

НАВУКІ АБ ЗЯМЛІ
EARTH SCIENCES

УДК 504.05:504.5
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-1-80-88>

Поступила в редакцию 29.03.2024
Received 29.03.2024

**Т. И. Кухарчик¹, В. Д. Чернюк¹, М. И. Козыренко¹, В. С. Хомич¹,
В. Н. Кулакович², А. В. Крылович¹, Е. Н. Басалай³, Е. Н. Забродская²**

¹*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

²*ОАО «Испытания и сертификация бытовой и промышленной продукции «БЕЛЛИС», Минск, Беларусь»*

³*Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь*

**СОДЕРЖАНИЕ ПОЛИБРОМДИФЕНИЛОВЫХ ЭФИРОВ
В ТЕХНОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ В БЕЛАРУСИ**

Аннотация. Обсуждаются впервые полученные для Беларуси данные о содержании одной из групп стойких органических загрязнителей – полибромдифениловых эфиров (ПБДЭ) в различных типах техногенных субстратов. Объектами исследования выбраны зоны воздействия предприятий химического профиля, где использовались антипирены на основе ПБДЭ, предприятий по производству вычислительной и бытовой техники, машиностроения и других отраслей, на которых возможно применение материалов, содержащих ПБДЭ, места сбора и переработки отходов электрического и электронного оборудования, полигоны отходов, накопители осадков сточных вод (ОСВ). Отобрано и проанализировано 40 проб техногенных грунтов и 17 проб ОСВ. Химико-аналитические определения ПБДЭ выполнены с использованием метода газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием. Дополнительно методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии определялось содержание брома и сурьмы как индикаторов применения бромированных антипиренов. Показано, что ПБДЭ обнаруживаются в 33,3 % проб с максимальным значением 5,11 мг/кг, бром – в 40,4 % (236 мг/кг), сурьма – в 15,8 % проб (максимальное значение 319 мг/кг). ПБДЭ зафиксированы в ОСВ, техногенных грунтах и наилках в зонах различных локальных источников воздействия. Обсуждаются основные пути поступления опасных веществ в окружающую среду и наиболее вероятные источники бромированных стойких органических загрязнителей (СОЗ). Показана необходимость развития эколого-геохимических исследований в Беларуси.

Ключевые слова: полибромдифениловые эфиры, бромированные антипирены, осадок сточных вод, техногенные субстраты, источники загрязнения

Для цитирования. Содержание полибромдифениловых эфиров в техногенных отложениях в Беларуси / Т. И. Кухарчик, В. Д. Чернюк, М. И. Козыренко [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2025. – Т. 61, № 1. – С. 80–88. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-1-80-88>

**T. I. Kukharchyk¹, V. D. Chernyuk¹, M. I. Kazyrenka¹, V. S. Khomich¹, V. N. Kulakovich²,
A. V. Krylovich¹, E. N. Basalai³, L. N. Zabrodska²**

¹*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

²*BELLIS Testing and Certification of Home Appliances and Industrial Products, Minsk, Belarus*

³*Brest State Technical University, Brest, Belarus*

THE POLYBROMODIPHENYL ETHERS CONTENT IN TECHNOGENIC DEPOSITS IN BELARUS

Abstract. Data on the content of one of the groups of persistent organic pollutants – polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in various types of technogenic substrates obtained for the first time for Belarus are discussed. The objects of the study were chemical enterprises where PBDE-based flame retardants were used, enterprises for the production of computers and household equipment, mechanical engineering and other industries potentially using materials containing PBDEs, sites for collecting and processing waste electrical and electronic equipment, waste landfills, waste water sewage sludge (WWSS) storage sites. 40 samples of technogenic substrates and 17 samples of WWSS were taken and analyzed. Chemical-analytical determinations of PBDEs were performed using gas chromatography methods with mass spectrometric detection. Additionally, the content of bromine and antimony as indicators of the brominated flame retardants use was determined using X-ray fluorescence spectroscopy. It was shown that PBDEs were detected in 33.3 % of samples with maximum values of 5.11 mg/kg, bromine – in 40.4 % (236 mg/kg), antimony – in 15.8 % of samples (maximum value of 319 mg/kg). PBDEs were found in WWSS, technogenic substrates and silt deposits in impact zones of various local sources. The main routes

of hazardous substances release into the environment and the most likely sources of brominated persistent organic pollutants (POP) are discussed. The need to develop a methodological base for environmental-geochemical studies in Belarus is shown.

Key words: polybrominated diphenyl ethers, persistent organic pollutants, brominated flame retardants, waste water sewage sludge, technogenic substrates, pollution sources

For citation. Kukharchyk T. I., Chernyuk V. D., Kazyrenka M. I., Khomich V. S., Kulakovich V. N., Krylovich A. V., Basalai E. N., Zabrodskaya L. N. The polybromodiphenyl ethers content in technogenic deposits in Belarus. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2025, 2025, vol. 61, no. 1, pp. 80–88 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-1-80-88>

Введение. Полибромдифениловые эфиры (ПБДЭ) – одна из групп стойких органических загрязнителей (СОЗ), которые встречаются в различных компонентах природной среды почти повсеместно [1, 2]. ПБДЭ, как и другие СОЗ, обладают токсичными свойствами, устойчивы к разложению, способны к биоаккумуляции. Они переносятся по воздуху, с водными потоками, мигрирующими видами животных на далекие расстояния, накапливаются в экосистемах. Доказательства негативного воздействия ПБДЭ на экосистемы и здоровье человека привели к включению пента-, окта- и декабромдифениловых эфиров в Стокгольмскую конвенцию о СОЗ и принятию запретов и/или ограничений в отношении их производства и применения [3]. Однако вследствие длительного периода производства антипиренов на основе ПБДЭ, их широкого применения в изделиях промышленного и бытового назначения, огромного количества материалов/изделий, находящихся в использовании, а также проблем обращения с отходами и их переработкой актуальность изучения содержания ПБДЭ в окружающей среде и особенностей их поведения сохраняется [4, 5].

Как известно, основное количество антипиренов на основе ПБДЭ использовалось для производства пластмасс, предназначенных для электрического и электронного оборудования (ЭЭО). Поскольку ПБДЭ не связаны химически с пластиком, в который они включены, возможно их поступление в окружающую среду на различных этапах жизненного цикла ЭЭО. К настоящему времени получены доказательства эмиссии ПБДЭ с поверхности различных видов вычислительной и бытовой техники, используемой в офисных и жилых помещениях, а также салонах автомобилей [6, 7]. Пыль, в свою очередь, рассеивается за пределы места ее образования, поступая в другие техногенные субстраты и/или компоненты природной среды [8]. Имеются подтверждения выщелачивания ПБДЭ под воздействием факторов внешней среды при нарушении правил обращения с отходами ЭЭО или их захоронении на полигонах отходов [9]. Кроме того, поступление ПБДЭ в окружающую среду происходит при использовании антипиренов на основе ПБДЭ, а также материалов, их содержащих. При этом сточные воды промышленных предприятий являются одним из важнейших механизмов транспорта данных загрязняющих веществ, а ОСВ – источниками загрязнения почв при использовании в качестве удобрения [10].

Поступление ПБДЭ в окружающую среду и их содержание в природных компонентах на территории Беларуси пока не изучались. Лишь недавно были получены данные об использовании антипиренов на основе ПБДЭ при производстве в стране огнестойких полиэфирных композиционных материалов, а также о содержании ПБДЭ в пластмассах различных видов ЭЭО [11, 12]. Это свидетельствует о наличии источников ПБДЭ и необходимости их изучения.

Цель исследования – получить представление о содержании ПБДЭ в различных типах техногенных субстратов для последующего изучения загрязнения депонирующих природных компонентов. Предполагалось, что сформировавшиеся в зонах интенсивного техногенного воздействия такие субстраты с наибольшей вероятностью могут быть загрязнены ПБДЭ.

Методы и объекты исследований. В качестве объектов исследования выбраны: предприятия химического профиля, на которых использовались антипирены на основе ПБДЭ; предприятия по производству вычислительной и бытовой техники, машиностроения и других отраслей, на которых возможно применение материалов, содержащих ПБДЭ; места сбора и переработки отходов ЭЭО; полигоны отходов; накопители ОСВ.

В ходе полевых эколого-геохимических исследований выполнялся отбор проб техногенных грунтов, которые могут быть индикаторами техногенных потоков (с поверхностным стоком, ветровым переносом и выбросами), в том числе техногенных грунтов, представленных насыпными или перемешанными с почвой субстратами с большим количеством техногенных включений;

наилков, образовавшихся по потоку поверхностного стока с промплощадок, в том числе возле ливневых коллекторов; отложений местных водотоков, представленных наносными грунтами; смёта с промплощадок; ОСВ.

Определение содержания ПБДЭ в отобранных пробах выполнялось методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ/МС) в соответствии с СТБ EN 16377-2022. Перечень определяемых соединений ПБДЭ: БДЭ-47, БДЭ-99, БДЭ-100, БДЭ-154, БДЭ-153, БДЭ-183, БДЭ-209. Предел обнаружения для конгенов от тетра- до октабромдифениловых эфиров составляет 20 мкг/кг, для декабромдифенилового эфира – 100 мкг/кг. Для экстракции брали навеску 5 г сухого вещества; экстракцию проводили в толуоле с помощью аппарата «Сокслета».

Дополнительно методом рентгенофлюоресцентной спектроскопии (РФС) в соответствии с ГОСТ ИЕС 62321-1-2016, ГОСТ ИЕС 62321-2-2016 и ГОСТ ИЕС 62321-3-1-2016 определялось содержание брома как индикатора бромированных антипиренов и сурьмы, которая использовалась, как правило, совместно с антипиренами на основе ПБДЭ. Предел обнаружения брома составляет 5 мг/кг, сурьмы – 20 мг/кг.

В отношении брома в проанализированных пробах следует подчеркнуть, что применение экспресс-анализа в данном случае было лишь вспомогательным инструментом. Метод РФС разработан для определения брома и других элементов в полимерных материалах, где их концентрация достигает нескольких десятков процентов.

Всего проанализировано 57 проб: ОСВ – 17, техногенных субстратов – 18, наносных грунтов и наилка – 22.

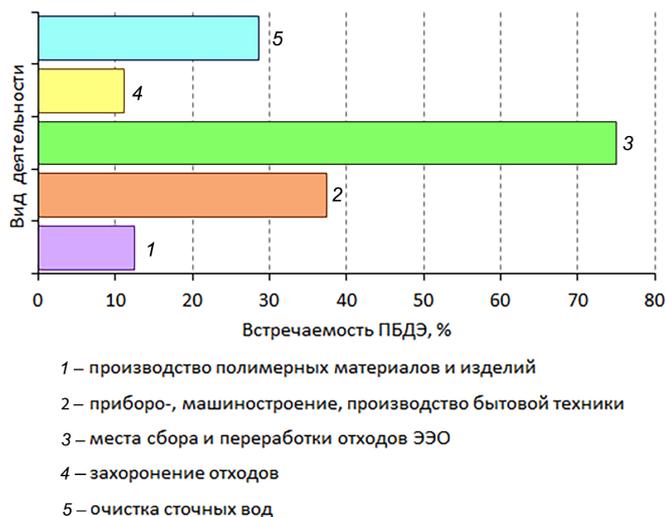
Результаты и их обсуждение. Результаты исследования показали, что ПБДЭ определяются в 33,3 % проанализированных проб, в том числе в 50 % проб техногенных грунтов, в 27,3 % – наилка и 23,5 % – ОСВ. Диапазон концентраций в техногенных грунтах составляет от значений ниже предела обнаружения (н. о.) до 0,99 мг/кг, наилке – н. о. – 5,11 мг/кг, ОСВ – н. о. – 0,27 мг/кг (табл. 1). Бром обнаруживается в 40,4 % проанализированных проб, в том числе в 22,2 % – техногенных грунтов, 27,3 % – наилка и 76,4 % – ОСВ. Сурьма зафиксирована в 9,1 % проб наилка и в 41,2 % проб ОСВ.

Таблица 1. Статистические параметры содержания ПБДЭ, брома и сурьмы в пробах техногенных субстратов, отобранных в зонах локальных источников воздействия на территории Беларуси

Table 1. Statistical parameters of PBDE, bromine and antimony content in samples of technogenic substrates taken in impact zones of local sources on the territory of Belarus

Субстрат (количество проб)	Параметр	Загрязняющее вещество, мг/кг сухого вещества		
		ПБДЭ	Бром	Сурьма
Техногенный грунт (18)	Минимум, мг/кг	н. о.	н. о.	н. о.
	Максимум, мг/кг	0,99	236,0	–
	Медиана, мг/кг	0,06	0	–
	Среднее значение, мг/кг	0,1	14,7	–
	Стандартное отклонение	0,2	55,4	–
Наилка ¹ (22)	Минимум, мг/кг	н. о.	н. о.	н. о.
	Максимум, мг/кг	5,11	83,0	299
	Медиана, мг/кг	0	0	0
	Среднее значение, мг/кг	0,3	6,7	26,5
	Стандартное отклонение	1,1	18,8	85,8
ОСВ (17)	Минимум, мг/кг	н. о.	н. о.	н. о.
	Максимум, мг/кг	0,27	70,0	319,0
	Медиана, мг/кг	0	10,0	0
	Среднее значение, мг/кг	0,1	22,0	72,6
	Стандартное отклонение	0,1	22,4	108,1
ПДК для почв, мг/кг ²		–	–	4,5
В почвах мира, мг/кг [13]		–	5 – 40	0,2–10

Примечание. ¹ – наилки объединены с наносными грунтами; ² – Показатели безопасности и безвредности почвы: гигиенический норматив: утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь, 25 янв. 2021 г., № 37. – Минск, 2021. – 34 с.



Встречаемость ПБДЭ в техногенных субстратах (техногенные грунты, наносные грунты, наилки и ОСВ) в зонах воздействия различных источников

PBDEs occurrence in technogenic substrates (technogenic soils, alluvial soils, silt deposits and WWSS) in impact zones of various sources

Наибольшая вариабельность концентраций ПБДЭ характерна для проб наилок, сформировавшихся вследствие смыва тонкодисперсных частиц с загрязненных участков и их переотложения в понижениях рельефа. Это свидетельствует о выносе ПБДЭ с загрязненных участков благодаря их свойству адсорбироваться на твердых частицах.

ПБДЭ обнаружены в зонах влияния различных источников (рисунок). Максимальная встречаемость проб, содержащих ПБДЭ (75 %), характерна для мест сбора и переработки отходов ЭЭО. В зоне влияния предприятий приборо- и машиностроения, производства бытовой техники, где потенциально могли использоваться материалы, содержащие ПБДЭ, доля загрязненных проб оценивается в 38 %. Достаточно высока доля проб ОСВ, содержащих ПБДЭ, отобранных на городских очистных сооружениях (29 %).

Максимальный уровень накопления ПБДЭ (5,11 мг/кг) выявлен в пробе техногенных отложений (проба 89), сформировавшихся вдоль бордюра у границы промплощадки одного из старейших предприятий Минска, специализирующегося в настоящее время на производстве автосветотехники и бытовой техники (табл. 2). Современное производство и деятельность предприятия в прошлом (приборостроение) связана с применением полимерных материалов различного назначения, вероятно, содержащих ПБДЭ. Отобранная проба характеризует достаточно мощный слой отложений (около 5 см) с хорошо развитым моховым покровом, что свидетельствует о длительном периоде их формирования.

ПБДЭ зафиксированы также в пробах смёта (проба 529) и техногенного грунта (проба 532) в зонах воздействия предприятий по производству телевизоров и электротехнических изделий, расположенных в Витебске. Содержание ПБДЭ в пластмассах ЭЭО, произведенных в СССР, в том числе пластмассовых корпусах телевизоров и мониторов «Витязь» и «Горизонт», отмечалось в 29 % случаев [12]. Это означает, что импортируемые для их производства АБС-пластик и другие типы полимеров содержали антипирены на основе ПБДЭ. Сырьем же для производства электротехнических изделий являлся композиционный материал под названием «Белтер», который производился в Беларуси с применением декаБДЭ.

Как указано выше, чаще всего ПБДЭ обнаруживаются в техногенных субстратах в местах сбора и переработки отходов ЭЭО. Например, в зоне воздействия всех обследованных объектов, расположенных в Минске, Вилейке и Полоцке, выявлены загрязненные грунты с содержанием ПБДЭ в диапазоне 0,11–0,99 мг/кг. Отобранные наилки возле обследованных объектов содержат ПБДЭ на уровнях, сопоставимых с техногенными грунтами на промплощадках, что указывает на рассеивание таких субстратов за пределы мест образования.

Источником ПБДЭ в данном случае выступают пластмассы ЭЭО, в которых уровни ПБДЭ могут достигать 12–17 % по массе [12]. При разборке оборудования, прессовании пластмасс или их дроблении неизбежно образование небольших фрагментов полимерных материалов (боя пластика), а также мелкой пластиковой крошки, которые рассеиваются на площадке, перемешиваясь с почвенными частицами. При попадании пластмасс в природную среду происходят процессы их деградации (хотя и медленные) и выщелачивания загрязняющих веществ вследствие перепадов температур, действия ультрафиолетового излучения, микробиологических процессов [2]. Возможна также эмиссия ПБДЭ с поверхности пластмасс, что приводит к обогащению пыли ПБДЭ: по оценкам [7], содержание декаБДЭ в пыли составляет 1,32 мг/кг (данные для Ванкувера, Канада).

Как показывает опыт исследований в других странах, содержание ПБДЭ в техногенных субстратах в зонах влияния мест сбора и переработки отходов ЭЭО может значительно варьировать, достигая высоких уровней. Так, в районе переработки электронных отходов в Южном Китае в дорожном грунте, собранном рядом с мастерскими по разборке ЭЭО, общие концентрации ПБДЭ колебались от 0,19 до 9,16 мг/кг сухого вещества [14]. Именно предприятия по сбору и переработке отходов ЭЭО являются приоритетным источником поступления ПБДЭ в компоненты окружающей среды, в первую очередь почвы, в которых содержание ПБДЭ достигало более 13 мг/кг [15].

ПБДЭ в техногенных субстратах в зонах воздействия предприятий по производству пенополистирольных материалов, полиэтиленовых изделий, полиамидных и полиэфирных нитей и волокон не обнаружены. Следует отметить, что максимальное содержание брома отмечено в субстрате, представляющем собой смесь почвы и шлама от производства пенополистирольных плит, что свидетельствует об использовании в производстве других бромсодержащих антипиреновых добавок.

В Могилеве на месте бывшего цеха по производству искусственных волокон содержание ПБДЭ в техногенном грунте составило 0,14 мг/кг. Вероятным источником поллютанта мог быть технический декаБДЭ. Исследования в Китае [16] подтверждают его рассеивание в окружающей среде и накопление в уличной пыли (до 0,45 мг/кг) и почве (0,17 мг/кг).

Таблица 2. Содержание ПБДЭ, брома и сурьмы в техногенных субстратах, отобранных в зонах воздействия локальных источников на территории Беларуси, мг/кг сух. в-ва

Table 2. PBDEs, bromine and antimony content in technogenic substrates sampled in impact zones of local sources on the territory of Belarus, mg/kg dry matter

№ пробы	Район исследований	Место отбора	Субстрат	Глубина отбора, см	Загрязняющее вещество		
					ПБДЭ	Бром	Сурьма
Производство полимерных материалов и изделий							
510	Могилев	Демонтированный цех	Техногенный грунт	0–5	0,14	5	н. о. ¹
Приборо-, машиностроение, производство бытовой техники							
89	Минск	Вдоль бордюра хозяйственного двора	Наилкок	0–2	5,11	н. о.	н. о.
529	Витебск	По границе промплощадки	Смёт	0–5	0,16	н. о.	н. о.
532	Витебск	По границе промплощадки	Техногенный грунт	0–5	0,16	н. о.	н. о.
Места сбора и переработки отходов ЭЭО							
139	Минск	Промплощадка, на месте демонтажа холодильников	Техногенный грунт	0–2	0,99	н. о.	н. о.
377	Вилейка	Промплощадка, место хранения материнских плат	Наилкок	0–2	0,32	18	н. о.
381		Промплощадка возле ангара, в котором осуществляется разбор ЭЭО	Техногенный грунт	0–2	0,51	15	н. о.
386		Промплощадка у места хранения термоизоляционных материалов из холодильников	Техногенный грунт	0–2	0,16	н. о.	н. о.

Окончание табл. 2

№ пробы	Район исследований	Место отбора	Субстрат	Глубина отбора, см	Загрязняющее вещество		
					ПБДЭ	Бром	Сурьма
525	Полоцк	На границе промплощадки, у транспортной проходной	Техногенный грунт	0–2	0,11	н. о.	н. о.
226	Минск	Промплощадка у ливневого коллектора	Наиллок	0–2	0,23	н. о.	н. о.
Захоронение отходов							
468	Заславль	У полигона отходов	Наиллок	0–5	0,42	н. о.	н. о.
Очистка сточных вод							
555	Могилев	Иловая площадка	ОСВ	0–10	0,24	32	29
500-2		Иловая площадка	ОСВ	30–40	0,2	57	319
504-3		Иловая площадка	Техногенный грунт	36–53	0,24	н. о.	н. о.
556-3		Иловая площадка	Техногенный грунт	30–40	0,11	н. о.	н. о.
502		Дно обводной канавы	Наносной грунт	0–20	0,31	34	299
503		Водоем	Наносной грунт	0–10	0,32	83	284
31-ОС	Кобрин	Водоем	ОСВ	0–10	0,19	8	н. о.
27-ОС	Лунинец	Водоем	ОСВ	0–10	0,27	н. о.	н. о.

Примечание. ¹ – ниже предела обнаружения.

Из общего количества проб техногенных субстратов, отобранных на очистных сооружениях, 35 % содержат ПБДЭ (по одной пробе в Кобрине и Лунинце и 6 проб в Могилеве). В пробах ОСВ, отобранных на полях фильтрации в Ивацевичах и Пружанах, ПБДЭ не обнаружены. На данном этапе исследований основное внимание уделялось городским очистным сооружениям в Могилеве в связи с использованием здесь декаБДЭ в качестве антипирена. Согласно полученным данным ПБДЭ зафиксированы в ОСВ (0,20–0,24 мг/кг), наносных отложениях аквальных систем (0,31–0,32 мг/кг), а также в подстилающих насыпных грунтах (0,11–0,24 мг/кг) на полях фильтрации городских очистных сооружений.

Установлено, что ПБДЭ в осадке сточных вод и подстилающих грунтах на полях фильтрации в Могилеве почти в одинаковых концентрациях распределены на глубину до 50 см. Вероятно, это связано с их инфильтрацией с загрязненными водами. Кроме того, в четырех пробах, отобранных на очистных сооружениях (в двух пробах ОСВ, а также отложениях из обводной канавы и водоема на полях фильтрации), в высоких концентрациях содержится сурьма, которая в виде триоксида сурьмы применялась одновременно с антипиренами на основе ПБДЭ. Действуя как синергист, сурьма увеличивала огнезащитный эффект ПБДЭ [4]. Диапазон замеренных значений сурьмы составил 29–319 мг/кг, тогда как предельно-допустимая ее концентрация в почве равна 4,5 мг/кг. Для сравнения отметим, что диапазон содержания сурьмы в почвах мира оценивается в 0,2–10 мг/кг, брома – 5–40 мг/кг [13]. В других проанализированных субстратах содержание сурьмы оказалось ниже чувствительности метода.

Согласно опубликованным данным содержание ПБДЭ в ОСВ может варьировать от десятых до нескольких десятков мг/кг сухого вещества, что обусловлено составом сточных вод, специализацией города и другими факторами [10]. Принимая во внимание неравномерность отбора проб, можно тем не менее отметить, что для городских очистных сооружений Могилева проблема загрязнения ОСВ ПБДЭ и сурьмой наиболее очевидна.

Среди соединений ПБДЭ на долю декаБДЭ приходится 100 % суммарного их содержания, что перекликается со значениями и других стран. Так, в Латвии при исследовании ОСВ вклад БДЭ-209 составил до 93–98 % суммы ПБДЭ [17]. Доминирование БДЭ-209 отмечено также в Китае и других странах [10, 18]. Это связано с объемами производства и использования технических смесей на основе ПБДЭ, среди которых более 75 % приходится на долю декаБДЭ [19].

Следует подчеркнуть, что если производство и применение пента- и октаБДЭ запрещено Стокгольмской конвенцией с 2009 г., то декаБДЭ был включен в конвенцию лишь в 2019 г. При этом имеется ряд исключений, допускающих его производство и применение до сих пор [19]. Возможно, поэтому в ряде случаев в последние несколько десятков лет не обнаруживаются значимые тренды в изменении содержания ПБДЭ в техногенных субстратах [20]. Несомненно, устойчивость ПБДЭ к разложению также играет важную роль в их аккумуляции в депонирующих компонентах.

Заключение. Впервые выполненные для территории Беларуси исследования и полученные сведения о содержании ПБДЭ, брома и сурьмы в техногенных субстратах в целом подтверждают наличие источников данных групп химических веществ, а также указывают на рассеивание загрязняющих веществ в окружающей среде.

Максимальная встречаемость проб, содержащих ПБДЭ (75 %), характерна для мест сбора и переработки отходов ЭЭО, где источником поступления опасных веществ являются пластмассы различных видов устройств. В зоне влияния предприятий приборо- и машиностроения, производства бытовой техники, где потенциально могли использоваться материалы, содержащие ПБДЭ, доля загрязненных проб техногенных субстратов оценивается в 38 %. Достаточно высока доля проб, содержащих ПБДЭ, отобранных на очистных сооружениях (29 %).

Выявлено, что ПБДЭ фиксируются в ОСВ городских очистных сооружений различных городов, прежде всего Могилева, где использовались антипирены на основе ПБДЭ. Присутствие же ПБДЭ в ОСВ в Кобрине и Лунинце, источники которых пока не определены, свидетельствует о необходимости более пристального внимания к ОСВ при определении перспектив его применения в качестве удобрений.

Полученные данные подтверждают актуальность развития эколого-геохимических исследований в Беларуси и изучения содержания ПБДЭ в депонирующих компонентах природной среды для разработки природоохранных мер по предотвращению рассеивания опасных СОЗ и минимизации негативных последствий.

Список использованных источников

1. Polybrominated diphenyl ethers in the environmental systems: a review / C. R. Ohoro, A. O. Adeniji, A. I. Okoh, O. O. Okoh // *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 19. – P. 1229–1247. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00656-3>
2. A critical review of water contamination by polybrominated diphenyl ethers (PBDE) and main degradation techniques / M. Motamedi, L. Yerushalmi, F. Haghghat, Z. Chen // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2022. – Vol. 10, iss. 4. – P. 108196. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108196>.
3. Text and Annexes // Stockholm Convention of Persistent Organic Pollutants (POPs). – URL: <https://chm.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx> (date of access: 15.01.2020).
4. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs): sources, pathways and environmental data. Environment Agency. 2019. – URL: <http://www.gov.uk/government/publications> (data of access: 10.01.2024).
5. Turner, A. PBDEs in the marine environment: Sources, pathways and the role of microplastics / A. Turner // *Environmental Pollution*. – 2022. – Vol. 301. – Arc. 118943. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118943>
6. Concentrations of brominated flame retardants in dust from United Kingdom cars, homes, and offices: Causes of variability and implications for human exposure / S. Harrad, C. Ibarra, M. A.-E. Abdallah [et al.] // *Environment International*. – 2008. – Vol. 34, iss. 8. – P. 1170–1175. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.05.001>
7. Legacy and current-use flame retardants in house dust from Vancouver, Canada / M. Shoeib, T. Harner, G. M. Webster [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2012. – Vol. 169. – P. 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.01.043>
8. Characterizing the sorption of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) to cotton and polyester fabrics under controlled conditions / A. Saini, C. Rauert, M. J. Simpson [et al.] // *Science of The Total Environment*. – 2016. – Vol. 563–564. – P. 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.099>
9. Waste dumping sites as a potential source of POPs and associated health risks in perspective of current waste management practices in Lahore city, Pakistan / S. Hafeez, A. Mahmood, J. H. Syed [et al.] // *Science of The Total Environment*. – 2016. – Vol. 562. – P. 953–961. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.120>
10. Kryłów, M. Polybrominated flame retardants in sewage sludge and sediments (review) / M. Kryłów, P. Rezka // *Technical Transactions*. – 2017. – Vol. 3. – P. 153–166. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.17.063.6414>
11. Стойкие органические загрязнители в Беларуси: источники, запасы, регулирование / Т. И. Кухарчик, С. В. Какарека, М. И. Козыренко [и др.] // *Природопользование*. – 2022. – № 2. – С. 37–45.

12. Чернюк, В. Д. Геоэкологическая оценка отходов пластмасс электрического и электронного оборудования на территории Беларуси: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.03.13 / Чернюк Владимир Дмитриевич; Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси. – Минск, 2023. – 23 с.
13. Иванов, В. В. Экологическая геохимия элементов. Книга 3. Редкие *p*-элементы: справочник / В. В. Иванов. – М.: Недра, 1996. – 353 с.
14. Polybrominated diphenyl ethers in road and farmland soils from an e-waste recycling region in Southern China: Concentrations, source profiles, and potential dispersion and deposition / Y. Luo, X. Luo, Z. Lin [et al.] // *Science of The Total Environment*. – 2009. – Vol. 407, iss. 3. – P. 1105–1113. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.044>
15. Distribution characteristics and risks assessment of brominated flame retardants in surface soil from both a legacy and a new e-waste dismantling site / S. Ling, C. Lu, M. Fu [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 373. – Art. 133970. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133970>
16. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in soil and outdoor dust from a multi-functional area of Shanghai: Levels, compositional profiles and interrelationships / M.-H. Wu, J.-C. Pei, M. Zheng [et al.] // *Chemosphere*. – 2015. – Vol. 118. – P. 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.022>
17. Aigars, J. Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sewage Sludge, Sediments, and Fish from Latvia / J. Aigars, N. Suhareva, R. Poikane // *Environments*. – 2017. – Vol. 4, iss. 1. – P. 12. <https://doi.org/10.3390/environments4010012>
18. Liu, L. Z. Characterization of Free and Bound PBDEs in Sewage Sludge from Waste Water Treatment Plants (WWTPs) of Shanghai / L. Z. Liu, Y. Li, J. Yang // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Vol. 864–867. – P. 1993–1996. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.864-867.1993>
19. Technical guidelines: General technical guidelines on the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with persistent organic pollutants. UNEP/CHW.16/6/Add.1. – Geneva, 2023. – URL: <https://www.basel.int/Portals/4/download.aspx?d=UNEP-CHW.16-6-Add.1-Rev.1.English.pdf> (date of access: 05.01.2024).
20. Organic Contaminants in Chinese Sewage Sludge: A Meta-Analysis of the Literature of the Past 30 Years / X.-Z. Meng, A. K. Venkatesan, Y.-L. Ni [et al.] // *Environmental Science and Technology*. – 2016. – Vol. 50, iss. 11. – P. 5454–5466. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05583>

References

1. Ohoro C. R., Adeniji A. O., Okoh A. I., Okoh O. O. Polybrominated diphenyl ethers in the environmental systems: a review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2021, vol. 19, pp. 1229–1247. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00656-3>
2. Motamedi M., Yerushalmi L., Haghighat F., Chen Z. A critical review of water contamination by polybrominated diphenyl ethers (PBDE) and main degradation techniques. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, vol. 10, iss. 4, arc. 108196. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108196>
3. Text and Annexes. *Stockholm Convention of Persistent Organic Pollutants (POPs)*. Available at: <https://chm.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx> (accessed 15 January 2020).
4. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs): sources, pathways and environmental data. Environment Agency (2019). Available at: <http://www.gov.uk/government/publications> (accessed 10 January 2024).
5. Turner A. PBDEs in the marine environment: Sources, pathways and the role of microplastics. *Environmental Pollution*, 2022, vol. 301, arc. 118943. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118943>
6. Harrad S., Ibarra C., Abdallah M. A-E., Boon R., Neels H., Covaci A. Concentrations of brominated flame retardants in dust from United Kingdom cars, homes, and offices: Causes of variability and implications for human exposure. *Environment International*, 2008, vol. 34, iss. 8, pp. 1170–1175. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.05.001>
7. Shoeib M., Harner T., Webster G. M., Sverko E., Cheng Y. Legacy and current-use flame retardants in house dust from Vancouver, Canada. *Environmental Pollution*, 2012, vol. 169, pp. 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.01.043>
8. Saini A., Rauert C., Simpson M. J., Harrad S., Diamond M. L. Characterizing the sorption of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) to cotton and polyester fabrics under controlled conditions. *Science of The Total Environment*, 2016, vol. 563–564, pp. 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.099>
9. Hafeez S., Mahmood A., Syed J. H., Li J., Ali U., Malik R. N., Zhang G. Waste dumping sites as a potential source of POPs and associated health risks in perspective of current waste management practices in Lahore city, Pakistan. *Science of The Total Environment*, 2016, vol. 562, pp. 953–961. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.120>
10. Kryłów M., Rezka P. Polybrominated flame retardants in sewage sludge and sediments (review). *Technical Transactions*, 2017, vol. 3, pp. 153–166. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.17.063.6414>
11. Kukharchyk T. I., Kakareka S. V., Kozyrenko M. I., Chernyuk V. D., Krylovich A. V. Persistent organic pollutants in Belarus: sources, stocks, regulation. *Prirodopol'zovaniye = Nature management*, 2022, no. 2, pp. 34–45 (in Russian).
12. Chernyuk V. D. *Geoecological assessment of plastic waste from electrical and electronic equipment on the territory of Belarus*. Minsk, 2023. 23 p. (in Russian).
13. Ivanov V. V. *Ecological geochemistry of elements. Book 3. Rare p-elements. Directory*. Moscow, Nedra Publ., 1996. 353 p. (in Russian).
14. Luo Y., Luo X.-J., Lin Z., Chen S.-J., Liu J., Mai B.-X., Yang Z.-Y. Polybrominated diphenyl ethers in road and farmland soils from an e-waste recycling region in Southern China: Concentrations, source profiles, and potential dispersion and deposition. *Science of The Total Environment*, 2009, vol. 407, iss. 3, pp. 1105–1113. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.044>

15. Ling S., Lu C., Fu M., Zhou S., Qiao Z., Peng C., Zhang W., Hu S., Lin K., Zhou B. Distribution characteristics and risks assessment of brominated flame retardants in surface soil from both a legacy and a new e-waste dismantling site. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 373, art. 133970. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133970>

16. Wu M.-H., Pei J.-C., Zheng M., Tang L., Bao Y.-Y., Xu B.-T., Sun R., Sun Y.-F., Xu G., Lei J.-Q. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in soil and outdoor dust from a multi-functional area of Shanghai: Levels, compositional profiles and interrelationships. *Chemosphere*, 2015, vol. 118, pp. 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.022>

17. Aigars J., Suhareva N., Poikane R. Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sewage Sludge, Sediments, and Fish from Latvia. *Environments*, 2017, vol. 4, iss. 1, p. 12. <https://doi.org/10.3390/environments4010012>

18. Liu L. Z., Li Y., Yang J. Characterization of Free and Bound PBDEs in Sewage Sludge from Waste Water Treatment Plants (WWTPs) of Shanghai. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 864–867, pp. 1993–1996. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.864-867.1993>

19. Technical guidelines: General technical guidelines on the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with persistent organic pollutants. UNEP/CHW.16/6/Add.1. Geneva, 2023. Available at: <https://www.brsmcas.org/2023COPs/Meetingsdocuments/-tabid/9373/language/en-US/Default.aspx> (accessed 1 January 2024).

20. Meng X.-Z., Venkatesan A., Ni Y.-L., Steele J., Wu L., Bignert A., Bergman A., Halden R. Organic Contaminants in Chinese Sewage Sludge: A Meta-Analysis of the Literature of the Past 30 Years. *Environmental Science and Technology*, 2016, vol. 50, iss. 11, pp. 5454–5466. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05583>

Информация об авторах

Кухарчик Тамара Иосифовна – доктор географических наук, главный научный сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tkukharchyk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3434-1244>

Чернюк Владимир Дмитриевич – кандидат географических наук, старший научный сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Беларусь). E-mail: chernyuk.vladimir.m@mail.ru

Козыренко Маргарита Ивановна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Беларусь). E-mail: margarita_kozyrenko@tut.by

Хомич Валерий Степанович – доктор географических наук, главный научный сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: valery_khomich@mail.ru

Кулакович Виктор Петрович – ведущий инженер. ОАО «Испытания и сертификация бытовой и промышленной продукции «БЕЛЛИС» (ул. Красная, 7Б, 220029, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bellis.rohs@gmail.com

Басалай Екатерина Николаевна – кандидат географических наук, заместитель декана. Брестский государственный технический университет. E-mail: basalaiekat@yandex.ru

Крылович Анастасия Вячеславовна – научный сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Беларусь). E-mail: krylovich_nastya@mail.ru

Забродская Елизавета Николаевна – инженер. ОАО «Испытания и сертификация бытовой и промышленной продукции «БЕЛЛИС» (ул. Красная, 7Б, 220029, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bellis.rohs@gmail.com

Information about the authors

Kukharchyk Tamara I. – D. Sc. (Geography), Chief researcher. Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tkukharchyk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3434-1244>

Chernyuk Vladimir D. – Ph. D. (Geography), Senior Researcher. Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: chernyuk.vladimir.m@mail.ru

Kozyrenka Marharyta I. – Ph. D. (Geography), Senior Researcher. Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: margarita_kozyrenko@tut.by

Khomich Valeriy S. – D. Sc. (Geography), Chief Researcher. Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: valery_khomich@mail.ru

Kulakovich Viktor P. – Lead engineer. BELLIS Testing and Certification of Home Appliances and Industrial Products (7B, Krasnaya Str., 220029, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bellis.rohs@gmail.com

Basalai Ekaterina N. – Ph. D. (Geography), Deputy Dean. Brest State Technical University. E-mail: basalaiekaterina@yandex.ru

Krylovich Anastasia V. – Researcher. Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: krylovich_nastya@mail.ru

Zabrodskaya Lizaveta N. – Engineer. BELLIS Testing and Certification of Home Appliances and Industrial Products (7B, Krasnaya Str., 220029, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bellis.rohs@gmail.com