

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCESУДК 504.05+504.064
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-2-224-233>Поступило в редакцию 05.03.2021
Received 05.03.2021**Т. И. Кухарчик¹, В. Д. Чернюк¹, В. П. Кулакович²**

¹*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*
²*Испытания и сертификация бытовой и промышленной продукции «БЕЛЛИС»,
Минск, Республика Беларусь*

**СОДЕРЖАНИЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ОТХОДАХ ПЛАСТИКА
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В БЕЛАРУСИ***(Представлено академиком В. Ф. Логиновым)*

Аннотация. Проблема обращения с отходами пластика электронного и электротехнического оборудования (ЭЭО) связана, с одной стороны, с увеличением объемов их образования и требованиями «зеленой» циркуляционной экономики к переработке, с другой – содержащимися в них опасными веществами, включая стойкие органические загрязнители (СОЗ) и тяжелые металлы. В сообщении приведены результаты измерения содержания загрязняющих веществ в пробах пластика ЭЭО, отобранных на предприятиях по их сбору и переработке в Минске. Содержание тяжелых металлов и брома определялось в 40 пробах пластика с использованием рентгенофлуоресцентной спектроскопии, полибромированных дифенилов (ПБД) и полибромдифениловых эфиров (ПБДЭ) – в 19 пробах с использованием газовой хроматографии с масспектрометрическим детектированием. Показано, что содержание свинца зафиксировано в 40 % проб (максимальное значение 259 мг/кг пластика), кадмия – 28 % (22 мг/кг), хрома – 20 % (98 мг/кг); содержание ртути и ПБД оказалось ниже предела чувствительности метода. ПБДЭ содержатся в 7,5 % проб в диапазоне 246–6615 мг/кг. На долю декабромдифенилового эфира, относящегося к стойким органическим загрязнителям, приходится от 89 до 96 % суммы ПБДЭ. Выявлена высокая доля бромсодержащего пластика (48 %), что согласуется с данными для других стран. Обсуждается необходимость развития исследований в Беларуси с расширением перечня анализируемых загрязняющих веществ в составе пластика и разработки нормативной технической базы в отношении обращения с отходами пластика в соответствии с обязательствами по Стокгольмской конвенции о СОЗ.

Ключевые слова: полибромдифениловые эфиры, стойкие органические загрязнители, тяжелые металлы, отходы пластика

Для цитирования. Кухарчик, Т. И. Содержание загрязняющих веществ в отходах пластика электротехнических изделий в Беларуси / Т. И. Кухарчик, В. Д. Чернюк, В. П. Кулакович // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 2. – С. 224–233. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-2-224-233>

Tamara I. Kukharchyk¹, Vladimir D. Chernyuk¹, Viktor P. Kulakovich²

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

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

CONTENT OF POLLUTANTS IN WASTE PLASTIC OF ELECTRICAL EQUIPMENT IN BELARUS*(Communicated by Academician Vladimir F. Loginov)*

Abstract. The problem of management of waste plastic of electronic and electrical equipment (EEE) is associated, on the one hand, with the increase in the volume of their formation and the “green” circulation economy requirements for recycling, and, on the other hand, with the hazardous substances contained in them, including persistent organic pollutants (POPs) and heavy metals. The article presents the measurement results of the content of pollutants in EEE plastic samples taken at the

enterprises for their collection and processing in Minsk. The content of heavy metals and bromine was determined in 40 plastic samples using X-ray fluorescence spectrometry, polybrominated biphenyls (PBBs) and of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) – in 19 samples using gas chromatography with mass spectrometric detection. It was shown that the content of lead was recorded in 40 % of samples (the maximum value is 259 mg/kg of plastic), of cadmium – 28 % (22 mg/kg), of chromium – 20 % (98 mg/kg); the content of mercury and PBB was found to be below the detection limit. PBDEs are contained in 7.5 % of samples in the range 246–6615 mg/kg. Decabromodiphenyl ether, a persistent organic pollutant, accounted for 89 to 96 % of the total PBDE. A high proportion of bromine-containing plastic (48 %) was revealed, which is consistent with the data of other countries. The need to carry out research in Belarus with the expansion of a list of analyzed pollutants in waste plastic and to develop the regulatory and technical base in relation to the management of waste plastic in accordance with the obligations of the Stockholm Convention on POPs is discussed.

Keywords: polybrominated diphenyl ethers, persistent organic pollutants, heavy metals, plastic waste

For citation. Kukharchyk T. I., Chernyuk V. D., Kulakovich V. P. Content of pollutants in waste plastic of electrical equipment in Belarus. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 2, pp. 224–233 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-2-224-233>

Введение. Отходам пластика электронного и электротехнического оборудования (ЭЭО) в последние годы уделяется значительное внимание в связи с увеличением объемов их образования и требованиями «зеленой» циркуляционной экономики к переработке отходов [1]. Одна из проблем вовлечения ценных вторичных ресурсов в оборот, к которым относится пластик, заключается в его загрязнении опасными веществами. К настоящему времени получены доказательства экологических угроз, связанных с переработкой загрязненных отходов ЭЭО и обусловленных загрязнением компонентов природной среды опасными веществами в местах их сбора и переработки [2], а также их поступлением в производимые товары при вторичной переработке, включая детские игрушки [3; 4].

Как известно, при производстве пластика для придания ему требуемых свойств использовались и используются различные химические препараты, в том числе антипирены, пластификаторы, стабилизаторы, антиоксиданты, наполнители, красители и др. Среди химических веществ, которые содержатся или потенциально могут содержаться в пластике, особую обеспокоенность вызывают стойкие органические загрязнители, прежде всего полибромдифениловые эфиры (ПБДЭ), и тяжелые металлы, содержание которых в готовых изделиях в странах ЕС регламентируется Директивой REACH, в странах СНГ – Технологическим регламентом ТР ЕАЭС 037/2016, введенным в действие 01.03.2018.

Считается, что полимерные изделия практически любых электробытовых приборов, офисной и канцелярской техники могут содержать ПБДЭ [5; 6], а также тяжелые металлы [7; 8]. На различных этапах жизненного цикла полимерных материалов и изделий из них возможна эмиссия и/или выщелачивание загрязняющих веществ и их поступление в окружающую среду. Однако именно отходы ЭЭО по истечении срока службы изделий являются наиболее важным источником опасных веществ.

В Беларуси, как и многих других странах, объемы сбора и переработки отходов ЭЭО увеличиваются: в 2019 г. они составили 21,8 тыс. т, что почти в 1,5 раза больше по сравнению с предыдущим годом и почти в 10 раз – за последние 5 лет [9]. Вместе с тем пока крайне недостаточно информации о содержании загрязняющих веществ в отходах пластика. Имеющиеся единичные исследования [4; 10] подтвердили присутствие в составе пластика ПБДЭ. Опубликованных данных о содержании тяжелых металлов в пробах пластика не обнаружено.

В связи с этим изучение содержания загрязняющих веществ в отходах пластика ЭЭО, поступающего на вторичную переработку в Беларуси, представляется весьма актуальной задачей как необходимый элемент разработки и принятия природоохранных решений с целью минимизации негативных последствий.

Материалы и методы исследования. *Отбор проб.* Пробы отходов пластика отбирались на двух предприятиях по сбору и переработке ЭЭО (Минск, Беларусь). Основное внимание на данном этапе исследований уделялось образцам корпусов телевизоров и мониторов с электронно-лучевой трубкой (ЭЛТ), в которых, по данным [6], наиболее часто обнаруживаются бромированные антипирены. Всего было отобрано 40 проб, из которых 11 представляли мониторы с ЭЛТ, 10 – телевизоры с ЭЛТ, 9 – принтеры. В меньшей степени на данном этапе исследований представлены другие виды электронного оборудования (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Основные параметры образцов пластика для определения брома, тяжелых металлов и ПБДЭ

Table 1. The main parameters of plastic samples for the determination of bromine, heavy metals and PBDEs

Тип оборудования Equipment type	Количество проб Number of samples	Регион производства Region of manufacture	Марка оборудования Equipment brand	Год производства Year of manufacture	
Адаптер AC-DC	1	Восточная Азия	AC-DC	Нет данных	
Блок бесперебойного питания	3	Восточная Азия	Powerex, Konica Minolta	2009–2011	
Картридж	1	Нет данных	HP	Нет данных	
Монитор с ЭЛТ	11	Восточная Азия	LG, LOC, Samtron, Samsung, ViewSonic	1998–2004	
	1	Юго-Восточная Азия	Samtron	2003	
	1	Северная Америка	Hyundai	2000	
	1	Центральная Европа	Samtron	2003	
Ноутбук	2	Нет данных	Samsung	1998	
Принтер	2	Восточная Азия	Acer, HP	2001	
	9	6	Восточная Азия	Epson, Canon, Xerox, HP, Samsung	1990–2008
		1	Юго-Восточная Азия	HP	2004
	2	Западная Европа	HP, Digital	1998, 1999	
CD-дисковод	2	Восточная Азия	Нет данных	1997	
Телевизор с ЭЛТ	10	2	Центральная Европа	Finale, Philips	1987–2006
		3	Восточная Европа	Витязь, Горизонт	1998
		1	Северо-Западная Европа	Philips	Нет данных
		4	Бывший СССР	Рассвет, Горизонт, Сапфир, Selena, Terfon	1988–1991
Факсимильный аппарат	1	Юго-Восточная Азия	Panasonic	2011	

Одна проба формировалась из одной детали готового изделия и не смешивалась с другими деталями. Для каждой пробы оформлялся протокол, в котором указывалась доступная информация об изделии, с которого отобрана проба (название, производитель, марка, год производства, цвет пластика). При наличии маркировки на изделиях отмечался тип пластика и содержание в полимерных материалах антипиреновой добавки.

Пробы доставлялись в лабораторию, где осуществлялась их дальнейшая подготовка. Из каждой пробы вырезались фрагменты размером 3×4 , 3×5 см, которые упаковывались в пакеты с номером и передавались для химико-аналитических работ.

Определение тяжелых металлов и брома в пластике. Определение содержания тяжелых металлов (Pb, Cd, Hg и Cr) и брома осуществлялось с помощью рентгенофлуоресцентной спектроскопии в соответствии с ГОСТ ИЕС 62321-3-1–2016. Проба с плоской поверхностью помещалась в камеру энергодисперсионного спектрометра Horiba MESA 50V3. Расшифровка рентгеновского спектра осуществлялась программным обеспечением автоматически с учетом выбранного перечня элементов. Согласно [11], данный метод может использоваться в качестве эффективного экспресс-метода для выявления бромсодержащего пластика. Его преимущества заключаются в возможности быстрого определения содержания брома и других элементов в различных матрицах. Всего было проанализировано 40 образцов пластика.

Определение содержания ПБДЭ. Испытания на содержание полибромированных дифенилов (ПБД) и полибромдифениловых эфиров (ПБДЭ) проводились для образцов, в которых скрининг-метод показал наличие брома (19 проб). ПББ и ПБДЭ определялись методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ/МС) с использованием газового хроматографа Young Lin Instruments YL6500 GS/MS с масс-спектрометром в соответствии с СТБ ИЕС 62321:2012.

Результаты и их обсуждение. Анализ полученных данных показал, что 95 % проб не имеют маркировки используемых антипиренов, а маркировка на оставшихся 5 % образцов указывает лишь на наличие антипирена без уточнения его типа.

Распределение отобранных проб по производителям показало, что примерно 60 % оборудования было произведено в странах Восточной и Юго-Восточной Азии. На долю бывшего СССР приходится 18 % проанализированного оборудования, стран Европы – 15 %. Для 5 % оборудования отсутствовала информация о стране-производителе.

Из 40 отобранных проб 35 % приходилось на пластик черного цвета, 35 % – пластик молочного (белого) цвета и 30 % – пластик серого цвета.

Результаты химико-аналитического определения содержания тяжелых металлов, брома и ПБДЭ представлены в табл. 2 (содержание ртути и ПБД оказалось ниже предела обнаружения).

Т а б л и ц а 2. Содержание тяжелых металлов, брома и ПБДЭ в пластике различных типов ЭЭО, отобранных на предприятиях Беларуси

Table 2. Content of heavy metals, bromine and PBDEs in plastics of various types of EEE, collected in Belarus

Тип оборудования Equipment type	Количество проб Number of samples	Pb		Cd		Cr		Br		ПБДЭ	
		мг/кг	% ¹	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%
Адаптер AC-DC	1	н. о.	0	н. о.	0	н. о.	0	1129	100	н. о.	–
Блок бесперебойного питания	3	н. о. – 68	67	н. о. – 15	67	н. о. – 81	33	1882 – 41466	100	н. о. – 246	33
Картридж	1	н. о.	0	н. о.	0	н. о.	0	н. о.	0	–	–
Монитор с ЭЛТ	11	н. о. – 259	45	н. о. – 22	36	н. о. – 98	45	н. о. – 36641	55	н. о.	–
Ноутбук	2	н. о. – 52	50	н. о. – 21	50	н. о.	0	н. о. – 36671	50	н. о.	–
Принтер	9	н. о. – 47	22	н. о. – 15	22	н. о.	0	н. о. – 43381	33	н. о.	–
CD-дисковод	2	93 – 102	100	н. о. – 15	50	н. о. – 26	50	35215 – 35579	100	н. о.	–
Телевизор с ЭЛТ	10	н. о. – 164	30	н. о. – 14	10	н. о.	0	н. о. – 29411	30	н. о. – 6615	20
Факсимильный аппарат	1	94	100	н. о.	0	77	100	н. о.	0	–	–

Примечание: ¹ – доля проб, содержащих загрязняющее вещество.

Note: ¹ – the proportion of samples containing the pollutant.

Содержание тяжелых металлов. Pb обнаружен в 40 % случаев в концентрации от ниже предела обнаружения метода до 259 мг/кг. Pb встречается в 45 % проб мониторов и в 30 % проб телевизоров с ЭЛТ, в 22 % принтеров. Свинец содержится в пластике проанализированных CD-дисководов и факсимильного аппарата, в 2 (из 3 проанализированных) пробах блоков бесперебойного питания, в одной пробе пластика ноутбука. В пробах адаптера AC-DC и картриджей принтера свинец находится ниже предела обнаружения. Не выявлено существенных различий в содержании свинца в пластике в зависимости от его цвета.

Максимальные содержания Pb выявлены в пластике устройств с ЭЛТ-экранами (монитор ViewSonic – 259 мг/кг, телевизор TERFON – 163 мг/кг). Самые низкие концентрации свинца были обнаружены в пластике ЭЛТ телевизора Finale (37 мг/кг) и блока бесперебойного питания Powerex (40 мг/кг). Пробы пластика принтеров также характеризовались низким содержанием свинца в своем составе – 47 мг/кг.

Содержание Cd в пробах пластика находилось в концентрациях от н. о. до 22 мг/кг. Данный элемент обнаружен в 11 образцах пластика, что составило 27,5 % от их общего количества. Концентрации кадмия незначительно различаются в пробах различных типов оборудования.

Хром (Cr) обнаружен в 8 из 40 проанализированных проб (20 %). Концентрации изменяются в пределах от н. о. до 98 мг/кг. Хром обнаружен в 5 пробах мониторов с ЭЛТ, пластика CD-дисковода, факсимильного аппарата (77 мг/кг) и пробе блока бесперебойного питания.

Из тяжелых металлов в пробах пластика в более высоких концентрациях и наиболее часто встречается свинец, за ним следует кадмий и затем хром. По данным [12], тяжелые металлы используются в составе красителей, антиоксидантов и стабилизаторов. При этом их концентрации при производстве первичного пластика могут варьировать в достаточно большом диапазоне: от 0,05 до 3 % при использовании их в составе стабилизаторов, и от 0,01 до 10 % – в составе пиг-

ментов [12]. Зафиксированные нами содержания тяжелых металлов находятся ниже минимальных значений, за исключением нескольких случаев содержания свинца.

Содержание брома и ПБДЭ. Содержание Br находится в диапазоне от значений ниже предела обнаружения до 43381 мг/кг. Бром обнаруживается в 48 % проанализированных проб. Наиболее часто бромсодержащий пластик встречается в мониторах с ЭЛТ – 55 %, ноутбуках – 50 %, принтерах – 33 % и телевизорах с ЭЛТ – 30 %. Бром не обнаружен в пластике картриджа принтера (1 образец) и факсимильного аппарата (1 образец).

Бром как индикатор применения бромированных антипиренов обнаруживается почти в половине всех проб, что согласуется с предварительными результатами качественного определения присутствия брома в пробах пластика. По данным [10], из 111 проанализированных проб бром был зафиксирован в 43 % случаев. Практически во всех случаях бром содержится в АБС-пластике, который наиболее широко применяется для производства ЭЭО. Для сравнения отметим, что, например, в Великобритании на долю бромсодержащего пластика приходится 42 % от общего количества проб (267) электронного оборудования [13].

Полученные данные позволяют сделать предварительные выводы о наиболее часто встречающемся бромсодержащем пластике в составе ЭЭО, произведенного в странах Восточной и Юго-Восточной Азии (рис. 1, *a*). Доля бромсодержащего пластика в оборудовании, произведенном в бывшем СССР, оценивается в 29 %. Несомненно, производитель оборудования не означает производителя пластика, поскольку ЭЭО может изготавливаться из импортируемых деталей и/или сырьевых материалов. Результаты исследований важны для понимания путей поступления в Беларусь пластика, содержащего опасные вещества: как собственно с пластиком, так и в составе оборудования.

Примерно одинакова частота обнаружения брома в пластике черного, серого и молочного цвета, хотя по данным [13] доля бромсодержащего пластика среди деталей, окрашенных в черный цвет, выше.

Группировка проанализированных проб пластика ЭЭО в зависимости от периода производства показала, что бромсодержащий пластик чаще всего обнаруживается в оборудовании, произведенном в 1991–2000 гг. (рис. 1, *b*). Данное распределение может носить случайный характер, поскольку применение бромированных антипиренов не ограничено временными рамками; основные изменения в отношении антипиренов на основе СОЗ произошли в 2004–2005 гг., когда было прекращено производство коммерческих пентабромдифенилового эфира и октабромдифенилового эфира. Однако производство и применение декабромдифенилового эфира продолжалось; существенные ограничения приняты лишь в 2017 г. и связаны с включением данного соединения в Приложение А Стокгольмской конвенции о СОЗ.

Зависимость содержания загрязняющих веществ в пластике. В 43 % всех проанализированных проб присутствовали как тяжелые металлы, так и бром. В 12 % проб присутствовали либо тяжелые металлы, либо бром. В 45 % проб не было выявлено ни одного из анализируемых

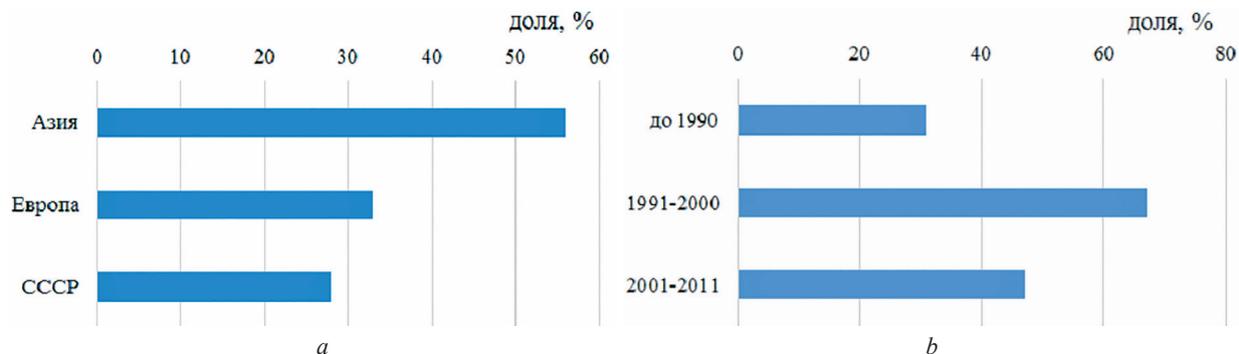


Рис. 1. Доля проб бромсодержащего пластика ЭЭО в зависимости от региона производства (*a*) и периода производства (*b*)

Fig. 1. The share of samples of bromine-containing plastic EEE, depending on the region of production (*a*) and the period of production (*b*)

веществ. Представленная на рис. 2 взаимосвязь содержания свинца и кадмия, свинца и хрома, а также брома и тяжелых металлов не подтверждается статистически, что может быть обусловлено небольшой выборкой проб. Однако существование такой связи не исключается; в [13] показана линейная зависимость содержания свинца и сурьмы от содержания брома.

Сравнение с другими данными. Сравнение результатов определения брома и тяжелых металлов в пробах пластика ЭЭО, отобранных на предприятиях в Беларуси, с опубликованными данными для других стран представлено в табл. 3.

Полученные результаты содержания Pb сопоставимы с результатами, полученными [7; 8] и др. Значительно более высокие значения отмечаются в исследованиях [6; 14].

Содержание Cd и Cr было значительно ниже, чем концентрации данных веществ в большинстве других исследований. Уровни хрома были сопоставимы с данными [8].

Концентрации Br в отходах ЭЭО, отобранных в Беларуси, близки к тем, которые были измерены [8; 14]. Низкие концентрации Br, зафиксированные в пробах ударопрочного полистирола (HIPS) телевизоров, соответствует наблюдениям [14], где показано, что такой материал в основном не содержит бромированных антипиренов. Существенно выше концентрации с максимальными значениями брома до 92–172 г/кг были получены в ходе широкомасштабных исследований в Австралии [5], Нигерии [6], Великобритании [13].

ПБДЭ из 19 проанализированных бромсодержащих проб обнаружен в 3 случаях в концентрации 246–6615 мг/кг. Максимальное содержание характерно для телевизора с ЭЛТ марки TERFON (производитель СССР). Во всех случаях основной вклад (89–96 %) в суммарное содержание ПБДЭ обеспечивал декабромдифениловый эфир.

Необходимо подчеркнуть, что на фоне высокой доли бромсодержащего пластика отмечается низкая доля проб, содержащих ПБДЭ (3 пробы из 19 проанализированных). В Германии, например, ПБДЭ были зафиксированы в 40 % проанализированных проб [14], в Нигерии – в 20 % [6].

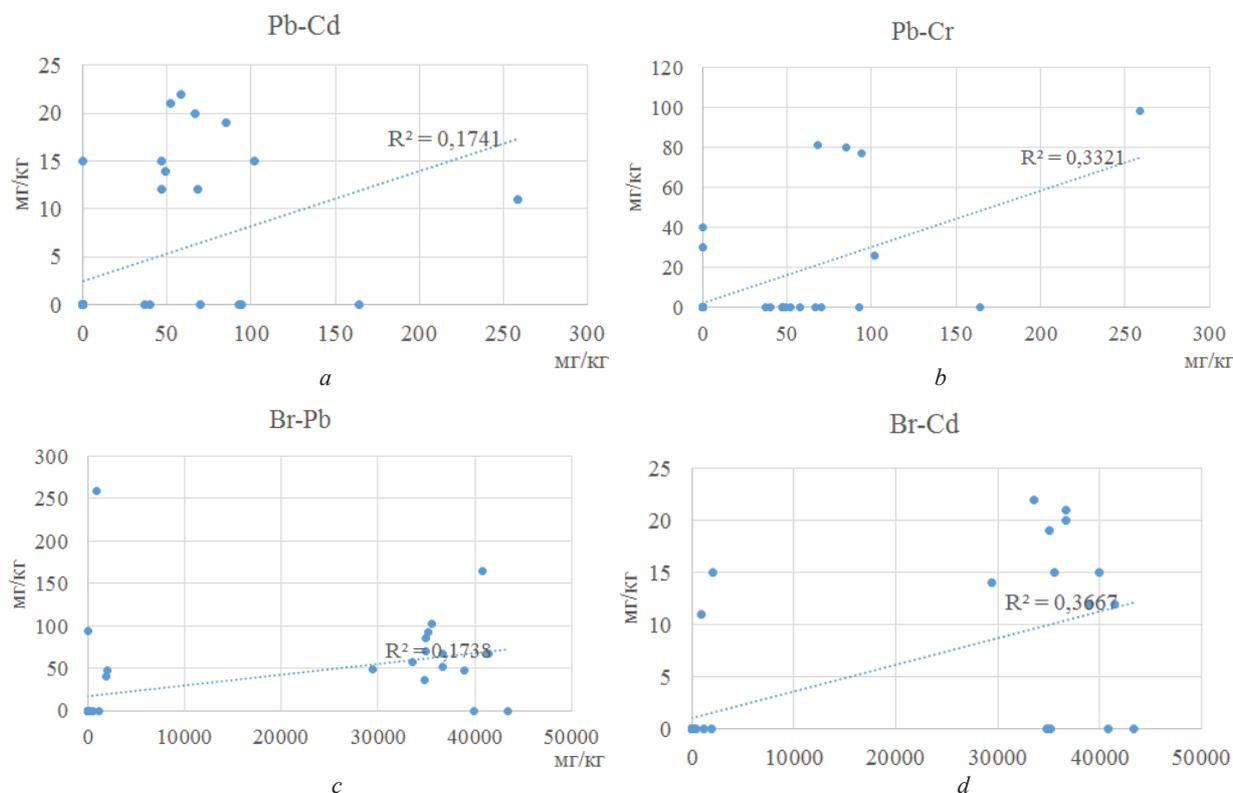


Рис. 2. Зависимость содержания Cd и Cr от содержания Pb (a и b) и Pb и Cd от содержания брома Br (c, d)

Fig. 2. Dependence of the content of Cd and Cr on the content of Pb (a and b) and Pb and Cd on the content of bromine Br (c, d)

Т а б л и ц а 3. Сравнение результатов исследований содержания тяжелых металлов, брома и ПБДЭ в пробах пластика ЭЭО

T a b l e 3. Comparison of the results of studies of the content of heavy metals, bromine and PBDEs in plastic samples of EEE

Источник Reference	Анализируемый материал Analyzed material	Анализируемые элементы, мг/кг Analyzed elements, mg/kg									
		Br		Pb		Cd		Cr		ПБДЭ	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Исследование авторов	ОЭЭО ¹	н. о. ²	43381	н. о.	259	н. о.	22	н. о.	98	н. о.	6323
[14]	ОЭЭО	500	49000	150	2500	30	130	60	400	800	7400
[7]	ОЭЭО	5300 ³		34		38		100		–	
[5]	ОЭЭО	н. о.	172645	–	–	–	–	–	–	н. о.	16000
[15]			120532	0	206	0	257	0	456	0	83500
[8]	ОЭЭО	253	51319	н. о.	553	н. о.	75	1	38	–	
[6]	ОЭЭО	100	106000	<5	3000	<15	400	–	–	4740	

П р и м е ч а н и я: ¹ – ОЭЭО – отходы электронного и электротехнического оборудования; ² н. о. – ниже предела обнаружения; ³ – приводится среднее значение.

N o t e s: ¹ – OEEO – waste of electronic and electrical equipment; ² н. о. – below the detection limit; ³ – shows the average.

Возможно, это связано с содержанием других бромированных антипиренов, например, гексабромциклододекана, тетрабромбисфенола А и др.

Максимальное содержание суммы ПБДЭ (6,6 г/кг) в пластике телевизора с ЭЛТ хорошо согласуется с данным [14; 16]. Следует подчеркнуть, что содержание ПБДЭ в пластике может быть значительно выше и достигать десятков грамм на килограмм массы пластика, как это было подтверждено в [5; 6; 15]. Такие концентрации ПБДЭ, как правило, характерны в случаях изготовления оборудования из первичных полимерных материалов, в которых исходное содержание бромированных антипиренов варьирует от 3 до 25 % их общей массы [12]. При содержании брома и ПБДЭ в пластике на уровне менее 3 % считается, что он изготовлен из вторичного сырья или с его применением [15]. При совместном использовании чистого и загрязненного пластика происходит разбавление концентраций химических веществ.

В целом полученные результаты показали, что содержание ПБДЭ и тяжелых металлов в изделиях ЭЭО, отобранных на предприятиях Беларуси, существенно ниже предельных значений, установленных Директивой RoHS и Техническим регламентом (0,1 % для ПБДЭ, 0,1 % для свинца и хрома, 0,01 % для кадмия и ртути). Это может быть связано с непреднамеренным поступлением указанных веществ в состав пластика за счет использования загрязненного сырья. Однако зафиксированные уровни тяжелых металлов в отходах пластика существенно выше их содержания в почве, куда могут поступать загрязненные частицы пластика ЭЭО в местах демонтажа оборудования и его переработки. Значительно выше содержание тяжелых металлов в пластике также по отношению к установленным для почв предельно допустимым концентрациям: например, свинца – в 1,2–8 раз, кадмия – в 22–44 раз. Следует добавить, что помимо пластика, тяжелые металлы используются в других деталях ЭЭО (электронно-лучевых трубках, печатных платах, припоях и др.). Высокие уровни загрязнения почв, зафиксированные в зонах влияния сбора и переработки отходов ЭЭО в Китае, подтверждают важность данного источника загрязнения [2].

Как известно, в глобальном масштабе было произведено около 1,5 млн т ПБДЭ [17] и их использование в качестве антипирена привело к загрязнению огромного количества полимерных материалов в различных типах оборудования. Отсутствие в большинстве случаев маркировки, широкий спектр производимого оборудования, длительный период применения бромированных антипиренов на основе СОЗ – эти и другие факторы затрудняют выявление загрязненного пластика. Пока нет согласованных на международном уровне предельных значений содержания

ПБДЭ в отходах для отнесения их к СОЗ-содержащим: рассматриваются значения в 50 мг/кг или 1000 кг [17]. Рекомендованная мера по выделению и изъятию из общего потока пластика, содержащего бром, считается экономически и технически оправданной на данном этапе [11]. Вместе с тем, согласно [17], переработка и удаление материалов, содержащих ПБДЭ, относящиеся к СОЗ, требуют целостного подхода, учитывающего наличие других загрязнителей помимо СОЗ (тяжелых металлов, озоноразрушающих веществ), вероятность их высвобождения и эмиссии при переработке и удалении, а также факторы риска, сопряженные с поступлением опасных веществ в окружающую среду.

Заключение. Результаты химико-аналитических испытаний 40 проб пластика, отобранных на предприятиях в Беларуси, подтверждают присутствие опасных веществ в отходах, поступающих на вторичную переработку. Установлено, что Вг содержится почти в половине проанализированных проб, Рb – в 40 %, Cd – в 28 %, Cr – в 20 %, ПБДЭ – в 7,5 % проб. Нг и ПБД не обнаружены. В большинстве проб, содержащих бром, присутствует также свинец.

ПБДЭ обнаружен в 3 случаях (7,5 % общего количества проб) в концентрации 246–6615 мг/кг, в том числе в 2 пробах пластика телевизоров с ЭЛТ. Это подтверждает необходимость повышенного внимания к данному типу оборудования. Во всех случаях доминировал декабромдифениловый эфир, объемы и период применения которого значительно больше по сравнению с другими антипиренами на основе ПБДЭ.

Показано, что значительная часть отходов пластика ЭЭО, образующегося в Беларуси, поступает с готовыми изделиями из стран Восточной и Юго-Восточной Азии, в которых наиболее часто обнаруживается бромсодержащий пластик, подлежащий регулированию. Также установлено, что пластик ЭЭО, произведенных в бывшем СССР, также содержит опасные вещества.

Ограниченное количество проанализированных образцов дает лишь общее представление о ситуации с содержанием опасных веществ в пробах пластика ЭЭО. Как и в других странах не исключается присутствие ПБДЭ и тяжелых металлов в более высоких концентрациях, а также содержание других опасных веществ, в том числе относящихся к СОЗ. Полученные данные подтверждают актуальность развития исследований с расширением перечня загрязняющих веществ для оценки техногенных потоков, подлежащих регулированию в соответствии с обязательствами по Стокгольмской конвенции о СОЗ. Актуальными представляются исследования в зонах воздействия предприятий по сбору и демонтажу отходов ЭЭО.

Список использованных источников

1. Wagner, S. Legacy additives in a circular economy of plastics: Current dilemma, policy analysis, and emerging countermeasures / S. Wagner, M. Schlummer // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2020. – Vol. 158. – P. 104800. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104800>
2. Heavy metals in soil contaminated through e-waste processing activities in a recycling area: Implications for risk management / Y. Han [et al.] // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2019. – Vol. 125. – P. 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.03.020>
3. Screening for halogenated flame retardants in European consumer products, building materials and wastes / Š. Vojta [et al.] // *Chemosphere*. – 2017. – Vol. 168. – P. 457–466. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.032>
4. Straková, J. Toxic LOOPHOLE: Recycling Hazardous Waste into New Products / J. Straková, J. DiGangi, G. K. Jensen. – Arnika, 2018. – 40 p.
5. Towards development of a rapid and effective non-destructive testing strategy to identify brominated flame retardants in the plastics of consumer products / C. Gallen [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2014. – Vol. 491–492. – P. 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.074>
6. Polybrominated diphenyl ethers listed as Stockholm Convention POPs, other brominated flame retardants and heavy metals in e-waste polymers in Nigeria / O. Sindiku [et al.] // *Environ Sci. Pollut. Res.* – 2014. – Vol. 22(19). – P. 14489–501. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3266-0>
7. Small WEEE: Determining recyclables and hazardous substances in plastics / E. Dimitrakakis [et al.] // *J. Hazard. Mater.* – 2009. – Vol. 161, N 2–3. – P. 913–919. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.054>
8. Haarman, A. Managing hazardous additives in WEEE plastic from the Indian informal sector. A study on applicable identification & separation methods / A. Haarman, M. Gasser. – India, 2016. – 68 p.
9. Дополнение в отчет Оператора за 2019 год – Объемы использования вторичных материальных ресурсов в Республике Беларусь в 2019 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vtoroperator.by/content/dopolnenie-v-otchet-operatora-za-2019-god>. – Дата доступа: 18.02.2021.

10. Kukharchyk, T. Polybrominated diphenyl ethers in plastic waste of electrical and electronic equipment: a case study in Belarus / T. Kukharchyk, P. Příbylová, V. Chernyuk // *Environ. Sci. Pollut. Res.* – 2020. – Vol. 27, N 25. – P. 32116–32123. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09670-8>

11. Draft Guidance on Sampling, Screening and Analysis of Persistent Organic Pollutants in Products and Articles. Relevant to substances listed in Annexes A, B and C of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants from 2009 to 2015. – 2017. – 147 p. [Electronic resource]. – Mode of access: <http://chm.pops.int/Default.aspx?tabid=5333>.

12. Hansen, E. Hazardous substances in plastics. Survey of chemical substances in consumer products / E. Hansen, N. Nillson, K. S. R. Vium; The Danish Environmental Protection Agency. – Denmark, 2014. – N 132. – 182 p.

13. Turner, A. Bromine in plastic consumer products – Evidence for the widespread recycling of electronic waste / A. Turner, M. Filella // *Science of the Total Environment*. – 2017. – Vol. 601–602. – P. 374–379. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.173>

14. Characterisation of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) and implications for waste management / M. Schlummer [et al.] // *Chemosphere*. – 2007. – Vol. 67. – P. 1866–1876. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.05.077>

15. Analysis of polybrominated diphenyl ether and tetrabromobisphenol A in plastic samples in Mongolia / B. Bayarmaa [et al.] // *Mongolian Journal of Chemistry*. – 2014. – Vol. 15 (41). – P. 27–32. <https://doi.org/10.5564/mjc.v15i0.317>

16. Brominated flame retardants (BFRs) in waste electrical and electronic equipment (WEEE) plastics and printed circuit boards (PCBs) / Y. Chen [et al.] // *Procedia Environ. Sci.* – 2012. – Vol. 16. – P. 552–559. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.076>

17. Technical guidelines on the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with hexabromodiphenyl ether and heptabromodiphenyl ether, or tetrabromodiphenyl ether and pentabromodiphenyl ether or decabromodiphenyl ether. Addendum. Conference of the Parties to the Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal. Fourteenth meeting. UNEP/CHW.14/7/Add.3. – Geneva, 2019.

References

1. Wagner S., Schlummer M. Legacy additives in a circular economy of plastics: Current dilemma, policy analysis, and emerging countermeasures. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, vol. 158, p. 104800. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104800>

2. Han Y., Tang Z., Sun J., Xing X., Zhang M., Cheng J. Heavy metals in soil contaminated through e-waste processing activities in a recycling area: Implications for risk management. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, vol. 125, pp. 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.03.020>

3. Vojta Š., Bečanová J., Melymuk L., Komprdová K., Kohoutek J., Kukučka P., Klánová J. Screening for halogenated flame retardants in European consumer products, building materials and wastes. *Chemosphere*, 2017, vol. 168, pp. 457–466. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.032>

4. Straková J., DiGangi J., Jensen G. K. Toxic LOOPHOLE: Recycling Hazardous Waste into New Products. *Arnika*, 2018. 40 p.

5. Gallen C., Banks A., Brandsma S., Baduel C., Thai P., Eaglesham G., Heffernan A., Leonards P., Bainton P., Mueller J. F. Towards development of a rapid and effective non-destructive testing strategy to identify brominated flame retardants in the plastics of consumer products. *Science of the Total Environment*, 2014, vol. 491–492, pp. 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.074>

6. Sindiku O., Babayemi J., Osibanjo O., Schlummer M., Schluep M., Watson A., Weber R. Polybrominated diphenyl ethers listed as Stockholm Convention POPs, other brominated flame retardants and heavy metals in e-waste polymers in Nigeria. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, vol. 22, no. 19, pp. 14489–14501. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3266-0>

7. Dimitrakakis E., Janz A., Bilitewski B., Gidararakos E. Small WEEE: Determining recyclables and hazardous substances in plastics. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 161, no. 2–3, pp. 913–919. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.054>

8. Haarman A., Gasser M. *Managing hazardous additives in WEEE plastic from the Indian informal sector. A study on applicable identification & separation methods*. India, 2016. 68 p.

9. Supplement to the Operators report for 2019 – Volumes of use of secondary material resources in the Republic of Belarus in 2019. Available at: <https://vtoroperator.by/content/dopolnenie-v-otchet-operatora-za-2019-god> (accessed 18 February 2021).

10. Kukharchyk T., Příbylová P., Chernyuk V. Polybrominated diphenyl ethers in plastic waste of electrical and electronic equipment: a case study in Belarus. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, no. 25, pp. 32116–32123. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09670-8>

11. *Draft Guidance on Sampling, Screening and Analysis of Persistent Organic Pollutants in Products and Articles. Relevant to substances listed in Annexes A, B and C of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants from 2009 to 2015*. 2017. 147 p. Available at: <http://chm.pops.int/Default.aspx?tabid=5333>.

12. Hansen E., Nillson N., Vium K. S. R. *Hazardous substances in plastics. Survey of chemical substances in consumer products. No. 132, The Danish Environmental Protection Agency*. Denmark, 2014. 182 p.

13. Turner A., Filella M. Bromine in plastic consumer products – Evidence for the widespread recycling of electronic waste. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 601–602, pp. 374–379. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.173>

14. Schlummer M., Gruber L., Mäurer A., Wolz G., van Eldik R. Characterisation of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) and implications for waste management. *Chemosphere*, 2007, vol. 67, no. 9, pp. 1866–1876. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.05.077>

15. Bayarmaa B., Gan-Erdene T., Weber R., Jargalsaikhan L. Analysis of polybrominated diphenyl ether and tetrabromobisphenol A in plastic samples in Mongolia. *Mongolian Journal of Chemistry*, 2014, vol. 15, no. 41, pp. 27–32. <https://doi.org/10.5564/mjc.v15i0.317>

16. Chen Y., Li J., Chen L., Chen S., Diao W. Brominated flame retardants (BFRs) in waste electrical and electronic equipment (WEEE) plastics and printed circuit boards (PCBs). *Procedia Environmental Science*, 2012, vol. 16, pp. 552–559. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.076>

17. *Technical guidelines on the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with hexabromodiphenyl ether and heptabromodiphenyl ether, or tetrabromodiphenyl ether and pentabromodiphenyl ether or decabromodiphenyl ether*. Addendum. Conference of the Parties to the Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal. Fourteenth meeting. UNEP/CHW.14/7/Add.3. Geneva, UNEP, 29 April–10 May 2019.

Информация об авторах

Кухарчик Тамара Иосифовна – д-р геогр. наук, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tkukharchyk@gmail.com.

Чернюк Владимир Дмитриевич – мл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: chernyuk.vladimir.m@mail.ru.

Кулакович Виктор Петрович – вед. инженер. 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 for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tkukharchyk@gmail.com.

Chernyuk Vladimir D. – Junior researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chernyuk.vladimir.m@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.