

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCES

УДК 504.05+504.064
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-6-493-503>

Поступило в редакцию 20.09.2024
Received 20.09.2024

В. Д. Чернюк, Т. И. Кухарчик

Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**ХИМИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА В ПЛАСТМАССАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
И ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ВТОРИЧНОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ**

(Представлено академиком В. Ф. Логиновым)

Аннотация. В составе пластмасс электрического и электронного оборудования содержатся различные химические вещества, которые вводятся на этапе их производства с антипиренами, стабилизаторами, красителями и другими добавками для придания необходимых свойств. Среди опасных веществ особую обеспокоенность вызывают полибромдифениловые эфиры (ПБДЭ), которые являются стойкими органическими загрязнителями (СОЗ). Обсуждаются результаты химико-аналитических испытаний отходов пластмасс электрического и электронного оборудования (ЭЭО) и впервые полученные для Беларуси оценки объемов образования отходов, подлежащих экологически безопасному обращению в соответствии с обязательствами по Стокгольмской конвенции о СОЗ. ПБДЭ определялись с использованием газовой хроматографии в бромсодержащих пластмассах (281 проба), бром – с использованием рентгенофлуоресцентной спектрометрии (760 проб). Показано, что бром обнаружен в 37 % случаев, ПБДЭ – в 31 % проб бромсодержащих пластмасс либо в 11,4 % общего их количества. Максимальные концентрации ПБДЭ достигают 12–17 % по массе. По встречаемости ПБДЭ в пластмассах ЭЭО ранжированы следующим образом: мониторы и телевизоры – 15,4 % случаев, крупногабаритная бытовая техника – 14 %, ИТ и телекоммуникационное оборудование – 11,7 %, копировальное оборудование – 6,9 %, мелкогабаритная бытовая техника – 3 %. По состоянию на 2022 г. объем отходов пластмасс ЭЭО, содержащих бромированные антипирены, оценивается в 5,5 тыс. т, из которых около 65 % подлежат экологически безопасному удалению. Более 70 % отходов, содержащих ПБДЭ, представлены пластмассами мониторов и телевизоров. Обсуждаются меры по улучшению системы сбора ЭЭО и необходимость сепарации отходов пластмасс ЭЭО при их вторичной переработке с целью предотвращения рециркуляции опасных веществ.

Ключевые слова: отходы пластмасс, полибромдифениловые эфиры, стойкие органические загрязнители, бромсодержащий пластик

Для цитирования. Чернюк, В. Д. Химические вещества в пластмассах электрического и электронного оборудования и проблемы вторичного использования отходов / В. Д. Чернюк, Т. И. Кухарчик // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 6. – С. 493–503. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-6-493-503>

Vladimir D. Chernyuk, Tamara I. Kukharchyk

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

**CHEMICAL SUBSTANCES IN PLASTICS OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT
AND WASTE RECYCLING PROBLEMS**

(Communicated by Academician Vladimir F. Loginov)

Abstract. The plastics of electrical and electronic equipment (EEE) contain various chemicals that are introduced during production with flame retardants, stabilizers, dyes and other additives to impart the necessary properties. Among the hazardous substances, polybrominated diphenyl ethers (PBDEs), which are persistent organic pollutants (POPs), are of particular concern. The article discusses the results of chemical and analytical tests of EEE plastic waste and the first estimates

for Belarus of the volumes of waste generation subject to environmentally sound management in accordance with the obligations of the Stockholm Convention on POPs. PBDEs were determined using gas chromatography in bromine-containing plastics (281 samples), bromine – using X-ray fluorescence spectrometry (760 samples). It was shown that bromine was detected in 37 % of cases, PBDEs – in 31 % of samples of bromine-containing plastics or in 11.4 % of their total amount. The maximum concentrations of PBDEs reach 12–17 % by weight. In terms of PBDEs occurrence in EEE plastics, they are ranked as follows: monitors and TVs – 15.4 % of cases, large household appliances – 14 %, IT and telecommunications equipment – 11.7 %, copying equipment – 6.9 %, small household appliances – 3 %. As of 2022, the volume of EEE plastic waste containing brominated flame retardants is estimated at 5.5 thousand tons, of which about 65 % is subject to environmentally sound management. More than 70 % of PBDE-containing waste is represented by monitor and TV plastics. Measures to improve the EEE collection system and the need to separate EEE plastic waste during their recycling in order to prevent the recycling of hazardous substances are discussed.

Keywords: plastic waste, polybrominated diphenyl ethers, persistent organic pollutants, bromine-containing plastic, ecological sound management

For citation. Chernyuk V. D., Kukharchyk T. I. Chemical substances in plastics of electrical and electronic equipment and waste recycling problems. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 6, pp. 493–503 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-6-493-503>

Введение. Увеличение использования различных видов электронных устройств сопровождается неуклонным ростом отходов, объемы образования которых в 2022 г. достигли 62 млрд т в глобальном масштабе [1]. При этом сбор и переработка таких отходов экологически безопасным способом составляет около 22 %. Одним из лимитирующих факторов использования отходов электрического и электронного оборудования (ЭЭО) в качестве вторичного сырья является содержание широкого спектра загрязняющих веществ [2]. В пластмассах это в первую очередь полибромдифениловые эфиры (ПБДЭ) и тяжелые металлы, которые предназначены для улучшения потребительских свойств полимеров с учетом назначения. ПБДЭ, которые широко использовались в качестве антипирена, в связи с их устойчивостью к разложению, способностью к биоаккумуляции и трансграничному переносу признаны стойкими органическими загрязнителями (СОЗ) и включены в Стокгольмскую конвенцию. Согласно Стокгольмской конвенции, все запасы ПБДЭ в составе отходов должны быть выявлены и удалены экологически безопасным способом.

Несмотря на то что производство антипиренов на основе ПБДЭ запрещено или сильно ограничено, значительные объемы данных загрязнителей содержатся в изделиях, находящихся в использовании, а также в их отходах по окончании срока службы [3; 4]. Более того, подтверждено присутствие ПБДЭ и других бромированных антипиренов в потребительских товарах, изготовленных из вторичного сырья [5; 6]. Выполненные к настоящему времени работы по оценке техногенных потоков бромсодержащих отходов свидетельствуют о необходимости их извлечения из общего потока и принятия мер по утилизации [3; 7; 8].

В Беларуси сбор отходов ЭЭО начат с 2013 г. и к 2023 г. объемы сбора составили 23,04 тыс. т [9]. Следует отметить, что официальный учет отходов ЭЭО в Беларуси касается лишь той их части, которая поступает на переработку. На момент постановки данных исследований в стране было выполнено лишь предварительное изучение [10], которое подтвердило актуальность продолжения исследований с целью предотвращения рециркуляции опасных веществ и поступления в новые изделия или рассеяния в окружающей среде.

Цель работы – оценка содержания ПБДЭ в отходах пластмасс различных категорий ЭЭО, образующихся в Беларуси, и объемов образования отходов, подлежащих экологически безопасному обращению.

Материалы и методы исследования. Отбор проб отходов пластмасс ЭЭО выполнен на производственных площадках, занимающихся сбором и разборкой ЭЭО и расположенных в Минске, Вилейке, д. Станок-Водица (Смолевичский р-н) и п. Чисть (Молодечненский р-н). Отбирались образцы пластика всех категорий ЭЭО, в том числе крупногабаритной бытовой техники (14,9 % от общего количества отобранных проб), мелкогабаритной бытовой техники (13,8 %), ИТ и телекоммуникационного оборудования (21,5 %), копировального оборудования (16,5 %), мониторов и телевизоров (30,4 %). Дополнительно были отобраны пробы отходов полимерных материалов различных типов ЭЭО, прошедших процедуру дробления на шредерной дробилке, а также сырье полистирола и продукция из него. Общее количество отобранных проб пластмасс составило 760.

Отбор проб пластика ЭЭО осуществлялся с учетом рекомендаций и процедур, изложенных в стандартах ИЕС 62321-2:2013, ГОСТ ИЕС 62321-2-2016, которыми предусматривается демонтаж оборудования до основных компонентов и узлов сборки. Процедура отбора проб полимерных материалов включала в себя непосредственно отбор пробы полимерных материалов стандартными инструментами, присвоение инвентаризационного номера пробе, фотографирование пробы и заполнение протокола отбора проб. Примеры отобранных проб пластмасс приведены на рис. 1.



Рис. 1. Примеры проб пластмасс различных типов ЭЭО: *a–c* – телевизор с электронно-лучевой трубкой (ЭЛТ), *d* – монитор с ЭЛТ, *e, f* – пылесос, *g* – кухонный комбайн, *h* – смешанная проба измельченных пластмасс, *i* – смешанная проба разноцветных пластмассовых гранул, *j* – внутренние детали персонального компьютера (ПК), *k* – кулер ноутбука, *l* – внутренние детали электрочайника

Fig. 1. Examples of samples of plastics of different types of EEE: *a–c* – CRT TV, *d* – CRT monitor, *e, f* – vacuum cleaner, *g* – food processor, *h* – mixed batch of crushed plastics, *i* – mixed sample of multi-colored plastic granules, *j* – internal parts of a PC, *k* – laptop cooler, *l* – internal parts of an electric kettle

Определение содержания брома и тяжелых металлов (свинца, хрома, кадмия и ртути) осуществлялось с помощью рентгенофлуоресцентной спектрометрии в соответствии с ГОСТ ИЕС 62321-3-1-2016. ПБДЭ определялись методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ/МС) в соответствии с СТБ ИЕС 62321-2012. Всего на содержание брома и тяжелых металлов было проанализировано 760 проб. ПБДЭ определялись в 281 пробе, в которых скрининг-метод показал наличие брома.

Для сравнения приняты предельные концентрации загрязняющих веществ в отходах ЭЭО, установленные европейской Директивой 2011/65/EU и техническим регламентом (ТР ЕАЭС 037/2016): свинца – 1 г/кг, кадмия – 0,1 г/кг, ртути – 1 г/кг, хрома – 1 г/кг, ПБДЭ – 1 г/кг. Для брома принято значение 2 г/кг согласно CLC/TS 50625-3-1:2015.

Для оценки объемов образования отходов пластмасс ЭЭО, содержащих бром и ПБДЭ, использованы методические подходы, изложенные в международном Руководстве по инвентаризации ПБДЭ [11], дополненные коэффициентами, учитывающими долю пластмассовых деталей, потенциально содержащих ПБДЭ, и встречаемость ПБДЭ в пластмассах ЭЭО различных категорий или отдельных устройств. Расчеты проводились по состоянию на 2022 г. За основу приняты данные Национального статистического комитета по обеспеченности населения предметами длительного пользования, справочные данные и результаты собственных экспериментальных исследований, касающихся оценки доли пластмассовых изделий в составе ЭЭО.

Результаты и их обсуждение. *Содержание загрязняющих веществ в отходах пластмасс ЭЭО.* Установлено, что, как и в других странах, отходы пластмасс, отобранные в Беларуси, содержат опасные загрязняющие вещества (табл. 1). Из общего количества проанализированных проб, бром обнаружен в 37 % случаев, свинец – в 27,6 %, хром – в 10,9 %, кадмий – в 8,4 %, ртуть – в 0,9 %. ПБДЭ были обнаружены в 31,0 % проб бромсодержащих пластмасс ЭЭО (281 проба), либо в 11,4 % общего их количества. Это согласуется с результатами предварительных исследований, выполненных в Беларуси [10]. Для сравнения отметим, что, например, в Великобритании доля бромсодержащего пластика оценивалась в 42,0 % от общего количества проб (267) ЭЭО [12].

Концентрация брома в пластмассах ЭЭО была в широком диапазоне: от значений ниже предела обнаружения метода (менее 10 мг/кг) до 127,9 г/кг, что соответствует результатам исследований в Австралии [13], Великобритании [12] и других странах. В 64,0 % проб бромсодержащих пластмасс содержание брома превышало величину в 2 г/кг, принятую в странах ЕС, при которой должны применяться методы экологически безопасного удаления. Кратность превышения составляла 1,1–63,9 раза. Практически в 100 % случаев бромсодержащий пластик зафиксирован во внутренних деталях персональных компьютеров (материнских платах, кулерах) и корпусах блоков бесперебойного питания. При этом в пластике блоков бесперебойного питания отмечались одни из самых высоких концентраций брома. Также бром фиксировался в пластике дискет, домофонов, магнитофонов (аудио и видео), модемов (роутеров), ноутбуков, клавиатур, сетевых фильтров и системных блоков. Практически все устройства, имеющие в своем составе бромсодержащий пластик, были произведены в странах Восточной и Южной Азии. Пластик, в котором отмечалось присутствие брома в его составе, преимущественно был представлен АБС-пластиком.

Исследования показали, что в составе крупногабаритной бытовой техники бромсодержащим пластиком представлены только мелкие детали, такие как выключатели внутреннего шкафа холодильника, индукционные катушки и корпуса модулей управления стиральных машин. В крупных деталях, например, в элементах корпуса (двери холодильников, обшивка внутреннего шкафа и теплоизоляционный материал холодильника, панель управления стиральной машины, корпус вентилятора), присутствие бромированных антипиренов не было установлено.

По частоте встречаемости брома основные категории ЭЭО ранжированы следующим образом: ИТ и телекоммуникационное оборудование (49,0 %) > мониторы и телевизоры (41,0 %) > копировальное оборудование (31,0 %) > крупногабаритная бытовая техника (30,0 %) > мелкогабаритная бытовая техника (>16,0 %).

Среднее содержание ПБДЭ в пластмассах крупногабаритной бытовой техники составило 86,1 г/кг, ИТ и телекоммуникационного оборудования – 13,0 г/кг, мониторов и телевизоров – 12,1 г/кг, копировального оборудования – 3,7 г/кг, мелкогабаритной бытовой техники – 1,1 г/кг. Наименьшие концентрации ПБДЭ обнаружены в смешанных отходах пластмасс – концентрации не превышают 1,0 г/кг. В 60 % проб, в которых было установлено присутствие ПБДЭ, зафиксировано превышение нормативных уровней его содержания с кратностью превышения в десятки раз. На основании полученных данных о концентрациях ПБДЭ можно заключить, что пластмассы были изготовлены как из первичных полимерных материалов, в которых исходное содержание бромированных антипиренов варьирует от 3,0 до 25,0 % их общей массы, так и из вторичного сырья [14]. Считается, что при содержании брома и ПБДЭ в пластике на уровне менее 3,0 % высока вероятность его производства из вторичного сырья.

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов, брома и ПБДЭ в пробах пластика ЭО, отобранных на предприятиях Беларуси
Table 1. Content of heavy metals, bromine and PBDEs in samples of EEE plastic collected from Belarusian enterprises

Категория и тип оборудования Equipment category and type	Количество проб Number of samples	Pb		Cd		Cr		Br		ПБДЭ	
		среднее/макс, мг/кг average/max, mg/kg	% ¹	среднее/макс, мг/кг average/max, mg/kg	%						
Крупногабаритная бытовая техника	107	144,4/496	30,8	85	0,9	48,1/180	6,5	50,7/127,9	29,9	86,1/170,9	14,0
В том числе											
Микроволновая печь	11	13	9,1	н. о. ²	0	н. о.	0	3/5,6	18,2	0,2	9,1
Стиральная машина	53	132/303	45,3	н. о.	0	71/180	7,5	64,1/112,6	34	85,6/170,9	18,9
Холодильник/морозильник	36	198/496	22,2	85	2,8	17,7/29	8,3	46/127,9	27,8	119/166,9	11,1
Мелкогабаритная бытовая техника	99	56,6/380	16,2	26,2/70	5,1	90,2/322	11,1	5,5/34,7	16,2	1,1/2,5	3,0
В том числе											
Пылесос	28	42,1/178	25	28,3/70	14,3	105,5/322	28,6	0,2/0,45	17,9	н. о.	0
Утюг	8	н. о.	0	18	12,5	н. о.	0	0,2/0,2	25	н. о.	0
Электрочайник	18	88,7/380	33,3	н. о.	0	н. о.	0	20/34,7	16,7	1,1/2,5	16,7
ИТ и телекоммуникационное оборудование	163	786,9/17814	38,0	51,9/316	8,0	66,3/120	3,7	32,2/115,5	49,1	13/120,9	11,7
В том числе											
Блок бесперебойного питания	24	197,9/600	70,8	13,5/15	8,3	79/81	8,3	59,4/109,8	87,5	4,7/16,1	33,3
Блок питания	29	70,4/141	31	11	3,4	н. о.	0	15,4/70,6	65,5	12,2/37,5	13,8
Внутренние детали ПК	22	1219/8940	95,5	118/316	13,6	73/120	9,1	31,7/64,5	95,5	7,6/35,2	22,7
Ноутбук	9	64,8/79	44,4	21	11,1	н. о.	0	22,7/42,8	44,4	н. о.	0
Сетевой фильтр/удлинитель	9	9060/17814	33,3	н. о.	0	н. о.	0	20/55,7	33,3	120,9	11,1
Копировальное оборудование	130	113,3/245	27,7	27,4/99	10,8	49,8/77	12,3	60,6/121,3	30,8	3,7/16,7	6,9
В том числе											
МФУ	20	133,3/245	20	12/16	15	49,3/64	15	95,6/119,8	20	н. о.	0
Принтер	88	108,1/222	29,5	17,8/57	10,2	47,7/77	13,6	58,9/121,3	34,1	3/16,7	6,8
Факсимильный аппарат	12	140/195	41,7	н. о.	0	77	8,3	67,9/85,5	33,3	14,4	8,3
Экраны (мониторы и телевизоры)	240	136,5/508	25,4	34/234	11,7	60,7/270	17,1	34,7/127,8	40,8	12,1/144,7	15,4
В том числе											
ЖК монитор	43	84/203	11,6	13	2,3	58	2,3	14,4/96,3	32,6	2,2	2,3
ЖК телевизор	15	194/338	26,7	13/14	13,3	116,5/170	13,3	34,4/115,7	60	21,6/38,0	20
Монитор с ЭЛТ	75	154,1/580	40	47,5/234	22,7	54,8/124	42,7	54,2/127,8	45,3	0,14/0,3	5,3
Телевизор с ЭЛТ	107	114/352	20,6	13,1/21	7,5	74,3/270	5,6	25,4/111,5	38,3	13,1/144,7	27,1
Смешанные отходы пластика ЭО	14	448,5/835	14,3	284/351	21,4	67,5/82	14,3	4,9/37,8	64,3	1/3	28,6
Сырье и продукция из полистирола	7	н. о.	0	н. о.	0	н. о.	0	2,9/5,7	85,7	н. о.	0
Допустимая концентрация, мг/кг		1000		100		1000		2000		1000	

Примечания: ¹ – доля проб, содержащих загрязняющее вещество; ² – содержание ниже предела обнаружения метода (пределы обнаружения методов: РФС – 10 мг/кг, ГХ/МС (ПББ и ПБДЭ) – 5 мг/кг (50 мг/кг для декаБДЭ)).

Ранжирование ЭЭО по встречаемости ПБДЭ в пластмассах, входящих в их состав, выглядит следующим образом: мониторы и телевизоры – 15,4 % случаев, крупногабаритная бытовая техника – 14,0 %, ИТ и телекоммуникационное оборудование – 11,7 %, копировальное оборудование – 6,9 %, мелкогабаритная бытовая техника – 3,0 %. Более высоким уровнем обнаружения ПБДЭ характеризовались смешанные измельченные отходы пластмасс ЭЭО (28,6 %), что свидетельствует о перераспределении поллютанта при измельчении пластмасс различных категорий. Несмотря на присутствие брома в сырье и продукции из полистирола, ПБДЭ в данных образцах обнаружены не были, что может объясняться использованием других бромированных антипиренов, например, гексабромциклододекана (ГБЦД). В целом относительно низкая доля пластмасс ЭЭО, содержащих ПБДЭ, по сравнению с долей бромсодержащих пластмасс, вероятно, связана с содержанием других бромированных антипиренов, например, ГБЦД, тетрабромбисфенола А и др.

Присутствие свинца, хрома и кадмия установлено в пластмассах всех анализируемых категорий ЭЭО. Высокие концентрации свинца фиксировались в смешанных измельченных отходах пластмасс – до 0,8 г/кг и пластмассах экранов – до 0,6 г/кг. Аномально высокое содержание свинца (более 5 г/кг) установлено в пробах измельченной изоляции кабелей. В большинстве же проб пластмасс ИТ и телекоммуникационного оборудования содержание свинца не превышало 0,5 г/кг. Концентрации кадмия в смешанных отходах пластмасс достигали 0,35 г/кг, ИТ и телекоммуникационного оборудования – 0,32 г/кг, экранов – 0,23 г/кг. Присутствие ртути в составе пластмасс установлено в экранах, копировальном оборудовании, ИТ и телекоммуникационном оборудовании и крупногабаритной бытовой технике, а ее концентрации не превышали 100 мг/кг. Содержание хрома в пластмассах мелкогабаритной бытовой техники достигало 0,32 г/кг, мониторов и телевизоров – 0,27 г/кг, крупногабаритной бытовой техники – 0,18 г/кг, ИТ и телекоммуникационного оборудования – 0,12 г/кг. В смешанных отходах пластмасс и пластмассах копировального оборудования содержание хрома не превышало 100 мг/кг. Следует добавить, что помимо пластика, тяжелые металлы используются в других деталях ЭЭО (электронно-лучевых трубках, печатных платах, припоях и др.).

Тяжелые металлы чаще встречались в пластмассах оборудования, произведенного в странах Азии. Среди оборудования, произведенного в Европе, тяжелые металлы в пластмассах фиксировались в 30,0 % случаев, бывшего СССР – 25,0 %.

Установлена статистически значимая линейная связь между содержанием брома и свинца в отходах пластмасс различных категорий ЭЭО с наиболее высокими значениями для копировального оборудования (коэффициент ранговой корреляции Спирмена, $\rho = 0,9$) и мониторов и телевизоров ($\rho = 0,84$) (рис. 2). Связь между содержанием брома и тяжелых металлов в измельчен-

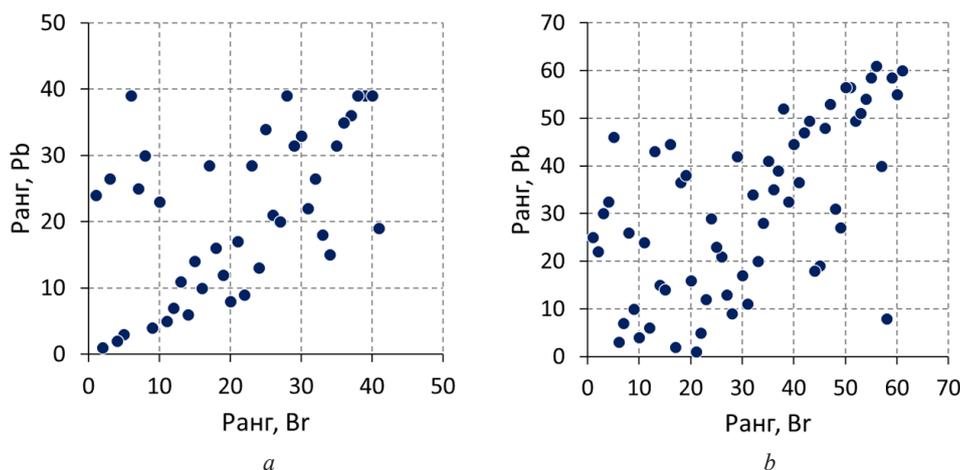


Рис. 2. Связи между содержанием брома и свинца в отходах пластмасс по Спирмену: *a* – копировальное оборудование, *b* – мониторы и телевизоры

Fig. 2. Relationships between bromine and lead content in plastic waste according to Spearman: *a* – copying equipment, *b* – monitors and televisions

ных отходах пластмасс ЭЭО не подтверждается статистически, что свидетельствует о смешивании пластмасс с различным содержанием опасных веществ.

Объемы образования отходов пластмасс, содержащих опасные вещества. Результаты исследований показали, что по состоянию на 2022 г. в Беларуси образовалось около 123 тыс. т отходов ЭЭО (13,4 кг/чел.). По оценкам, выполненным на 2020 г., их объемы составляли 128 тыс. т [15].

Из общего количества отходов ЭЭО на долю отходов пластмасс приходится 20,2 %, или 24,9 тыс. т. Наибольший вклад в образование отходов пластмасс вносит крупногабаритная бытовая техника – 45,8 % (рис. 3). Далее в порядке убывания следуют: телевизоры и мониторы – 28,6 %, ИТ и телекоммуникационное оборудование – 10,8 %, мелкогабаритная бытовая техника – 10,5 %, копировальное оборудование – 4,3 %.

Как и следовало ожидать, пространственное распределение отходов пластмасс на территории Беларуси весьма неравномерно. Наибольшие объемы отходов пластмасс образуются в Минске – 5,8 тыс. т (рис. 4). Более 1 тыс. т отходов пластмасс образовано в четырех районах с крупными городами областного подчинения (Витебский, Гомельский, Гродненский, Могилевский), на их долю пришлось 18,9 % всех отходов пластмасс. В Барановичском, Брестском, Полоцком, Минском и Бобруйском районах объемы образования отходов пластмасс находились в диапазоне 0,5–1 тыс. т. В 25,4 % районов диапазон объемов образования отходов пластмасс составлял 0,1–0,5 тыс. т. На большей части территории страны (79 районов, или 66,9 % всех районов) объемы отходов пластмасс не превышали 100 т.

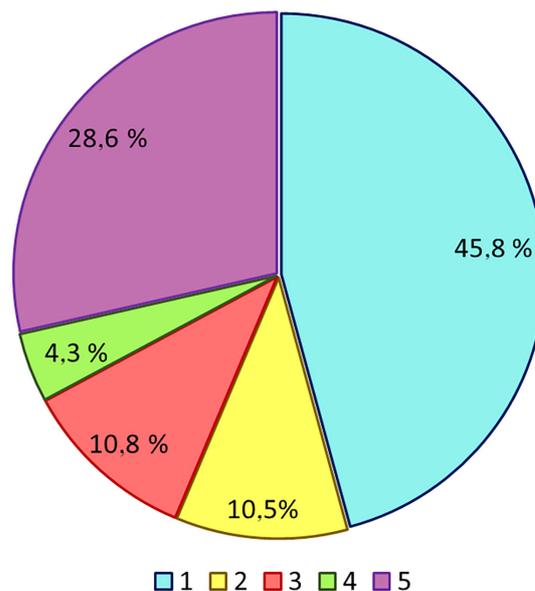


Рис. 3. Структура отходов пластмасс ЭЭО:
1 – крупногабаритная бытовая техника,
2 – мелкогабаритная бытовая техника, 3 – ИТ и телекоммуникационное оборудование,
4 – копировальное оборудование,
5 – мониторы и телевизоры

Fig. 3. The structure of waste plastics EEE:
1 – large-sized household appliances,
2 – small-sized household appliances,
3 – IT and telecommunications equipment,
4 – copying equipment, 5 – monitors and TVs

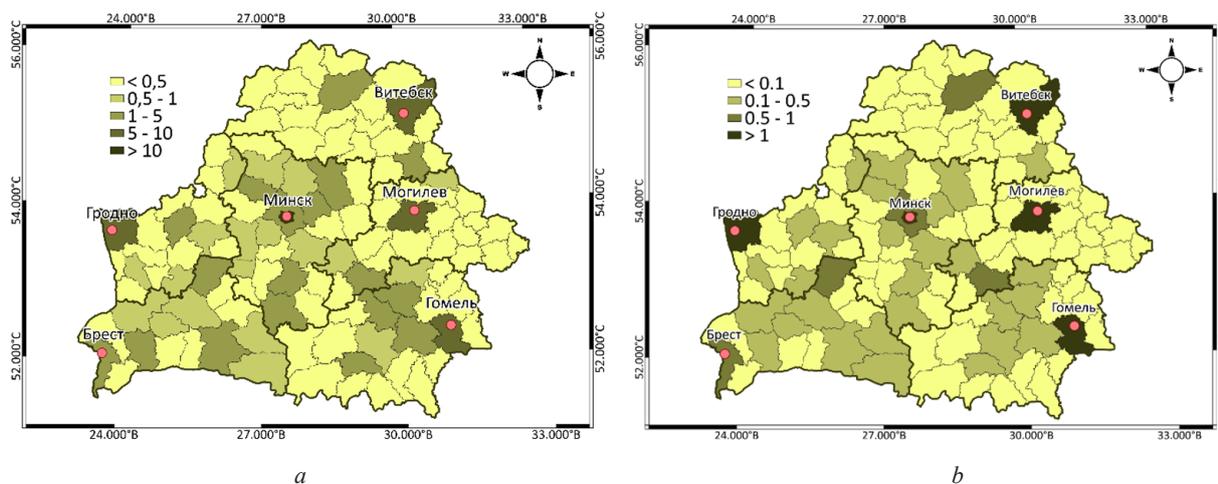


Рис. 4. Объемы образования отходов на территории Беларуси в разрезе административных районов, тыс. т (по состоянию на 2022 г.): а – ЭЭО, б – пластмасс ЭЭО

Fig. 4. Volumes of waste generation in Belarus by administrative districts, thousand tons (as of 2022):
a – EEE, b – EEE plastics

С использованием данных химико-аналитического определения выполнена оценка объема образования отходов, содержащих бром и ПБДЭ. Расчеты показали, что по состоянию на 2022 г. на территории Беларуси 22,1 % отходов пластмасс (5,5 тыс. т) могут содержать в своем составе бром (табл. 2). Основной вклад в образование бромсодержащих отходов вносят мониторы и телевизоры: на их долю приходится 53,0 % общего количества бромсодержащих пластмасс. На втором месте – крупногабаритная бытовая техника (24,0 %). Объем пластмасс, содержащих бром в количестве более 2 г/кг, оценивается в 63,5 % общего их количества.

Т а б л и ц а 2. Объемы образования отходов пластмасс ЭЭО, содержащие бром и ПБДЭ (по состоянию на 2022 г.)

Table 2. Volumes of generated waste plastics WEEE containing bromine and PBDEs (as of 2022)

Категория оборудования Equipment category	Отходы пластмасс, тыс. т Plastic waste, thousand tons	Отходы пластмасс, содержащие бром, тыс. т Bromine-containing plastic waste, thousand tons		Отходы пластмасс, содержащие ПБДЭ, тыс. т Plastic waste containing PBDE, thousand tons	
		всего total	>2000 мг/кг >2000 mg/kg	всего total	>1000 мг/кг >1000 mg/kg
Крупногабаритная бытовая техника	11,5	1,3	0,98	0,12	0,1
Мелкогабаритная бытовая техника	2,7	0,3	0,07	0,003	0,001
ИТ и телекоммуникационное оборудование	2,7	0,68	0,44	0,2	0,1
Копировальное оборудование	1,1	0,33	0,3	0,07	0,02
Экраны (мониторы и телевизоры)	7,2	2,9	1,7	1,1	0,74
Всего, тыс. т	25,2	5,5	3,5	1,5	0,96

Объемы отходов пластмасс, содержащих ПБДЭ, оцениваются в 1,5 тыс. т, или 6,0 % всех отходов пластмасс. Наибольшая их доля (76,0 %) представлена отходами мониторов и телевизоров. Объемы отходов пластмасс с превышением установленного норматива содержания ПБДЭ равны 0,97 тыс. т.

Проблемы вторичного использования отходов пластмасс. Как известно, электроника являлась одним из основных секторов, в котором использовались большие количества бромированных антипиренов, включая СОЗ. Поэтому обращение с отходами, содержащими СОЗ, должно базироваться на учете их концентраций и наличия других загрязняющих веществ. Согласно Стокгольмской конвенции о СОЗ, пока действуют исключения в отношении переработки отходов, содержащих пента- и октабромдифениловые эфиры, а также в отношении производства декабромдифенилового эфира для Сторон, зарегистрировавших такие исключения. Официальной датой истечения их срока действия будут соответственно 2030 и 2036 годы. Это означает, что импорт в Беларусь новых электронных устройств и оборудования, содержащих опасные вещества, не исключается. Следует принимать во внимание и запасы старой бытовой и вычислительной техники, которая используется населением и зачастую, при выходе из эксплуатации, продолжает оставаться на хранении.

Анализ системы сбора устаревшего ЭЭО в Беларуси показал, что она налажена в областных и крупных районных центрах. В среднем уровень сбора оценивается примерно в 25,0 % по отношению к объемам образования отходов ЭЭО. Для 11,7 % районов страны характерен высокий уровень сбора отходов ЭЭО. К ним, как правило, относятся Минск и районы с городами областного подчинения либо крупными промышленными центрами. На 35,3 % территории система сбора отходов ЭЭО развернута не в полной мере и характеризуется средним уровнем сбора. К ним относятся районы, близлежащие к областным и промышленным центрам. В большей же части районов уровень сбора отходов ЭЭО остается по-прежнему низким. Согласно [9], в 2022 г. официальным сектором в Беларуси было собрано и переработано 21,8 тыс. т отходов ЭЭО. Из них более 6,1 тыс. т приходилось на отходы пластмасс, входящих в состав ЭЭО. Согласно расчетам, 16,8 % собранных отходов пластмасс могут содержать в своем составе бром.

С 1 января 2023 г. в Беларуси введен в действие ТКП 17.11-11-2022, устанавливающий правила обращения с отходами электрического и электронного оборудования, содержащими полиброми-

рованные дифениловые эфиры. Данный ТПК регламентирует требования к разборке оборудования, выявлению, разделению, хранению, обезвреживанию и захоронению отходов ЭЭО, содержащих полибромированные дифениловые эфиры. Следует отметить, что при отсутствии возможности измерения уровней содержания брома при ручной сортировке и демонтаже ЭЭО следующие виды ЭЭО и/или деталей целесообразно рассматривать как потенциально содержащие ПБДЭ: блоки питания, блоки бесперебойного питания; мониторы и телевизоры; внутренние детали ПК (материнская плата, кулер); сетевые фильтры; выключатели внутреннего шкафа холодильника; корпуса индукционных катушек и модулей управления стиральных машин. Их извлечение из общего потока ЭЭО позволит снизить общую циркуляцию опасных веществ.

Важным представляется дальнейшее совершенствование нормативной технической базы, включая уточнение классификатора отходов ЭЭО, введение предельного содержания ПБДЭ в отходах и др. Целесообразным является введение скрининг-методов определения брома в пластмассах ЭЭО как общепризнанную на мировом уровне практику обращения с отходами ЭЭО. Кроме того, с целью предотвращения поступления загрязненных отходов пластмасс на вторичную переработку и в окружающую среду требуется повышение осведомленности специалистов и обеспечение их профессиональной подготовки.

Заключение. Впервые для территории Беларуси выполнены широкомасштабные исследования отходов пластика электрического и электронного оборудования (ЭЭО), включающие отбор 760 проб фрагментов пластика и проведение химико-аналитических испытаний с определением содержания брома, тяжелых металлов и ПБДЭ.

Установлено, что бром обнаруживается в 37,0 % проб пластика, полибромдифениловые эфиры – в 11,4 %, свинец – в 27,6 %, хром – в 10,9 %, кадмий – в 8,4 %, ртуть – в 0,9 %, что согласуется с данными для других стран. Выявлена тесная статистически значимая линейная связь между содержанием свинца и брома в отходах пластмасс различных видов ЭЭО.

Наиболее высокая встречаемость ПБДЭ (28,6 %) характерна для смешанных отходов пластмасс, что свидетельствует о перераспределении поллютанта при измельчении отходов различных категорий ЭЭО. Относительно низкая доля пластмасс ЭЭО, содержащих ПБДЭ, по сравнению с долей бромсодержащих пластмасс, вероятно, связана с содержанием других бромированных антипиренов, например, ГБЦД, тетрабромбисфенола А и др., что свидетельствует о необходимости дальнейших исследований.

Впервые получены оценки объемов образования отходов пластмасс ЭЭО на территории Беларуси, содержащих опасные вещества. Показано, что объемы образования отходов ЭЭО в Беларуси по состоянию на 2022 г. составили порядка 123 тыс. т, из которых примерно 25 тыс. т представлено отходами пластмасс. Ежегодное образование отходов бромсодержащих пластмасс оценивается примерно в 5,5 тыс. т, из которых около 65,0 % подлежат экологически безопасному удалению.

Данная работа является необходимым элементом информационного обеспечения системы экологически безопасного обращения с отходами ЭЭО.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Подпрограммы 3 «Обращение со стойкими органическими загрязнителями» Государственной программы «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2021–2025 годы (№ госрегистрации 20211274) и задания Подпрограммы 1 «Природные ресурсы и их рациональное использование» ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг. (№ госрегистрации 20192480).

Acknowledgements. The study has been performed within the framework of Subprogram 3 “Management of persistent organic pollutants” of the State Program “Environmental Protection and Sustainable Use of Natural Resources” for 2021–2025 (state registration no. 20211274) and the Task of the Subprogram 1 “Natural resources and their rational use” of the State Program of Scientific Investigations “Natural Resources and Environment” for 2021–2025 (state registration no. 20192480).

Список использованных источников

1. The Global E-waste Monitor 2024 / С. P. Baldé [et al.]. – Bonn; Geneva, 2024. – 148 p.
2. Recycling plastics from WEEE: A review of the environmental and human health challenges associated with brominated flame retardants / С. Chaine [et al.] // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2022. – Vol. 19, N 2. – Art. 766. <https://doi.org/10.3390/ijerph19020766>

3. Brominated flame retardants in Irish waste polymers: Concentrations, legislative compliance, and treatment options / D. Drage [et al.] // *Sci. Total Environ.* – 2018. – Vol. 625. – P. 1535–1543. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.076>
4. The non-negligible environmental risk of recycling halogenated flame retardants associated with plastic regeneration in China / Z. Cao [et al.] // *Sci. Total Environ.* – 2019. – Vol. 646. – P. 1090–1096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.373>
5. 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>
6. Recycling plastics containing decabromodiphenyl ether into new consumer products including children's toys purchased in Japan and seventeen other countries / M. Kajiwara [et al.] // *Chemosphere.* – 2022. – Vol. 289. – Art. 133179. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133179>
7. Haarman, A. Study on the Impacts of Brominated Flame Retardants on the Recycling of WEEE plastics in Europe / A. Haarman, F. Magalini, J. Courtois. – Sofies, 2020. – 46 p.
8. Concentrations and legislative aspects of PBDEs in plastic of waste electrical and electronic equipment in Brazil / H. D. Burgos Melo [et al.] // *Sci. Total Environ.* – 2024. – Vol. 906. – Art. 167349. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167349>
9. Об объемах сбора и использования вторичных материальных ресурсов, размерах и направлениях расходования средств, полученных от производителей и поставщиков в 2023 году: отчет за 2023 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://vtoroperator.by/about_us/operator-reports/?letter=%D0%92%D1%81%D0%B5%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D1%91%D1%82%D1%8B. – Дата доступа: 07.05.2024.
10. 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>
11. UNEP 2021. Draft guidance on preparing inventories of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) listed under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Secretariat of the Basel, Rotterdam and Stockholm conventions, United Nations Environment Programme, Geneva, 2021 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://chm.pops.int/Implementation/NationalImplementationPlans/GuidanceArchive/GuidancefortheinventoryofPBDEs/tabid/3171/Default.aspx>. – Date of access: 18.010.2022.
12. Turner, A. Bromine in plastic consumer products – Evidence for the widespread recycling of electronic waste / A. Turner, M. Filella // *Sci. Total Environ.* – 2017. – Vol. 601–602. – P. 374–379. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.173>
13. 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.] // *Sci. Total Environ.* – 2014. – Vol. 491–492. – P. 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.074>
14. 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.
15. Чернюк, В. Д. Геоэкологическая оценка отходов пластмасс электрического и электронного оборудования на территории Беларуси: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.03.13 / В. Д. Чернюк; Ин-т природопользования НАН Беларуси. – Минск, 2023. – 26 с.

References

1. Baldé C. P., Kuehr R., Yamamoto T., McDonald R., D'Angelo E., Althaf S., Bel G., Deubzer O., Fernandez-Cubillo E., Forti V., Gray V., Herat S., Honda S., Iattoni G., Khetriwal D. S., Luda di Cortemiglia V., Lobuntsova Y., Nnorom I., Pralat N., Wagner M. *The global e-waste monitor 2024*. Bonn, Geneva, 2024. 148 p.
2. Chaine C., Hursthouse A. S., McLean B., McLellan I., McMahon B., McNulty J., Miller J., Viza E. Recycling plastics from WEEE: A review of the environmental and human health challenges associated with brominated flame retardants. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19, no. 2, art. 766. <https://doi.org/10.3390/ijerph19020766>
3. Drage D. S., Sharkey M., Abdallah M. A., Berresheim H., Harrad S. Brominated flame retardants in Irish waste polymers: Concentrations, legislative compliance, and treatment options. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 625, pp. 1535–1543. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.076>
4. Cao Z., Chen Q., Li X., Zhang Y., Ren M., Sun L., Wang M., Liu X., Yu G. The non-negligible environmental risk of recycling halogenated flame retardants associated with plastic regeneration in China. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 646, pp. 1090–1096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.373>
5. 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>
6. Kajiwara N., Matsukami H., Malarvannan G., Chakraborty P., Covaci A., Takigami H. Recycling plastics containing decabromodiphenyl ether into new consumer products including children's toys purchased in Japan and seventeen other countries. *Chemosphere*, 2022, vol. 289, art. 133179. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133179>
7. Haarman A., Magalini F., Courtois J. *Study on the Impacts of Brominated Flame Retardants on the Recycling of WEEE plastics in Europe*. Sofies, 2020. 46 p.
8. Burgos Melo H. D., de Souza-Araujo J., Benavides Garzón L. G., Macedo J. C., Cardoso R., Mancini S. D., Harrad S., Rosa A. H. Concentrations and legislative aspects of PBDEs in plastic of waste electrical and electronic equipment in Brazil. *Science of the Total Environment*, 2024, vol. 906, art. 167349. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167349>
9. *On the volumes of collection and use of secondary material resources, the sizes and directions of spending funds received from manufacturers and suppliers in 2023: report for 2023*. Available at: https://vtoroperator.by/about_us/operator-reports/?letter=%D0%92%D1%81%D0%B5%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D1%91%D1%82%D1%8B

ter=%D0%92%D1%81%D0%B5%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D1%91%D1%82%D1%8B (accessed 07 May 2024) (in Russian).

10. 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>

11. UNEP 2021. *Draft guidance on preparing inventories of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) listed under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants*. Secretariat of the Basel, Rotterdam and Stockholm conventions, United Nations Environment Programme, Geneva, 2021. Available at: <https://chm.pops.int/Implementation/NationalImplementationPlans/GuidanceArchive/GuidancefortheinventoryofPBDEs/tabid/3171/Default.aspx> (accessed 18 October 2022).

12. 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>

13. 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>

14. Hansen E., Nillson N., Vium K. S. R. *Hazardous substances in plastics. Survey of chemical substances in consumer products*. Denmark, 2014, no. 132. 182 p.

15. Chernyuk V. *Geoecological assessment of waste plastics of electrical and electronic equipment in Belarus*. Minsk, 2023. 26 p. (in Russian).

Информация об авторах

Чернюк Владимир Дмитриевич – канд. геогр. наук, ст. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: chernyuk.vladimir.m@mail.ru.

Кухарчик Тамара Иосифовна – д-р геогр. наук, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tkukharchyk@gmail.com.

Information about the authors

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, Republic of Belarus). E-mail: chernyuk.vladimir.m@mail.ru.

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.