

УДК 543.544:661.715.6:574.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.142.1.35>

ХРОМАТОГРАФІЧНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛІЦИКЛІЧНИХ АРОМАТИЧНИХ ВУГЛЕВОДНІВ У КОМПОНЕНТАХ ЕКОСИСТЕМ

Березовський О.В. – к.с.-г.н.,

старший науковий співробітник науково-дослідного відділу моніторингу безпеки продукції агропромислового комплексу Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Мідик С.В. – к.вет.н., ст. дослідник,

завідувач науково-дослідного відділу моніторингу безпеки продукції агропромислового комплексу Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Корнієнко В.І. – д.б.н., професор,

директор Української лабораторії якості і безпеки

продукції агропромислового комплексу,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Хижняк С.В. – д.б.н., професор,

провідний науковий співробітник Української лабораторії якості і безпеки

продукції агропромислового комплексу,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Таран Т.В. – к.вет.н.,

доцент кафедри гігієни тварин і харчових продуктів

імені професора А.К. Скороходька,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Полтавченко Т.В. – к.вет.н., доцент,

завідувач кафедри водних біоресурсів,

Національний університет водного господарства та природокористування

В роботі був проведений порівняльний аналіз існуючих хроматографічних методів, що використовуються для визначення ступеня забруднення поліциклічними ароматичними вуглеводнями (ПАВ) компонентів екосистеми та їх моніторингу у навколишньому середовищі. На основі літературних джерел, що стосуються дослідження ПАВ у зразках води, ґрунту, мулу та повітря, проведено аналіз різних існуючих методів відбору зразків, пробопідготовки та методів їх хроматографічного визначення.

Протягом останніх десятиліть з'явилася велика кількість нових аналітичних методів, інші (більш відомі) методи з часом вдосконалювалися і піддалися окремим модифікаціям з метою збільшення їх ефективності. Серед них методи рідинної хроматографії (HPLC-FLD, HPLC-MS/MS, HPLC-DAD), газової хроматографії (GC-FID, GC-MS). Серед найбільш використовуваних існуючих методів виділення ПАВ із зразків ґрунту та мулу на даний час, є екстракція за допомогою апарату Сокслета і методу прискореної екстракції розчинником (ASE). Для ASE науковці використовували різні розчинники або їх суміші, серед яких: дихлорметан, гексан, метанол, толуол, ацетон або ацетонітрил. Більш сучасний, дешевий і зручний метод QuEChERS у різних модифікаціях досить часто використовують для виділення ПАВ із води, ґрунту, мулу та рослинного матеріалу. У кожного з цих методів існують свої переваги та недоліки, оскільки різні досліджувані ПАВ, хоч і відносяться до одного класу, але вони відрізняються за молекулярною масою та фізичними властивостями, тому створюють деякі обмеження для визначення окремих сполук з використання конкретного методу.

Використання існуючих методів визначення і вимірювання концентрації ПАВ у навколишньому середовищі та їх вдосконалення дає можливість у досить короткі терміни і з використанням максимально дешевих методів оцінити ступінь забруднення окремих екосистем.

Ключові слова: поліциклічні ароматичні вуглеводні, хроматографічні методи, екосистеми.

Berezovskyi O.V., Midyk S.V., Korniyenko V.I., Khyzhnyak S.V., Taran T.V., Poltavchenko T.V. Chromatographic methods for determining polycyclic aromatic hydrocarbons in ecosystem components

The work has carried out a comparative analysis of existing chromatographic methods used to determine the degree of pollution of ecosystem components with polycyclic aromatic hydrocarbons and their monitoring in the environment. Based on literature sources related to the study of PAH in water, soil, silt and air samples, an analysis of various existing methods of sampling, sample preparation and methods of their chromatographic determination has been carried out.

Over the past decades, a large number of new analytical methods have appeared, other (more well-known) methods have been improved over time and have undergone individual modifications in order to increase their efficiency. Among them are chromatographic methods of liquid chromatography (HPLC-FLD, HPLC-MS/MS, HPLC-DAD), gas chromatography (GC-FID, GC-MS). Among the most widely used existing methods for the isolation of PAH from soil and sludge samples at present are extraction using a Soxhlet apparatus and the accelerated solvent extraction (ASE) method. For ASE, various solvents or their mixtures were used, including: dichloromethane, hexane, methanol, toluene, acetone or acetonitrile. A more modern, cheaper and more convenient QuEChERS method in various modifications is often used for the isolation of PAH from water, soil, silt and plant material. Each of these methods has its own advantages and disadvantages, since different PAH under study, although belonging to the same class, differ in molecular weight and physical properties, therefore creating some limitations for the determination of individual compounds using a specific method.

The use of existing methods for determining and measuring concentrations of PAH in the environment and their improvement makes it possible to assess the degree of pollution of individual ecosystems in a fairly short time and using the cheapest methods possible.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons, chromatographic research methods, ecosystem components.

Постановка проблеми. Поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ) – це широко поширені забруднювачі навколишнього середовища, окремі з яких проявляють не тільки загальнотоксичну дію, але є також канцерогенами, мутагенами й тератогенами. Вони, в основному, є продуктами неповного згоряння нафти та вугілля, викидів автомобільних газів, наслідком роботи сміттєспалювальних установок. Часто ПАВ потрапляють з розливами нафти у навколишнє середовище, і як наслідок – в живі організми екосистем [1]. Концентрація ПАВ у навколишньому середовищі сильно відрізняється, залежно від того, наскільки активно території піддаються антропогенному впливу. В десятки разів вищі концентрації ПАВ можуть бути в тих регіонах, де більша кількість населення та знаходяться великі промислові об'єкти ніж в сільській місцевості. У районах, які віддалені від міст або промислової діяльності, концентрації поліциклічних ароматичних вуглеводнів у середовищі відображають його фонове забруднення [2].

Агентством з охорони навколишнього середовища США (ЕРА) було визначено 16 ПАВ, які є пріоритетними забруднювачами із точки зору їх токсичності [3]. Цей перелік став основою для розробки аналітичних методів при визначенні ПАВ у навколишньому середовищі. У цьому списку токсичною сполукою є бенз(а)пірен. Гранично допустима концентрація бенз(а)пірену для ґрунту в Україні регламентується на рівні 0,02 мг/кг [4]. Підтверджено їх токсичний і мутагенний вплив на живі організми за даними багатьох досліджень в різних країнах [5, 6, 7].

Існує безліч різноманітних методів пробопідготовки для виділення поліциклічних ароматичних вуглеводнів із зразків ґрунту, мулу, води та повітря. Окрім методів хроматографії для визначення масової частки ПАВ інколи також використовують електрохімічні та оптичні датчики на основі SERS (Surface-enhanced Raman spectroscopy) [8]. Використання таких методів аналітичної хімії дозволяє оцінити рівень забруднення окремими ПАВ різних компонентів екосистеми та динаміку їх поширення у навколишньому середовищі [9].

Повномасштабні військові дії, що тривають на території України з 2022 року вже спричинили масштабний екоцид, спричинений викидом високотоксичних речовин у середовище, відбулося руйнування окремих екосистем. У середовище потрапили забрудники, серед яких є і поліциклічні ароматичні вуглеводні, які утворюються внаслідок пожеж, спричинених бойовими діями та розливами палива військової техніки, поширюються з руйнуванням екологічно небезпечних підприємств.

Тому нині, використання існуючих методів визначення та вимірювання концентрацій ПАВ у навколишньому середовищі, їх вдосконалення дає можливість у досить короткі терміни і з використанням максимально дешевих методів оцінити ступінь забруднення ними окремих екосистем. Контроль екологічної безпеки вимагає використання різних методів аналізу, правильного відбору зразків для аналізу, підготовки та постановки досліджень, що допомагає отримувати реальну інформацію про стан досліджуваних екосистем [10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Щоб ефективно визначити вміст ПАВ у досліджуваних зразках, екстракт з виділеними поліциклічними ароматичними вуглеводнями повинен бути придатним для аналізу методами рідинної чи газової хроматографії. Для цього проводиться очищення від сполук, які наявні у зразку, що спотворюють виявлення та вимірювання компонентів ПАВ (ефект матриці). Досить давно використовується метод екстракції Сокслета. Він придатний і досить ефективний для виділення ПАВ, але вимагає використання великих об'ємів розчинника і тривалого часу екстракції. Методи очищення за допомогою GPC і силікагелю потребують великої кількості реагентів, розчинників та матеріалів. Менш витратним і досить швидким та ефективним, серед використовуваних на даний час методів є QuEChERS, який був розроблений щоб забезпечити недорого і швидко пробопідготовку аналізу залишків пестицидів у фруктах та овочах [11]. Він придатний також для екстракції ПАВ з ґрунту та рослинного матеріалу з невеликим вмістом ліпідів.

Для визначення ПАВ у воді використовують стандартний метод EN ISO 17993 [12] і багато інших сучасних ефективних методів екстракції на основі різноманітних методів твердофазної екстракції та їхніх модифікацій з використанням нанотехнологій [13].

Існує безліч методів визначення ПАВ в аерозолях з метою оцінки забруднення повітря в окремих екосистемах. Частинки, які розсіяні в досліджуваному повітрі, збирають за допомогою мембран з нітрату целюлози кварцевих волокнистих фільтрів, спеціальних приладів, що працюють за принципом пиловловлювача циклонного типу [14].

Нині досить великої популярності набувають сучасні методи оцінки хімічного забруднення та змін в екосистемах за допомогою алгоритмів машинного навчання, що дають можливість визначити і в подальшому передбачити з певною ймовірністю динаміку поширення цих речовин у досліджуваних екосистемах [15].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. В роботі проведена порівняльна характеристика

основних методів хроматографічного визначення ПАВ у навколишньому середовищі та методів пробопідготовки зразків. Також запропоновані швидкі і зручні методи для пробопідготовки зразків ґрунту та екстракції з них ПАВ.

Постановка завдання. Метою роботи є порівняння різних методів екстракції ПАВ та ефективності їх хроматографічного визначення в екосистемах, отриманих із зразків ґрунту, мулу, води та повітря. В основі цих досліджень покладено аналіз та систематизацію науково-обґрунтованих відомостей стосовно моніторингу забруднення поліциклічними ароматичними вуглеводнями у навколишньому середовищі за допомогою хроматографічних методів аналізу.

Виклад основного матеріалу. Постійна присутність ПАВ у навколишньому середовищі зумовлена неповним спалюванням органічних відходів [16]. Більшість ПАВ надзвичайно шкідливі, канцерогенні та мутагенні [17]. Ще одна досліджена характеристика ПАВ полягає у тому, що вони залишаються в навколишньому середовищі протягом тривалих періодів часу [18]. Напрями їх переміщення в окремих компонентах екосистем зображені на Рис. 1 [19].

Нині використовується велика кількість різноманітних методів пробопідготовки, методів рідинної та газової хроматографії для визначення ПАВ у зразках ґрунту, води, мулу та повітря. Серед них методи рідинної хроматографії (HPLC-FLD, HPLC-MS/MS, HPLC-DAD), газової хроматографії (GC-FID, GC-MS) [20].

Досить поширеними методами для хроматографічного визначення ПАВ є метод рідинної хроматографії з флуоресцентним детектуванням або діодно-матричним (ультрафіолетовий діапазон детектування). Із рекомендованих для визначення організацією EPA 16 ПАВ, чутливість флуоресцентного детектора до ацетанфтилену є низькою. Тому його краще визначати за допомогою діодно-матричного детектора, хоча HPLC-FLD є значно чутливішим [21]. Це варто враховувати для вибору потрібного методу хроматографічного визначення ПАВ у зразках.

З метою визначення ПАВ у воді використовують, окрім стандартного методу, EN ISO 17993 [12], методи пробопідготовки: LLE (рідинно-рідинна екстракція) [22], SPE (твердофазна екстракція) [3]. Також для цього використовують удосконалені методи твердофазної екстракції за допомогою нанотехнологій на прикладі модифікованих СТАВ- TiO_2 нанотрубок, які дають можливість збільшити ефективність виділення ПАВ і значно зменшити ефект матриці від інших компонентів, що зазвичай присутні у зразках води, отриманих з досліджуваних водойм [24]. Також для виділення ПАВ з води використовують магнітний нанокompозит оксиду графену, модифікований поліаніліном [25]. Досить високу ефективність виділення ПАВ із зразків води продемонстрував QuEChERS з використанням ENVI-Carb [24].

З метою визначення ПАВ у зразках ґрунту та мулу умови оптимізації методу для хроматографічного розділення і параметри детектування для HPLC-FLD, GC-MS, HPLC-DAD варіюють за даними різних авторів у дуже широких межах [20]. В останні десятиліття часто застосовувались методи екстракції ПАВ із зразків ґрунту та мулу за допомогою апарату Сокслета і методу прискореної екстракції розчинником (ASE). Для ASE використовувались різні розчинники або їх суміші, серед яких: дихлорметан, гексан, метанол, толуол, ацетон або ацетонітрил [27, 28]. ASE незважаючи на те, що є повністю автоматизованою технікою екстракції і забезпечує відносно швидкий період екстракції, потреба в спеціалізованому та високовартісному обладнанні, може зробити її застосування менш практичним [29]. Метод QuEChERS часто використовується у різних модифікаціях, з різними розчинниками. Він дає можливість швидко та дешево застосовувати для екстракції

ПАВ із зразків харчових продуктів, мулу (Рис. 2) та ґрунту [30, 31]. У кожного з цих методів існують свої переваги та недоліки, оскільки різні досліджувані ПАВ, хоч і відносяться до одного класу, але вони відрізняються за молекулярною масою та фізичними властивостями, тому створюють деякі обмеження для визначення окремих сполук з використання конкретного методу.

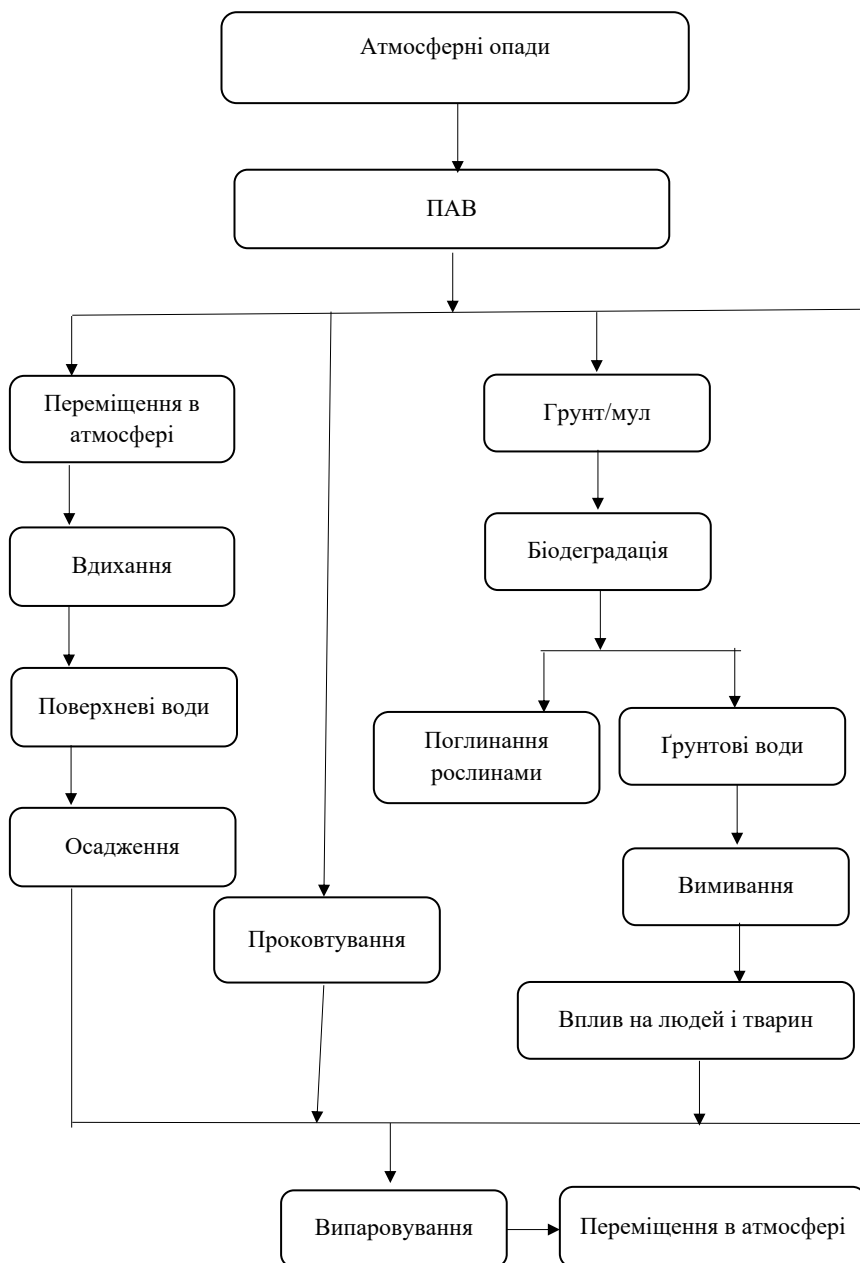


Рис. 1. Переміщення ПАВ у компонентах навколишнього середовища

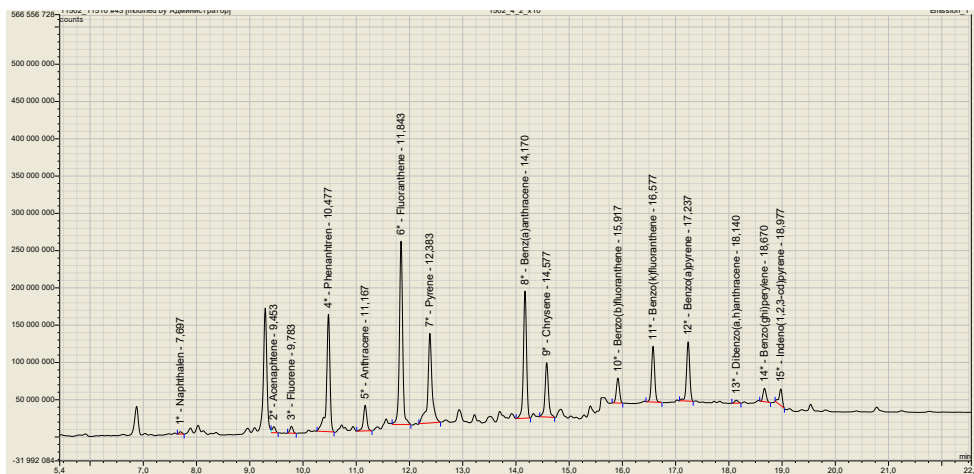


Рис. 2. Хроматограма 15 ПАВ у зразку річкового мулу, отримана за допомогою методу HPLC-FLD

Грунт є досить складною і проблематичною матрицею, в якому ПАВ часто нерівномірно розподілені, в ньому наявна певна фонові кількість цих речовин (1–10 мкг/кг кожного ПАВ). Тому точність оцінки вилучення для досліджуваних зразків ґрунту ускладнюється і вимагає використання «холостих» зразків для вимірювань. При цьому «холості» значення не повинні перевищувати 10 % нижньої застосованої межі. Через достатньо велику кількість речовин, які перешкоджають визначенню необхідних компонентів (матричний ефект), для вимірювання часто використовують не значення площ піків, а їх висоту. Інколи у випадку сильно забруднених зразків ґрунту використовують порівняння результатів хроматографічного розділення за показниками різних детекторів [32].

Для вимірювання забруднення повітря поліциклічними ароматичними вуглеводнями застосовують пасивні пробовідбірники повітря, обладнані пінополіуретаном (PUF-PAS) [33], мембрани з нітрату целюлози кварцевих волокнистих фільтрів, пиловловлювача циклонного типу [14]. Після відбору частинок розсіяних у досліджуваному повітрі застосовують методи екстракції такі як метод Сокслета, ASE, ультразвукову екстракцію (UAE – ultrasonic-assisted extraction) [33, 34, 35]. У різних дослідженнях використовують досить різні методи хроматографічного розділення компонентів, виділених з повітря. Серед них: GC-MS, GC-FID, HPLC-FLD, HPLC-DAD.

Висновки. Для визначення поліароматичних вуглеводнів у різних компонентах екосистем та оцінки ступеня забруднення ними навколишнього середовища існує велика кількість методів відбору, пробопідготовки та хроматографічного визначення їх концентрацій. Методи постійно вдосконалюють з метою підвищення їх точності, зниження собівартості, спрощення пробопідготовки та зменшення часу аналізування. Для усунення матричного ефекту нині в деяких дослідженнях застосовують пробопідготовку з використанням нанотехнологічних матеріалів.

Методологію QuEChERS у різних модифікаціях досить часто використовують для виділення ПАВ із води, ґрунту, мулу та рослинного матеріалу.

Визначення вмісту ПАВ в об'єктах навколишнього середовища найчастіше проводять із застосуванням газової хроматографії з мас-спектрометричним детектором або рідинної хроматографії з флуоресцентним або діодно-матричним детекторами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Patel A.B., Shaikh S., Jain K.R., Desai C., Madamwar D. Polycyclic aromatic hydrocarbons: sources, toxicity, and remediation approaches. *Front Microbiol.* 2020. Vol. 11. P. 562813–562836.
2. Zhao Z., Chu Y. & Gu J. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the Mai Po Inner Deep Bay Ramsar Site in Hong Kong. *Ecotoxicology.* 2012. Vol. 21. P. 1743–1752. <https://doi.org/10.1007/s10646-012-0948-6>.
3. U.S. EPA 1979 Priority pollutant list. Federal Register 44, P. 69514–69517.
4. Гігієнічні регламенти допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті, затверджені наказом Міністерства охорони здоров'я України № 1595 від 14.07.2020. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20#Text>.
5. Kirsti Husgafvel-Pursiainen. Genotoxicity of environmental tobacco smoke: a review. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research.* 2004. Vol. 567, Is. 2–3. P. 427–445. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2004.06.004>.
6. Mallakin A., Dixon D.G., Greenberg B. M. Pathway of anthracene modification under simulated solar radiation. *Chemospher.* 2000. Vol. 40. Is. 12. P. 1435–1441, [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00331-8](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00331-8).
7. Shimada T. Xenobiotic-Metabolizing Enzymes Involved in Activation and Detoxification of Carcinogenic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Drug Metabolism and Pharmacokinetics.* 2006. Vol. 21. Is. 4. P. 257–276, <https://doi.org/10.2133/dmpk.21.257>.
8. Bing-Huei C., Baskaran S., Kuo-Chiang H. Recent advances in the analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in food and water. *Journal of Food and Drug Analysis.* 2022. Vol. 30(4). P. 494–522. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.3429>.
9. Войціцький В.М., Хижняк С.В., Мідик С.В., Березовський О.В., Якубчак О.М., Полтавченко Т.В. Шляхи міграції поліциклічних ароматичних вуглеводнів наземними і водними екосистемами. *Екологічні науки.* 2022. Вип. 3 (42). С. 14–20. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.есо.3-42.2>.
10. Войціцький В.М., Корнієнко В.І., Хижняк С.В., Мідик С.В., Березовський О.В. Вибір показників для екологічного нормування наземних екосистем. *Таврійський науковий вісник.* 2024. № 135 (1). С. 218–225. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.135.1.29>
11. Anastassiades M., Lehotay S., Štajnbaher D., Schenck F. Fast and easy multiresidue method employing acetonitrile extraction/partitioning and “dispersive solid-phase extraction” for the determination of pesticide residues in produce. *Journal of AOAC International.* 2003. Vol. 86(2). P. 412–431.
12. BS EN ISO 17993:2003. Water quality – Determination of 15 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in water by HPLC with fluorescence detection after liquid-liquid extraction (ISO 17993:2002). Published: 17 Sep. 2002. <https://doi.org/10.3403/02644226U>.
13. Qie Gen Liao, Li Fang Hu, Lin Guang Luo. A chitosan–polypyrrole@Fe₃O₄ nanocomposite for magnetic solid-phase extraction of macrolides from swine urine samples. *Anal. Methods.* 2015. Vol. 7(6). P. 2806–2812. <https://doi.org/10.1039/c4ay02907k>.
14. Weidon J., Nakano K., Zhenxing S., Okuda T. Optimization of the QuEChERS extraction method to determine Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in powder aerosol particles collected by cyclone. *Environmental Technology & Innovation.* 2023. Vol. 31. P. 2. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103141>.

15. Dong L., Zhang J. Predicting polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water by a multiscale feature extraction-based deep learning approach. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 799. P. 149509. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149509>.
16. Delgado-Saborit J.M., Stark C., Harrison R.M. Carcinogenic potential, levels and sources of polycyclic aromatic hydrocarbon mixtures in indoor and outdoor environments and their implications for air quality standards. *Environ. Int.* 2011. Vol. 37. P. 383–392.
17. Nikolaou, A.; Kostopoulou, M.; Petsas, A.; Vagi, M.; Lofrano, G.; Meric, S. Levels and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in marine sediments. *Trac Trends Anal. Chem.* 2009. Vol. 28. P. 653–664.
18. Khoury D., Millet M., Jabali Y., Delhomme O. Occurrence of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Polychlorinated Biphenyls in Fogwater at Urban, Suburban, and Rural Sites in Northeast France between 2015 and 2021. *Atmosphere*. 2024. Vol. 15. P. 291.
19. Monty M.T., Mokoena L., Tshilongo J. A Review on Recent Developments in the Extraction and Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Environmental Samples. *Water*. 2024. Vol. 16. P. 2520.
20. Soursou V., Campo J., Picó Y. Revisiting the analytical determination of PAHs in environmental samples: An update on recent advances. *Trends Environ. Anal. Chem.* 2023. Vol. 37, e00195.
21. Thermo Fisher Scientific Application Note 70923: Sensitive and rapid determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in tap water. Sunnyvale, CA, 2008. [Online] <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CMD/Application-Notes/AN-1085-LC-PAHs-Tap-Water-AN70923-EN.pdf>. P. 2.
22. Dohmann J.F., Thiäner J.B., Achten C. Ultrasensitive detection of polycyclic aromatic hydrocarbons in coastal and harbor water using GC-APLI-MS. *Mar. Pollut. Bull.* 2019. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110547.
23. Hatzianestis I., Parinos C., Bouloubassi I., Gogou A. Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of the Aegean Sea (eastern Mediterranean Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 2020. Vol. 153. P. 111030. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111030>
24. Bejaoui B, Nefzi K, Bouchmila I., iKoumba S., Joly N., M'Hamdi N., Martin P. Solid-phase extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from water samples using CTAB-TiO₂ modified nanotubes. *Microchemical Journal*. 2023. Vol. 193. Article 109027. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109027>
25. Manousi N., Deliyanni E.A., Rosenberg E., Zachariadis G.A. Ultrasound-assisted magnetic solid-phase extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons and nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons from water samples with a magnetic polyaniline modified graphene oxide nanocomposite. *J. Chromatogr.* 2021, DOI: 10.1016/j.chroma.2021.462104.
26. Song N.-E., Jung Y.S., Choi J.Y., Koo M., Choi H.-K., Seo D.-H., Lim T.-G., Nam T.G. Development and Application of a Multi-Residue Method to Determine Pesticides in Agricultural Water Using QuEChERS Extraction and LC-MS/MS Analysis. *Separations*. 2020. Vol. 7. P. 52. <https://doi.org/10.3390/separations7040052>.
27. Zhang Q., Liu P., Li S., Zhang X., Chen M. Progress in the analytical research methods of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) *J. Liq. Chromatogr. Relat. Technol.* 2020. Vol. 43(13–14). P. 425–444. <https://doi.org/10.1080/10826076.2020.1746668>.
28. Laguerre A., Gall E.T. Measurement of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) on indoor materials: method development. *ACS Omega*. 2023. Vol. 8(23). P. 20634–20641. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01184>.
29. Erawaty Silalahi E.T.M., Anita S., Teruna H.Y. Comparison of extraction techniques for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021, 1819 012061 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1819/1/012061>.

30. Nikolić J.S., Mitić V.D., Jovanović V.P.S., Dimitrijević M.V., Ilić, M.D., Simonović S.R., Stojanović G.S. Novel sorbent and solvent combination for QuEChERS soil sample preparation for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons by gas chromatography-mass spectrometry. *Anal. Lett.* 2018. Vol. 51. P. 1087–1107.
 31. Petrarca M.H., Godoy H.T. Gas chromatography-mass spectrometry determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in baby food using QuEChERS combined with low-density solvent dispersive liquid-liquid microextraction. *Food Chem.* 2018. Vol. 257. P. 44–52.
 32. DIN EN 17503:20222. Soil, sludge, treated biowaste and waste – Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) by gas chromatography (GC) and high performance liquid chromatography (HPLC). German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung). 2022.
 33. Vuong Q.T., Kim S.J., Nguyen T.N.T., Thang P.Q., Lee S.J., Ohura T., Choi S.D. Passive air sampling of halogenated polycyclic aromatic hydrocarbons in the largest industrial city in Korea: spatial distributions and source identification. *J. Hazard. Mater.* 2020. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121238.
 34. Kim S., Lee S.D. Kim Determination of toxic organic pollutants in fine particulate matter using selective pressurized liquid extraction and gas chromatography–tandem mass spectrometry *J. Chromatogr. A*. 2019. DOI: 10.1016/j.chroma.2019.01.009.
 35. Wang Q.T. J., Xu H., Guinot B., Li L., Ho S.S.H., Liu S., Li X., Cao J. Concentrations, sources and health effects of parent, oxygenated- and nitrated- polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in middle-school air in Xi'an. *China Atmos. Res.* 2017. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.03.006.
-