separations5010016>.
15. *Hu, Q., Yang, G., Zhao, Y. & Yin, J.* Determination of copper, nickel, cobalt, silver, lead, cadmium, and mercury ions in water by solid-phase extraction and the RP-HPLC with UV-Vis detection. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2003. Vol. 375(6). P. 831–835. <https://doi.org/10.1007/s00216-003-1828-y>.
16. *Hu Q., Yang G., Yang J., Yin J.* Study on determination of iron, cobalt, nickel, copper, zinc and manganese in drinking water by solid-phase extraction and RP-HPLC with 2-(2-quinolinylazo)-5-diethylaminophenol as precolumn derivatizing reagent. J. Environ. Monit. 2002. Vol. 4. P. 956–959. <https://doi.org/10.1039/B204874B>.
17. *Hu Q., Yang G., Yin J.* Determination of trace lead, cadmium and mercury by on-line column enrichment followed by RP-HPLC as metal-tetra-(4-bromophenyl)-porphyrin chelates. Talanta. 2002. Vol. 57(4). P. 751–756. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(02\)00096-6](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00096-6).
18. *Hutchins S.R., Haddad P.R., Dilli S.* Reversed-phase high-performance liquid chromatography of diethyldithiocarbamate complexes using radial compression columns. Analytical Chemistry. 1999. Vol. 71(2). P. 185–192. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)88410-7](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)88410-7).
19. *Polumbryk M. O., Osypenkova I. I., Kotliar Ye. O.* Physicochemical Methods for Food Product Research. Cherkasy-Odesa-Kyiv: Lohos, 2019. 188 p. (in Ukrainian).
20. *Cobb J., Warwick P., Carpenter R., Morrison R.* Determination of strontium-90 in milk samples using a controlled precipitation clean-up step prior to ionchromatography. Science of The Total Environment. 1995. Vol. 173–174. P. 179–186. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04777-8](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04777-8).
21. *Fredrikson M., Carlsson N., Almgren A., Sandberg A.* Simultaneous and Sensitive Analysis of Cu, Ni, Zn, Co, Mn, and Fe in Food and Biological Samples by Ion Chromatography. Journal Agric Food Chem. 2001. Vol 50. P. 59–65. <https://doi.org/10.1021/jf010792w>.

22. *Gangal N.D., Bondre S.S., Ramanathan P.S.* Determination of some pesticides and intermediates by ion chromatography. *Journal of Chromatography A*. 2000. Vol. 884. P. 243–249. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(00\)00305-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)00305-8).
23. *Kandler W., Nadubinska M., Parich A., Krska R.* Determination of moniliformin in maize by ion chromatography. *Anal Bioanal Chem*. 2002. Vol. 374. P. 1086–1090. <https://doi.org/10.1007/s00216-002-1565-7>.
24. *Chmil V. D., Holokhova O. V., Vidrin D. Yu., Kalashnikov A. A.* Prospective Use of the Method KETCHERS (QuEChERS) for Assessing Toxicological Safety of Food Products. *Problemy kharchuvannia*. 2016. Vol. 2. P. 69–74. (in Ukrainian).
25. *Chamrasem N., Lee S., Harmon T.* Analysis of 19 PCB congeners in catfish tissue using a modified QuEChERS method with GC-MS/MS. *Food Chem*. 2016. Vol. 192. P. 900–906. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.088>.
26. Isotope-ratio mass spectrometry. URL: (https://en.wikipedia.org/wiki/Isotope-ratio_mass_spectrometry). Date of appeal: 16.06.2025 (in Ukrainian).
27. *Lehotay S., Hajslova J.* Application of gas chromatography in food analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2002. Vol. 23. P. 686–697. [https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(02\)00805-1](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(02)00805-1).
28. Using chromatography to study to study microplastics in food: an interview. URL: (<https://www.chromatographyonline.com/view/using-chromatography-to-study-microplastics-in-food-an-interview-with-jose-bernal>)
29. *Fechner A., Schiller A., Franzke J.* Recent progress in food flavor analysis using GC-IMS coupled to chromatography. *Analytica Chimica Acta*. 2025. Vol. 1358. P. 331–343. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2025.343946>.
30. *Karachov I. I., Fokin V. M., Datsenko V. I.* Current issues of metrological assurance for radiation control of food products. Kyiv: Hihiiena naselenykh mist. 2007. Vol. 50. P. 286–291. (in Ukrainian).
31. *Dubinina A.A., Maliuk L.P., Seliutina H.A., Shaporova T.M., Kononenko L.V., Naumenko V.A.* Toxic substances in food products and methods for their determination. Kyiv: Profesional, 2007. 384 p. (in Ukrainian).
32. Food contaminants: types and harmfulness. URL: <https://osvita.ua/vnz/reports/ecology/21054/> Date of appeal: 26.11.2021 (in Ukrainian).
33. *Chen J., Li Y., Wang M. et al.* Analysis of environmental pollutants using ion chromatography-mass spectrometry: a review of recent progress. *Journal of Chromatography A*. 2023. Vol. 1725. P. 463–480. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2023.463480>.
34. *Santana-Mayor A., Rodríguez-Ramos R.R., Herrera-Herrera A.A.V., Socas-Rodríguez B.* Updated overview of QuEChERS applications in food, environmental and biological analysis *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2023. Vol. 164. 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117375>.
35. 2023 ACS Presentation-Utilizing the QuEChERS sample preparation approach for targeted analysis of pesticides in complex ecotoxicology matrices. URL: <https://www.smithers.com/resources/2023/august/quechers-sample-preparation-analysis-pesticides> Date of appeal: 06.06.2025.
36. *Isah Yusuf Shinkafi, Abubakar Lawal, Nura Suleiman Gwaram, Ahmed Lawal Mashi.* Recent review of the QuEChERS sample preparation method for food and environmental sample analysis. *FJS*. 2024. Vol. 8(6). P. 155–169. <https://doi.org/10.33003/fjs-2024-0806-2957>.
37. *Lai L., Yan F., Chen G., Huang Y., Huang L., Li D.* Recent progress on fluorescent probes in heavy metal determinations for food safety: a review. *Molecules*. 2023. Vol. 28(15). P. 56–89. <https://doi.org/10.3390/molecules28155689>.

SUMMARY

*Tanya SAVCHUK, Svitlana KOROLCHUK***APPLICATION OF CHROMATOGRAPHY METHODS IN THE ANALYSIS OF WATER AND FOOD PRODUCTS**

*Lesya Ukrainka Volyn National University
Voli ave., 13, 43025 Lutsk, Ukraine,
e-mail: savchuk.tanja@vnu.edu.ua*

This paper provides a comprehensive overview of chromatographic analysis methods and their application in the fields of food safety and environmental monitoring. The classification of chromatographic techniques has been reviewed in detail, focusing on their analytical capabilities, sensitivity, and specificity. Special attention is given to the determination of trace amounts of heavy metals and pesticide residues in water and food samples.

Ion chromatography (IC) and reversed-phase high-performance liquid chromatography (RP-HPLC) are highlighted as the most frequently used techniques for detecting heavy metals in aqueous media. These methods offer high sensitivity, selectivity, and compatibility with various detection systems such as conductivity detectors and inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). IC is also effectively used in the analysis of radioactive components in food products, particularly when evaluating environmental contamination.

Gas chromatography (GC), especially when coupled with mass spectrometry (GC-MS), is widely applied for the identification of volatile and non-polar pesticides in food and environmental samples. For moderately polar pesticides, liquid chromatography (LC) is preferred due to its ability to separate a wide range of compounds with different polarities. Highly polar anionic pesticides can be reliably detected using ion chromatography. In some cases, a combination of analytical techniques is required to achieve comprehensive identification and quantification of complex mixtures or co-eluting compounds.

The study emphasizes the significance of chromatographic methods in ensuring compliance with maximum allowable concentration (MAC) standards for hazardous substances in food and water. Their implementation plays a crucial role in protecting public health, supporting regulatory frameworks, and advancing analytical science.

Keywords: chromatography, analytical methods, heavy metals, pesticides, maximum allowable concentration, water analysis, food safety.

Стаття надійшла: 25.03.2025.
Після доопрацювання: 11.06.2025.
Прийнята до друку: 26.09.2025.