

ОЦІНКА РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ЗА ВМІСТОМ ШИРОКОГО СПЕКТРА КОНГЕНЕРІВ ПХБ У КОМПОНЕНТАХ ДОВКІЛЛЯ

Мідик С.В.¹, Сенін С.А.¹, Корнієнко В.І.¹, Семенко Л.О.¹, Хижняк С.В.¹,
Березовський О.В.¹, Полтавченко Т.В.², Ладугубець О.В.³

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15; 03041, м. Київ

²Національний університет водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11; 33000, м. Рівне

³Державний біотехнологічний університет
вул. Алчевських, 44, 61002, м. Харків
svit.mid@gmail.com

Досліджено процеси накопичення та розподілу конгенерів поліхлорованих біфенілів (ПХБ) у ґрунтах та донних відкладеннях (мулі) в умовах антропогенного навантаження. Метою роботи є кількісна та якісна оцінка вмісту широкого спектра конгенерів ПХБ у компонентах довкілля (наприкладі Івано-Франківської області) для визначення рівня екологічних ризиків та ідентифікації джерел забруднення. Відбір зразків здійснювався у лісових масивах, прибережних зонах річок Левець і Дністер, а також поблизу автомагістралі Р24. Аналітичне визначення ПХБ проводили методом газової хроматографії з електронно-захоплюючим детектором (GC-ECD) на високоефективній капілярній колонці SGE HT8-PCB (60 м). Підготовку проб здійснювали відповідно до ДСТУ ISO 10382:2004 та за розробленою методикою, що забезпечило ефективну екстракцію цільових компонентів зі складних матриць. Ідентифікацію здійснювали для понад 130 конгенерів згідно з номенклатурою IUPAC із використанням внутрішнього стандарту (ПХБ № 209). Встановлено, що у більшості досліджених локацій вміст ПХБ відповідає фоновим значенням і не перевищує екологічні нормативи (0,05 мг/кг для ґрунтів). Проте, виявлено зони локального техногенного накопичення. Найвищі концентрації зафіксовано у ґрунті поблизу автодороги Р24 (сумарний вміст окремих конгенерів ПХБ-18, 27/15, 16 досягав 0,013 – 0,022 мг/кг) та у мулових відкладеннях р. Левець (ПХБ-5/8 – 0,031 мг/кг). Аналіз профілю конгенерів свідчить про домінування три- та тетрахлорбіфенілів, що вказує на деградацію старих технічних сумішей та відсутність свіжих джерел викидів. Виявлені концентрації ПХБ у більшості зразків не перевищують нормативні показники (для ґрунтів – 0,05 мг/кг, для мулів – 0,1 мг/кг), що свідчить про допустимий рівень забруднення. Однак, наявність локальних піків свідчить про необхідність постійного екологічного моніторингу, особливо у прибережних зонах річки Левець і поблизу автодороги Р24, де ймовірно накопичення техногенних органічних сполук. *Ключові слова:* поліхлоровані біфеніли, конгенери, ПХБ, GC-ECD, екологічний ризик, ґрунт, донні відкладення.

Assessment of the level of pollution and environmental risks based on the content of a broad spectrum of PCB congeners in environmental components Midyk S., Senin S., Korniyenko V., Semenko L., Khyzhnyak S., Berezovskyi O., Poltavchenko T., Ladohubets E.

The processes of accumulation and distribution of polychlorinated biphenyl (PCB) congeners in soils and bottom sediments (silt) under anthropogenic load were studied. The aim of the work is to quantitatively and qualitatively assess the content of a wide range of PCB congeners in environmental components (using the example of Ivano-Frankivsk region) to determine the level of environmental risks and identify sources of pollution. Samples were collected in forest areas, coastal zones of the Levets and Dniester rivers, as well as near the P24 highway. Analytical determination of PCBs was carried out by gas chromatography with electron capture detector (GC-ECD) on a high-performance capillary column SGE HT8-PCB (60 m). Sample preparation was carried out in accordance with DSTU ISO 10382:2004 and according to the developed methodology, which ensured effective extraction of target components from complex matrices. Identification was carried out for more than 130 congeners according to the IUPAC nomenclature using an internal standard (PCB No. 209). It was found that in most of the studied locations the PCB content corresponds to background values and does not exceed environmental standards (0.05 mg/kg for soils). However, zones of local technogenic accumulation were detected. The highest concentrations were recorded in the soil near the P24 highway (the total content of individual congeners PCB-18, 27/15, 16 reached 0.013 – 0.022 mg/kg) and in the silt deposits of the Levets River (PCB-5/8 – 0.031 mg/kg). Analysis of the congener profile indicates the dominance of tri- and tetrachlorobiphenyls, which indicates the degradation of old technical mixtures and the absence of fresh emission sources. The detected PCB concentrations in most samples do not exceed the regulatory indicators (for soils – 0.05 mg/kg, for silts – 0.1 mg/kg), which indicates an acceptable level of contamination. However, the presence of local peaks indicates the need for constant environmental monitoring, especially in the coastal areas of the Levets River and near the P24 highway, where the accumulation of man-made organic compounds is likely. *Key words:* polychlorinated biphenyls, congeners, PCBs, GC-ECD, environmental risk, soil, bottom sediments.



Постановка проблеми. Хімічні сполуки, виявлені в навколишньому середовищі, для яких характерним є тривалий період напіврозпаду в ґрунтах (зазвичай роки), донні відкладення водою, повітрі (кілька днів) або біоті, визначаються як стійкі органічні забруднювачі (СОЗ). В останні роки кількість досліджень впливу СОЗ на екосистеми зростає, і ця тема стала важливою і захопливою галуззю наукових досліджень [1, 2].

Кілька СОЗбуловнесено до списку Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі, до яких відносяться: хлоровані (та бромовані) ароматичні сполуки (серед них поліхлоровані біфеніли (ПХБ)), поліхлоровані дибензофурані, полібромовані дифенілові ефіри, ряд хлороорганічних пестицидів (наприклад, дихлордифенілтрихлорметилметан (ДДТ) та його метаболіти (хлордан, токсафен) [3].

Актуальність дослідження. Наукові дослідження свідчать про те, що екологічний та професійний вплив високих концентрацій ПХБ пов'язаний зі шкідливими наслідками для здоров'я, такими як нейропсихологічні та нейроповедінкові порушення, дисфункції імунної системи, деменція, серцево-судинні захворювання репродуктивні та онкологічні захворювання [4, 5].

Тому оцінка забруднення ґрунтів поліхлорованими біфенілами, особливо під час військових дій є важливим завданням.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Важливою екологічною проблемою є забруднення довкілля токсичними речовинами. До них відносяться поліхлоровані біфеніли. Це дослідження сприяє також розробці нових методів контролю екологічного моніторингу довкілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різноманітні комбінації поліхлорованих біфенілів визначаються кількістю і положенням атомів хлору і призводять до утворення 209 різних сполук, які називаються конгенерами. Хімічні та фізичні властивості ПХБ суттєво відрізняються залежно від конгенеру, що зумовлює їх високу структурну мінливість [6].

ПХБ відносяться до СОЗ через їхню високу стійкість, здатність до біоаккумуляції та токсичності. Через свою мобільність та стабільність у навколишньому середовищі, вони розповсюджені по всій планеті: від Арктики Антарктики до антарктики і навіть Маріанської западини у глибинах Тихого океану. Тому ПХБ становлять ризик для екосистем, оскільки вони інтенсивно біоакмулюються через харчові ланцюги, досягаючи небезпечних рівнів у тварин верхніх трофічних рівнів. Як наслідок, вони можуть впливати не лише на окремі організми, а й, зрештою, на цілі екосистеми [7].

Аналізуючи методи визначення поліхлорованих біфенілів (ПХБ) слід відзначити GC/MS метод [8] з рекомендованою пробопідготовкою QuEChERS

[9]. Вона дозволяє швидко та ефективно проводити екстракцію залишкових кількостей цільових компонентів та очищення екстракту від компонентів матриці [10]. В окремих дослідженнях за допомогою цього методу екстрагують ПХБ з ґрунту [11].

При визначенні ПХБ також використовують GC-ECD метод, повернення якого складає 95,7-101% [12].

У науковій літературі та в офіційних нормативних документах описано різні варіанти методів визначення PCBs. Одним з них є метод, який передбачає визначення 19-ти PCBs у твердих матрицях за використання капілярних хроматографічних колонок (30 м) різного діаметру. Етапи пробопідготовки при визначенні 19 конгенерів PCB можуть використовуватися для аналізування та ідентифікації інших конгенерів, але усі 209 конгенерів PCB не можливо ідентифікувати за допомогою хроматографічних колонок та аналітичних процедур, описаних у цьому методі [13, 14, 15].

Також існують різні методи екстрагування твердих зразків для визначення в них PCBs, які зазначені в офіційних методах [16-19].

При проведенні хроматографування методами GC/ECD застосовують капілярні колонки з внутрішнім діаметром 0.25 мм, 0.32 мм або 0.53 мм. Колонки з меншим діаметром мають більшу хроматографічну роздільну здатність, ніж колонки з більшим внутрішнім діаметром. Хроматографічні колонки з меншим внутрішнім діаметром (0.25 мм) та великою довжиною (>60 м), як правило, можуть бути ефективніші для розділення більшої кількості конгенерів PCBs.

У науковій літературі [20] описано багатоетапну підготовку проб жиромісних матриць для аналізування GC/ECD, яка включає 24-х годинне екстрагування проб на апараті Soxhlet, випарювання на ротаційному випарнику, центрифугування та концентрування проби потоком азоту за використання таких реактивів як сульфат натрію, сірчана кислота, гексан, дихлорметан. Відомі також інші методи визначення PCBs, які характеризуються як перевагами так і недоліками [21].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Проведено якісне та кількісне визначення конгенерів поліхлорованих біфенілів у компонентах екосистем західної України.

Новизна. Вперше досліджено донні відкладення річок Левець і Дністер і та ґрунт територій західної України в Івано-Франківській області на наявність більш як 130-ти конгенерів поліхлорованих біфенілів.

Виклад основного матеріалу. Методи визначення поліхлорованих біфенілів поділяються на:

- 1) скринінгові методи (біоаналітичні методи та методи газової хроматографії з мас-спектрометричним детектуванням);
- 2) підтвердуючі методи (метод газової хроматографії з мас-спектрометрією високої роздільної здат-

ності та метод газової хроматографії з тандемним мас-спектрометричним детектуванням.

У зразках ґрунтів (відібраних у лісах та біля автодороги) та мулу відібраних в районі річок Левець і Дністер в Івано-Франківській області визначали поліхлоровані біфеніли. Підготовку проб здійснювали відповідно до ДСТУ ISO 10382:2004 [22], а також за модифікованим методом підготовки проб, який розроблений в Українській лабораторії якості і безпеки продукції АПК НУБіП України. Порядок елюювання ПХБ визначали згідно технічної специфікації виробника (Trajan Scientific and Medical) колонки SGE HT8-PCB (60 м × 0,25 мм, part number 054236). Найменування ПХБ (номер, структура) зазначали згідно номенклатури IUPAC (Міжнародний союз фундаментальної та прикладної хімії). Для ідентифікації ПХБ у пробах використовували аналітичні стандарти ПХБ 14 для ECD 10 мг/мл у гептані; Арохлори 1242, 1254, 1254, 1260 в концентрації 1000 мкг/мл в ізооктані (аналітичні стандарти), а також аналітичний стандарт ПХБ № 209, в концентрації 10 мкг/мл в ізооктані та аналітичний стандарт ПХБ № 30 (10 мкг/мл) в ізооктані. Обрахунок результатів ПХБ проводили методом внесення внутрішнього стандарту в кожену пробу. В якості внутрішнього стандарту використовували аналітичний стандартний розчин PCB № 209 в ізооктані. Межу кількісного визначення (LOQ) розраховано для кожного ПХБ окремо. Вона визначається як масова частка компоненту, яка дає сигнал (площу піка), що у 10 разів перевищує сигнал проби контролю аналізованої матриці.

Дослідження проводили з метою кількісного та якісного визначення поліхлорованих біфенілів у про-

бах методом газової хроматографії з електронно-захоплюючим детектором. При аналізі отриманих даних ми ідентифікували окремі поліхлоровані біфеніли відповідно до номенклатури IUPAC у порядку їх елюювання. Проби були досліджені на наявність більше 130 конгенерів ПХБ. В таблиці 1 наведені результати визначення 14 основних конгенерів ПХБ із зазначенням меж кількісного визначення та розширеної невизначеності вимірювань.

За результатами аналізу встановлено, що більшість конгенерів ПХБ у зразку Мул 1 (р. Левець) не перевищують межі кількісного визначення (<LOQ). Зокрема, для ПХБ-10, 4, 9, 7, 18, 24, 32 та 34 концентрації не досягають аналітичної чутливості методу, що свідчить про наявність у кількості слідів.

Але для шести показників таких як ПХБ-6, ПХБ-5/8, ПХБ-19, ПХБ-17, ПХБ-27/15 та ПХБ-16 відмічено концентрацію у межах 0,002–0,012 мг/кг, які перевищують межу кількісного визначення. Найвищу концентрацію виявлено для ПХБ-5/8 (2,3; 2,4') – 0,012 мг/кг з розширеною невизначеністю 0,005 мг/кг.

Виявлені показники належать переважно до трихлор- та тетрахлорбіфенілів, які мають меншу термічну та біохімічну стійкість, порівняно з високохлорованими ПХБ. Це свідчить про наявність залишкового, а не свіжого джерела забруднення.

Загальний вміст ПХБ у дослідженому зразку не перевищує 0,05 мг/кг, що є нижчим за допустимі норми, регламентовані міжнародними стандартами, 0,1–0,5 мг/кг для ґрунтів і донних відкладів.

Таким чином, фоновий рівень ПХБ у зразку Мул 1 (р. Левець) є низьким, а екологічна небезпека – мінімальною. Виявлені концентрації пере-

Таблиця 1

Вміст поліхлорованих біфенілів (ПХБ) в залежності від місця відбору

№ піка	№ ПХБ (IUPAC)	Структура	Мул 1 р.Левець	Мул 2 р.Левець	Мул р.Дністер	Мул р.Левець3	Ґрунт р.Левець4	Ґрунт лісовий	Ґрунт автодорога Р24	Ґрунт (полс, 300 м від Р24)	LOQ, мг/кг
1	10	2,6	<0,003	<0,003	0,004	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,003
2	4	2,2'	<0,019	<0,019	<0,019	<0,019	<0,019	<0,019	<0,019	<0,019	0,019
3	9	2,5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,002	<0,002	<0,002	0,002
4	7	2,4	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001
5	6	2,3'	0,008	<0,002	<0,002	0,003	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,002
6	5;8	2,3; 2,4'	0,012	<0,005	<0,005	0,031	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005
7	19	2,2',6	0,007	0,005	<0,003	0,004	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,003
8	18	2,2',5	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,018	<0,003	0,003
9	17	2,2',4	0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,007	<0,002	0,002
10	24	2,3,6	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,007	<0,001	0,001
11	27;15	2,3',6; 4,4'	0,009	0,002	<0,002	<0,002	0,002	0,002	0,022	<0,002	0,002
12	32	2,4',6	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,003
13	16	2,2',3	0,008	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,013	<0,002	0,002
14	34;29	2',3,5; 2,4,5	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001

бувають у межах аналітичної похибки методу, що підтверджується малими значеннями розширеної невизначеності (0,001–0,005 мг/кг).

При аналізі Мул 2 р. Левець основні концентрації ПХБ були на рівні межі кількісного визначення. Тільки наявність конгенерів ПХБ-19 (2,2',6) перевищувала допустимі та становили 0,005 мг/кг.

У пробі Мул Левець-3 вміст ПХБ-5;8 досягнув 0,031 мг/кг, що є найвищим показником серед усіх мулових проб і свідчить про локальне накопичення ПХБ у донних відкладах. Що пов'язано з неорганізованим скиданням стоків або іншого забруднення. При аналізі показників Мул річки Дністер всі показники конгенерів ПХБ були нижчі за межу кількісного визначення. Лише ПХБ-10 (2,6) виявлено у кількості 0,004 мг/кг, що свідчить про незначне, фонове забруднення.

Відібрані зразки ґрунту біля річки Левець-4 та зразок з лісовим ґрунтом містили лише сліди ПХБ, окремі показники на рівні межі виявлення (0,002 мг/кг для ПХБ-27;15). А от ґрунт відібраний біля автодороги Р24 мав найвищі концентрації серед усіх проб і становив: ПХБ-18 (2,2',5) – 0,018 мг/кг; ПХБ-17 (2,2',4) – 0,007 мг/кг; ПХБ-24 (2,3,6) – 0,007 мг/кг; ПХБ-27;15 (4,4'; 2,3',6) – 0,022 мг/кг; ПХБ-16 (2,2',3) – 0,013 мг/кг.

Це вказує на вплив антропогенного фактору, зокрема транспортних викидів, мастил. У зразку ґрунту з поля (300 м від автодороги) концентрації всіх конгенерів були нижчими та в межах допустимості. Таким чином, автодорожній фактор виступає одним із головних шляхів техногенного надходження біфенілів у ґрунт. Це свідчить про добрий екологіч-

ний стан середовища та низький рівень трансформації органічних забруднювачів.

Узагальнюючи отримані показники можна стверджувати, що поліхлоровані біфеніли належать до стійких органічних забрудників (СОЗ), які можуть акумулюватися в донних відкладах і ґрунтах, мігрувати у водне середовище та включатися в харчові ланцюги.

Навіть при невеликих концентраціях вони характеризуються біоаккумулятивною здатністю, токсичністю для водних організмів та канцерогенним ефектом при тривалому впливі на людину. Виявлені концентрації ПХБ у більшості зразків не перевищують нормативні показники (для ґрунтів – 0,05 мг/кг, для мулів – 0,1 мг/кг), що свідчить про допустимий рівень забруднення.

Однак наявність локальних піків свідчить про необхідність постійного екологічного моніторингу, особливо у прибережних зонах річки Левець і поблизу автодороги Р24, де ймовірно накопичення техногенних органічних сполук.

Головні висновки та перспективи використання результатів дослідження. Доведено, що головними чинниками антропогенного надходження ПХБ у регіоні є транспортні викиди та неорганізовані стоки у прибережні захисні смуги. Розроблений аналітичний підхід дозволяє проводити прецизійний моніторинг стійких органічних забрудників, що є критично важливим для оцінки екологічної безпеки територій в умовах військового стану та поствоєнного відновлення. Результати можуть бути використані для розробки стратегій рекультивації забруднених земель та ведення державного екологічного моніторингу.

Література

1. Pironti C., Ricciardi M., Proto A., Bianco P.M., Montano L., Motta O. Endocrine-Disrupting Compounds: An Overview on Their Occurrence in the Aquatic Environment and Human Exposure. *Water*. 2021. Vol. 13. P. 1347. DOI:10.3390/w13101347
2. Vasseghian Y., Hosseinzadeh S., Khataee A., Dragoi E.-N. The Concentration of Persistent Organic Pollutants in Water Resources: A Global Systematic Review, Meta-Analysis and Probabilistic Risk Assessment. *Sci. Total Environ.* 2021. Vol. 796. P. 149000. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.149000
3. Lallas P.L. The Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. *American Journal of International Law*. 2001. Vol. 95(3). P. 692-708. doi:10.2307/2668517.
4. Montano L., Pironti C., Pinto G., Ricciardi M., Buono A., Brogna C., Venier M., Piscopo M., Amoresano A., Motta O. Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Environment: Occupational and Exposure Events, Effects on Human Health and Fertility. *Toxics*. 2022. Vol. 10(7). P. 365. DOI:10.3390/toxics10070365
5. Войціцький В.М., Корнієнко В.І., Хижняк С.В., Мідик С.В., Самкова О.П., Якубчак О.М., Ладугубець О.В. Участь адаптивного потенціалу біологічних систем у формуванні їх надійності. *Екологічні науки*. 2024. № 1(52), Том 2. С. 119-122. DOI:10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.2.22
6. Grimm F.A., Hu D., Kania-Korwel I., Lehmler H.-J., Ludewig G., Hornbuckle K.C., Duffel M.W., Bergman Å., Robertson L.W. Metabolism and Metabolites of Polychlorinated Biphenyls. *Crit. Rev. Toxicol.* 2015;45:245–272. DOI: 10.3109/10408444.2014.999365
7. Zhou Z., Wei T., Zhou J., Wang Z., Cui M., Tang J., Han J., Zhang Z., Qiao X. Dechlorination-Oxypyrolysis Coupled Treatment of Polychlorinated Biphenyls: Reaction Process, Degradation Pathway, and Cost Analysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2026. Vol. 65 (7). P. 3677-3693. DOI:10.1021/acs.iecr.5c04641
8. Левчук І.В. Визначення поліхлорованих біфенілів (ПХБ) в оливах та жирах. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2014. Vol. 1. P. 113–120.
9. Ostadgholami M., Zeeb M., Amirahmadi M., Daraei B. Multivariate Optimization and Validation of a Modified QuEChERS Method for Determination of PAHs and PCBs in Grilled Meat by GC-MS. *Foods*. 2024. Vol. 13. P. 143. DOI: 10.3390/foods13010143
10. Senin S. A., Midyk S. V., Kornienko V. I., Konovalova O. Yu., Berezovskiy O. V., Ladohubets E. V., Harkusha I. V. Determination of Mycotoxins in Wheat Grain by LC-MS/MS using Modified QuEChERS Sample Preparation. *Methods and Objects of Chemical Analysis*. 2023. Vol. 18. Issue 1. P. 22–28. DOI: 10.17721/moca.2023.22-28

11. Alsefri S., Balbaied T., Alatawi H., Albalawi I., Hogan A., Moore E. Development of the QuEChERS Extraction Method for the Determination of Polychlorinated Biphenyls (Aroclor 1254) in Soil Samples by Using GC-MS. *Separations*. 2023. Vol. 10. P. 250. DOI: 10.3390/separations10040250
12. Afful S., Awudza J.A.M., Twumasi S.K., Osae S. Determination of indicator polychlorinated biphenyls (PCBs) by gas chromatography–electron capture detector. *Chemosphere*. 2013. Vol. 93. Issue 8. P. 1556–1560. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.08.001
13. Скринник М.М. Визначення хлорорганічних пестицидів та поліхлорованих біфенілів у гідробіонтах методом хромато-мас-спектрометрії. Автореф. дис. на здоб. ступ. канд. 02.00.02 – аналітична хімія. Ужгород, 2017. 25 с. <https://www.uzhnu.edu.ua/uk/infocentre/get/11325>
14. Method 8082A. Polychlorinated biphenyls (PCBs) by gas chromatography
15. ДСТУ 4514:2006 Риба, інші прісноводні ресурси та харчові продукти з них. Виявлення хлорорганічних пестицидів та поліхлорованих біфенілів методом газорідної хроматографії
16. Method 3540C (Soxhlet extraction) <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3540c.pdf>
17. Method 3541 (automated Soxhlet) <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-3541.pdf>
18. Method 3545 (pressurized fluid extraction) <https://docplayer.net/21030333-Method-3545-pressurized-fluid-extraction-pfe.html>
19. Method 3546 (microwave extraction) <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3546.pdf>
20. Grafton A., Lee D., Libero D., Miller J., Rapko K. Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Fish Roe. *Journal of Young Investigators*. 2006. Vol. 1.
21. Liu J., Li G., Liu J., Wang P., Wu D., Zhang X., & Wu Y. Recent Progress on Toxicity and Detection Methods of Polychlorinated Biphenyls in Environment and Foodstuffs. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 2023. Vol. 53. Issue 4, pp. 928–953. DOI:10.1080/10408347.2021.1997570
22. ДСТУ ISO 10382:2004 Проект. Якість ґрунту. Визначення хлорорганічних пестицидів та поліхлорбіфенілів. Газово-хроматографічний метод з детекцією захопленням електронів (ISO 10382:2002(E), IDT).

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026