

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-2-33-45>
УДК 504.054+504.53

Поступила в редакцию 31.10.2024
Received 31.10.2024

ЛОКАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ ЧАСТИЦ МАКРО- И МИКРОПЛАСТИКА ПОЛИСТИРОЛА В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

Т. И. Кухарчик, К. О. Рябычин

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрены промышленные предприятия, использующие первичные полимеры стирола как потенциальные источники загрязнения окружающей среды частицами макро- и микропластика на территории Беларуси. В качестве фактических материалов использованы данные интерактивной информационно-аналитической системы Национального статистического комитета, а также результаты запросов в Национальный статистический комитет, Государственный таможенный комитет, Бел НИЦ «Экология» и на промышленные предприятия. Представлены объемы применения в стране полистирола вспенивающегося, предназначенного для производства теплоизоляционных плит, упаковки и другой продукции, за 20-летний период. Показано, что по сравнению с 2000 г. объемы использования полистирола вспенивающегося в 2020 г. выросли в 2,2 раза и составили 13,3 тыс. т. Установлено, что примерно 44 % общего количества сырья полистирола используется предприятиями г. Минска и Минской области. Наибольшее количество предприятий, использующих полистирол, расположены в бассейнах рек Днепра (29) и Немана (15).

Общие объемы образования отходов полистирола в 2020 г. составили 7,2 тыс. т, из которых около 8 % (или 0,55 тыс. т) представлено отходами пенопласта. Показано, что более высокие уровни накопления отходов вспененных материалов из полистирола характерны для административных районов с областными городами. Вместе с тем более чем для половины административных районов Беларуси (64) официальные данные по отходам полистирола отсутствуют.

Обсуждены источники поступления полистирола и связанного с ним гексабромциклододекана в компоненты природной среды, а также необходимость разработки природоохранных мер по предотвращению рассеяния отходов и выноса сырьевых частиц за пределы промплощадок.

Ключевые слова: полистирол вспенивающийся; пенополистирольные плиты; отходы полистирола; источники загрязнения; гексабромциклододекан.

Для цитирования. Кухарчик Т. И., Рябычин К. О. Локальные источники поступления частиц макро- и микропластика полистирола в окружающую среду на территории Беларуси // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 33–45.

LOCAL SOURCES OF MACRO- AND MICROPLASTIC OF POLYSTYRENE RELEASES INTO THE ENVIRONMENT ON THE TERRITORY OF BELARUS

T. I. Kukharchyk, K. O. Rabychyn

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

Abstract. In the article industrial enterprises using primary polymers of styrene as potential sources of environmental pollution by macro- and microplastic in Belarus are discussed. The data used include data from the interactive information-analytical system of the National Statistical Committee, as well as results of inquiries to the National Statistical Committee, the State Customs Committee, the Bel NIC "Ecology", and industrial enterprises. Over a 20-year period, the volumes of expandable polystyrene used in the country for the production of insulation boards, packaging, and other products are presented. It is shown that compared to 2000 the use of expandable polystyrene in 2020 increased by 2.2 times, reaching 13.3 thousand tons. Approximately 44 % of the total polystyrene raw material is used by enterprises in Minsk and Minsk region. The largest number of enterprises using polystyrene is located in the basins of the Dnieper River (29) and the Neman River (15).

The total volume of polystyrene waste generated in 2020 amounted to 7.2 thousand tons, of which about 8 % (or 0.55 thousand tons) was polystyrene foam waste. Higher levels of accumulation of expanded polystyrene waste are typical for administrative districts with regional centers. At the same time, official statistics do not account for polystyrene waste in 64 administrative districts.

The sources of polystyrene and associated hexabromocyclododecane entering the natural environment, as well as the need to develop environmental protection measures to prevent the dispersion of waste and the release of raw material particles beyond industrial sites are discussed.

Keywords: foaming polystyrene; expanded polystyrene boards; polystyrene waste; pollution sources; hexabromocyclododecane.

For citation. Kukharchyk T. I., Rabychyn K. O. Local sources of macro- and microplastic of polystyrene releases into the environment on the territory of Belarus. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 33–45.

Введение. Загрязнение окружающей среды пластиком и микропластиком – одна из широко обсуждаемых экологических проблем современности [1–3]. Воздействие пластика на компоненты природной среды и живые организмы возможно на всех этапах его жизненного цикла: от процессов производства до управления отходами [4]. Пластик, содержащий во многих случаях опасные химические вещества, является чужеродным материалом для природной среды. Его разрушение, физическое и химическое выветривание, выщелачивание сопровождаются необратимыми процессами загрязнения и всё возрастающими негативными последствиями глобального масштаба [5].

Полистирол, как и другие типы полимеров, обнаруживается в различных компонентах природной среды. Его производство было начато в середине 1960-х годов и к 2019 г. достигло 21 млн т, что составляет 5 % общего количества всех полимеров [2]. Отмечается растущий спрос на упаковку и строительные материалы из полистирола [6, 7]. К 2060 г. мировые объемы его производства прогнозируются на уровне 55 млн т [2]. Это означает, что будут увеличиваться объемы образования отходов, вторичная переработка которых, как и других видов полимерных отходов, пока крайне недостаточна.

Распространению отходов полистирола в окружающей среде способствует не только широкая сфера применения данного полимера, но и свойство производимой продукции (особенно пенопласта и вспененных гранул) легко переноситься с водными и воздушными потоками. Следует подчеркнуть, что полистирольные изделия, оказавшиеся в окружающей среде, быстро разрушаются при механическом воздействии с образованием большого количества мелких частиц, в том числе микропластика. Процессы разрушения пенопласта в прибойной зоне моря продемонстрированы в работе [8]. В ходе экспериментальных исследований установлено, что полное разрушение образцов пенополистирола до микрочастиц (<5 мм) происходит за 3–6 дней [9].

Полистирол не биоразлагаем и может сохраняться в окружающей среде сотни лет, оказывая негативные воздействия на почвы, водные системы и живые организмы. По данным работы [10], пенополистирол, помещенный в грунт и извлеченный через 31 год, не утратил теплофизических характеристик.

Опасность рассеяния полистирола связана не только с его механическим/физическим воздействием на компоненты природной среды, но и с возможностью химического воздействия в связи с содержанием в нем гексабромциклододекана (ГБЦД), который относится к стойким органическим загрязнителям (СОЗ). ГБЦД использовался и продолжает использоваться как добавка, снижающая способность к горению материала [11]. Несмотря на ограничения, принятые в связи с включением его в Стокгольмскую конвенцию о СОЗ, ГБЦД продолжает использоваться при производстве пенополистирольных плит. Соответственно, содержащие его материалы пока остаются в обращении и их запасы будут увеличиваться. На опасность распространения ГБЦД с отходами пенопласта указано в работе [12] при изучении прибрежного Азиатско-Тихоокеанского региона.

Зафиксированный впервые более 40 лет назад в прибрежной зоне Новой Англии [13, 14] полистирол в настоящее время обнаруживается в различных компонентах природной среды. Так, пенопласт является одним из наиболее часто встречающихся видов пляжного мусора вдоль южного побережья штата Калифорния [15, 16]. Практически повсеместно его фрагменты зафиксированы на пляжах юго-восточной части Балтийского моря [9, 17]. Недавно вспененные гранулы полистирола были обнаружены в Антарктиде в кишечнике организмов класса *Collembola* [18].

В Беларуси высокие уровни загрязнения почв полистиролом зафиксированы в зонах воздействия промышленных предприятий, использующих первичные полимеры стирола в производственном процессе. Согласно работам [19, 20], фрагменты пенополистирольных плит, вспененные гранулы и частицы сырьевых материалов являются типичными загрязнителями почв, что свидетельствует о важности изучения данной категории источников полистирола.

Цель работы – проанализировать объемы и сферы применения полистирола в Беларуси, размещение промышленных предприятий, а также образование отходов полистирола для оценки возможных потоков и путей его поступления в окружающую среду.

Материалы и методы исследований. В качестве фактического материала использованы данные интерактивной информационно-аналитической системы Национального статистического комитета, а также результаты запросов в Национальный статистический комитет, Государственный таможенный

комитет, Бел НИЦ «Экология», на промышленные предприятия. Собраны данные об импорте/экспорте первичных полимеров стирола (коды ТН ВЭД ЕАЭС 3903110000 «Полистирол вспенивающийся» и 39031100 «Прочий полистирол»), производстве продукции из полистирола (коды ОКРБ 22.21.41.200 – Плиты, листы, пленка, фольга и полосы из полимеров стирола пористые и 22.21.30.300 – Плиты, листы, пленка, фольга и полосы из полимеров стирола неармированные или не комбинированные с другими материалами), а также данные об образовании отходов полистирола (коды 5710800, 5710801, 5710803, 5710804). Выборочная рассылка запросов на промышленные предприятия позволила получить данные о типах используемого сырья и содержащихся в нем антипиренов. Кроме того, использованы открытые источники информации, касающиеся производителей продукции из полистирола на территории Беларуси, нормативно-техническая документация, справочная и научная литература, фондовые данные лаборатории трансграничного загрязнения. Для предварительной оценки путей распространения полистирола в окружающей среде проведены рекогносцировочные эколого-геохимические исследования в зонах воздействия ряда предприятий, расположенных в г. Минске, Борисовском и Дзержинском районах.

Результаты и их обсуждение. Общие сведения о полистироле. К первичным полимерам стирола относятся полистирол общего назначения, ударопрочный полистирол (HIPS) и вспенивающийся полистирол (EPS). Для производства вспененных видов продукции (теплоизоляционных плит или пенопласта, одноразовой посуды, упаковки и других видов) используются вспенивающийся полистирол и некоторые виды полистирола общего назначения (табл. 1). Другими сферами применения полистирола общего назначения являются упаковка и контейнеры для пищевых продуктов, одноразовая посуда, различные пленки, другие товары народного потребления. Ударопрочный полистирол используется для производства корпусов электротехники, автотракторного оборудования и т. д. В структуре мирового производства на ударопрочный полистирол приходится около 55 % [21].

Таблица 1. Сферы использования полимеров стирола [21]

Table 1. Areas of use of styrene polymers [21]

| Сфера использования | Полимер стирола | | |
|---|--|---|--|
| | Общего назначения | Вспенивающийся | Ударопрочный |
| Упаковка | Пищевые контейнеры, упаковка непродовольственных товаров (крышки компакт-дисков, бутылки и пр.), двухосноориентированная пленка, многослойные пленки | Пенопласт для упаковки продуктов питания, техники и электроники | Пищевые контейнеры, упаковка непродовольственных товаров (крышки компакт-дисков, бутылки и пр.), двухосноориентированная пленка, многослойные пленки |
| Строительство | Экструдированный ПС для шумо-, тепло- и гидроизоляционных листов, облицовочные и декоративные материалы (потолочная плитка, плитки и пр.) | Вспененные утеплительные плиты, сэндвич-панели, опалубка, фасадные системы и др. | – |
| Электротехника, кабельная промышленность, бытовая техника | Корпусные элементы бытовых приборов | Утепление корпусов холодильников | Корпусные элементы бытовых приборов |
| Машиностроение | Детали интерьера и внешней отделки автомобилей | Утеплитель кузова автомобилей (кунги, хлебозовные машины, машины с рефрижераторами) | – |
| Товары народного потребления и прочее | Одноразовая посуда, игрушки, канцтовары, одноразовые медицинские инструменты и др. | Елочные игрушки | Контейнеры для продуктов (специальные марки) |

Крупнейшим производителем и потребителем полистирола являются страны Азии: Китай обеспечивает около 24 % мирового производства полистирола, другие азиатские страны – 36 %. Мощности стран Северной Америки и Европы позволяют выпускать по 16 % полистирола в год [21].

Первичные полимеры стирола производятся в виде цилиндрических или сферических гранул размером от 0,4 до 5,0 мм (ОСТ 301-05-202-92Е, ГОСТ 20282-86); некоторые виды полистирола общего назначения выпускаются в виде порошка. Иными словами, сырье полистирола по размерам частиц относится к микропластику.

Особого внимания заслуживает вспенивающийся полистирол и производимая из него продукция. Первоначально пенополистирол был изготовлен во Франции в 1928 г. Его промышленное производство было начато в Германии в 1937 г., в СССР – в 1939 г. С 1950 г. вспенивающийся полистирол являлся основным изоляционным полимерным материалом, получившим широкое применение в строительстве. В Беларуси первый цех по производству теплоизоляционных плит был введен в эксплуатацию в 1964 г. на Минском комбинате силикатных изделий.

Вспенивающийся полистирол содержит 5–6 % смеси изопентана и пентана, а также антипирены. На протяжении нескольких десятилетий в качестве антипирена применялся ГБЦД, который в 2013 г. был включен в Приложение А (ликвидация) Стокгольмской конвенции о СОЗ. По данным работы [22], концентрация ГБЦД в полистироле вспениваемомся и пенополистирольных изделиях составляет 0,5–1,0 % при среднем значении 0,7 %, в экструдированном – 0,5–3,0 % при среднем значении 2,0 %. По оценкам [23], ежегодные объемы поступления ГБЦД в Беларусь в составе полистирола вспенивающегося могли составлять сотни тонн.

Использование полимеров стирола в Беларуси. На территории Беларуси полимеры стирола не производятся, но используются для производства различных видов продукции. Согласно данным Государственного таможенного комитета Республики Беларусь, в нашу страну поступает полистирол в первичных формах: в виде полистирола вспенивающегося и прочих видов полистирола. Объемы импорта полистирола вспенивающегося в 2020 г. составили 13,3 тыс. т, экспорта – 1 т. Ориентировочные объемы потребления в нашей республике оцениваются в 13,3 тыс. т.

На рис. 1 представлена динамика использования полистирола вспенивающегося в Беларуси за 20-летний период. В период с 2000 по 2007 г. объемы потребления полистирола находились в диапазоне 2,9–5,9 тыс. т, с 2008 г. наблюдался их быстрый рост. Максимальные значения, достигающие почти 20 тыс. т, были характерны для 2010–2014 гг. В целом, по сравнению с 2000 г. объемы использования полистирола вспенивающегося выросли в 2,2 раза, чему способствовало повышение требований к энергоэффективности зданий в Беларуси. Всего за период с 2000 по 2020 г. в страну импортировано около 198 тыс. т полистирола вспенивающегося, экспортировано – менее 2 тыс. т.

Доля полистирола вспенивающегося от общего потребления первичных полимеров стирола в течение рассматриваемого периода несколько изменялась, составив 25–29 % в период 2010–2014 гг. и 17–19 % в последующие годы. По данным работы [24], в России доля вспенивающегося полистирола в общем объеме полимеров стирола в начале 2000-х годов варьировала в пределах 22–26 %.

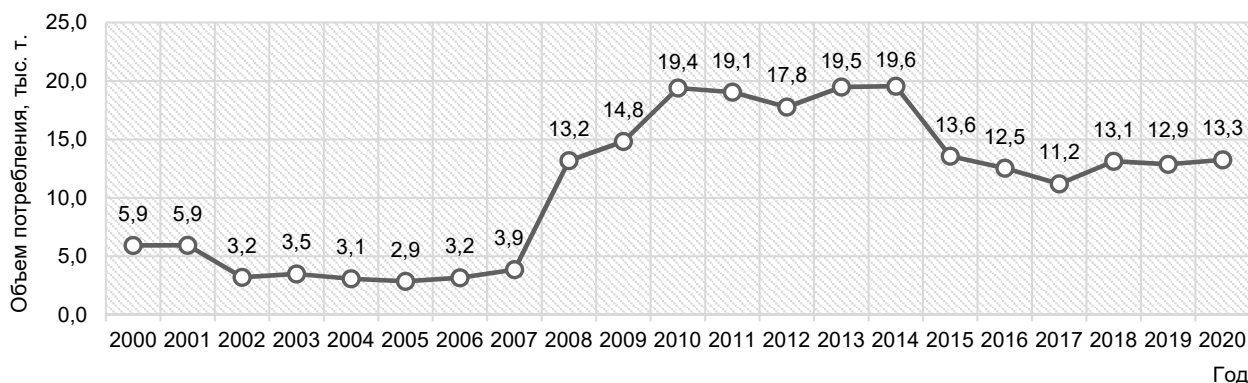


Рис. 1. Динамика использования полистирола вспенивающегося на территории Беларуси (по данным импорта – экспорта), 2000–2020 гг.

Fig. 1. Dynamics of the use of foaming polystyrene in the territory of Belarus (according to import – export data), 2000–2020

Полистирол вспенивающийся поступает в Беларусь из России, Нидерландов, Китая, Германии, Франции и других стран. В 2020 г. на долю России пришлось 62 % от поступающего в страну вспенивающегося полистирола; на втором месте по объему импорта среди стран-производителей – Нидерланды (14 %).

С учетом ранее полученных данных [23], а также результатов запросов установлено, что при производстве полистирола вспенивающегося на предприятиях России (ОАО «Сибур-Химпром», ОАО «Пластик») использовался ГБЦД, содержание которого в продукте составляло от 0,6 до 1,0 %. С января 2019 г. на ОАО «Сибур-Химпром» вместо ГБЦД применяется полимерный антипирен на основе бромированной смолы стирола [25, 26].

Использование полистирола вспенивающегося и виды продукции. В настоящее время в Беларуси насчитывается несколько десятков предприятий, производящих продукцию из вспенивающегося полистирола. В перечне производимой продукции находятся пенополистирольные тепло-, звуко- и шумоизоляционные плиты (пенопласт разных марок), одноразовая посуда, упаковка, шарики или крошка, пенополистиролбетон и др. (рис. 2). Пенополистирольные плиты используются как самостоятельно для изоляции, так и в составе готовых строительных конструкций в виде многослойных стеновых панелей или композитных СИП-панелей. Вспененный полистирол добавляется также к бетонным растворам.

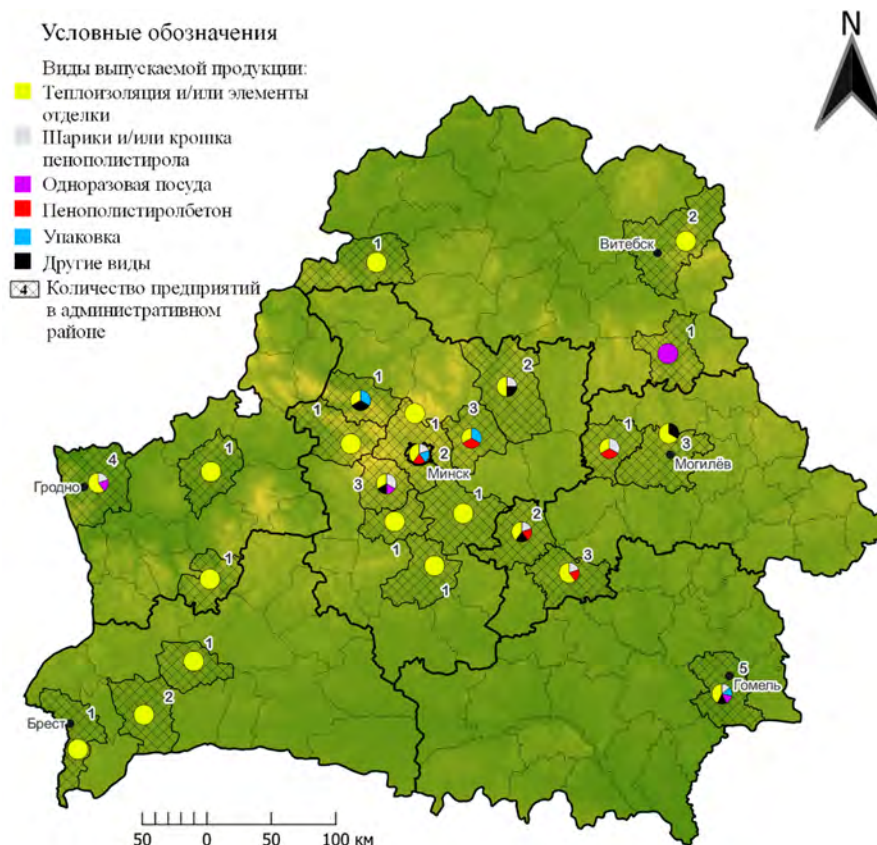


Рис. 2. Виды выпускаемой продукции из вспенивающегося полистирола

Fig. 2. Types of products made of foaming polystyrene

Наибольшее количество предприятий занимается производством теплоизоляционных плит. При этом различают плиты пенополистирольные теплоизоляционные (СТБ 1437-2004), изготавливаемые беспрессовым способом из вспенивающегося полистирола, и изделия теплоизоляционные из экструдированного полистирола (СТБ 2148-2010), изготавливаемые методом экструзии. В Беларуси плиты пенополистирольные производят под различными названиями и разных марок (ППТ-15, ППТ-20, ППТ-25, ППТ-35, пенопласт, пенополистирол, «Тензиплекс», «Сарматерм»; «Белплекс» и др.). Плиты из экструдированного пенополистирола выпускают под названиями «Батэплекс», «Пеноплекс», «Истплекс», «CARBON SOLID», «CARBON ECO» и др.

На основании имеющейся информации выявлены три предприятия с объемами потребления полистирола вспенивающегося более 1000 т/год, два предприятия – от 500 до 1000, девять предприятий с объемами потребления от 100 до 500 т/год и ряд более мелких, что отображено на рис. 3. Следует отметить, что обозначенные на нем предприятия лишь частично отражают ситуацию в стране. Благодаря достаточно простой технологии производства вспененных материалов в Беларуси функционирует большое количество малых предприятий, преимущественно частной формы собственности, в отношении которых сведения практически отсутствуют (за исключением рекламной информации, размещенной на сайтах). Это затрудняет получение полной картины распределения предприятий в стране, их состояния, объемов потребления сырья и производства продукции.



Рис. 3. Местоположение предприятий, использующих вспенивающийся полистирол, в Беларуси

Fig. 3. Location of enterprises using foaming polystyrene in Belarus

Крупнейшие предприятия по производству пенополистирольных теплоизоляционных плит по данным запросов расположены в Минске и Гродно. Среди административных единиц по количеству предприятий (15) лидирует Минская область. Анализ расположения предприятий в пределах водосборов показал, что наибольшее количество предприятий, использующих полистирол, расположено в бассейнах рек Днепра (29) и Немана (15). В пределах водосбора Западного Буга – по 4 предприятия, Припяти и Западной Двины – по 2 предприятия.

Официальной статистикой объемы производства продукции из полистирола учитываются в соответствии с кодами ОКРБ 22.21.41.200 (Плиты, листы, пленка, фольга и полосы из полимеров стирола пористые) и 22.21.30.300 (Плиты, листы, пленка, фольга и полосы из полимеров стирола неармированные или не комбинированные с другими материалами). Выпуск продукции в натуральном выражении в стране для указанных категорий в 2020 г. составил 56,5 тыс. т. Данный уровень объема (при вариабельности от 46,3 до 63,8 тыс. т) сохраняется с 2011 г.

Объемы производства вспененных продуктов в 2020 г. составили 27,0 тыс. т. Около 2,5 тыс. т было импортировано в страну и около 1 тыс. т экспортировано. Соответственно, в стране объемы использования продукции из вспененного полистирола оцениваются в 28,5 тыс. т.

Анализ распределения объемов производства продукции под кодом 22.21.41.200 по регионам показал, что на долю Могилёвской области приходится 55 % общего объема производства. В Минской области и г. Минске выпускается в сумме 32 % общего количества продукции (рис. 4). Основными производителями в данном регионе являются ООО «Анастан», ОАО «Минский комбинат силикатных изделий», ЧПТУП «ТМ-СтройПласт», ООО «ВармХаусГрупп», ООО «Гринвал», ООО «Эксперт-трейд», ДУП «ССК УП «Минскблсельстрой», ООО «Доминвестпро», ООО «Эухарис».

Это обстоятельство необходимо учитывать при рассмотрении конкретных источников поступления частиц полистирола в окружающую среду и их воздействия на экосистемы и здоровье человека. Как известно, вспененные изделия из полистирола, в том числе пенополистирольные плиты, на 98 % состоят из воздуха, а их плотность находится в диапазоне 0,028–0,035 г/см³, что способствует их быстрому перемещению в окружающей среде.

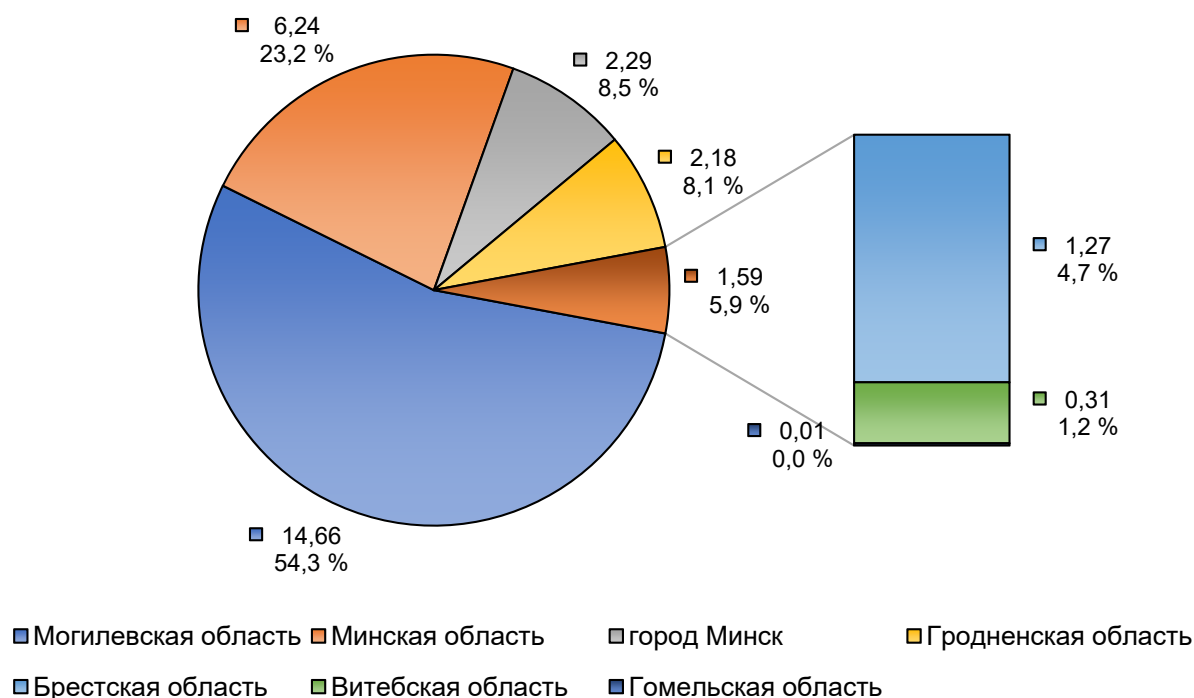


Рис. 4. Соотношение выпуска продукции из полистирола, соответствующей коду ОКРБ 22.21.41.200, по административным единицам в Беларуси, 2020 г., тыс. т

Fig. 4. The ratio of the output of polystyrene products corresponding to the OKRB code 22.21.41.200 for administrative units in Belarus, 2020, thous. t

Сравнивая показатели оборота сырья на территории страны и выпуска вспененных видов продукции, можно заметить, что производство продукции в виде листов и плит пористых превышает оборот полистирола вспенивающегося более чем в 2 раза. Так, например, в 2020 г. примерный оборот сырья составил 13,3 тыс. т, в тот же период выпуск продукции достиг 26,9 тыс. т. Данные различия объясняются тем, что под кодом ОКРБ 22.21.41.200 понимается не только продукция в виде пенополистирольных плит, но и плиты из экструдированного полистирола (XPS). Этот вид продукции производится преимущественно с использованием полистирола общего назначения.

В поддержку данного утверждения свидетельствует наличие в стране больших мощностей по производству XPS. ИООО «Кровельный завод Технониколь», расположенный в г. Осиповичи Могилёвской области, имеет мощности, позволяющие ежегодно выпускать около 360 тыс. м³ плит XPS. При средней плотности плит в 30,5 кг/м³ объем выпуска составляет около 11 тыс. т год, соответственно, и объемы использования сырья будут близкими по значению. Кроме «Технониколь» в стране имеется еще несколько предприятий, выпускающих плиты XPS: ООО «СтиролБай» производит продукцию под маркой Истплекс, ОАО «БАТЭ» – под маркой Батэплекс.

Детальная информация о производстве отдельных видов продукции отсутствует, что затрудняет выделение основных секторов потребления полистирола вспенивающегося: упаковки и строительства. По данным работы [27], на глобальном уровне это соотношение примерно одинаково. В структуре российского потребления около 90 % полистирола связано со строительством [28]. В Западной Европе и США на строительство приходится до 74–75 % общего объема производства. В странах Азии доминирующим сектором является производство упаковки, на долю которого приходится около 64 % общего потребления вспенивающегося полистирола. Согласно полученным данным, в Беларуси преобладающим видом продукции являются теплоизоляционные плиты.

Согласно представленным данным, размещение предприятий, производящих вспененную продукцию из полистирола, крайне неравномерно. Можно предположить, что потребление такой продукции более равномерно, хотя данные о потребителях (промышленные предприятия, строительный сектор, население) отсутствуют. Одним из показателей для оценки техногенной нагрузки, связанной с использованием изделий из вспененных продуктов полистирола, является потребление на душу населения. По состоянию на 2020 г., исходя из данных официальной статистики, этот показатель для Беларуси составляет приблизительно 1,41 кг/чел. (для сравнения: в Германии – 4 кг/чел., в России – 0,7 кг/чел.).

Образование отходов полистирола. Непосредственно производство пенополистирола и экструдированного полистирола считается безотходным, поскольку остатки полистирола (крошка) от производства включаются в технологический процесс. На вторичную переработку поступают и отходы производства изделий из ударопрочного полистирола. Вместе с тем, согласно статистическим данным, в Беларуси образуются отходы полистирола, которые учитываются под следующими кодами в соответствии с общегосударственным классификатором Республики Беларусь ОКРБ 021-2019 «Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь»): 5710800 (Полистирол и пенопласт на его основе, сополимеры стирола), 5710801 (Полистирол), 5710802 (Полистирол загрязненный), 5710803 (Пенопласт полистирола), 5710804 (Отходы пенопласта (полосы и обрезки) производства пенопласта на основе эмульсионного полистирола), 5710831 (Вышедшие из употребления изделия и материалы из полистирола и его сополимеров), 5710833 (Отходы полистирола и его сополимеров при производстве формовых). Указанные категории отходов являются либо сырьем, либо фрагментами готовых изделий, образованных в процессе как производства, так и эксплуатации готовой продукции. Следует отметить, что отходы под кодами 5710801, 5710802, 5710831, 5710833 либо не включают вспененный полистирол, либо включают помимо пенопласта и другие виды стирольных полимеров, например общего назначения или ударопрочный. Соответственно, отходами производства вспененных материалов из полистирола являются отходы с кодами 57108000, 5710803 и 5710804.

Общие объемы образования отходов полистирола в 2020 г. составили 7,2 тыс. т, из которых около 8 % (или 0,55 тыс. т) представлено отходами пенопласта (рис. 5). Среди анализируемых отходов доминируют отходы под названием «отходы полистирола», на долю которых приходится 69 % общего объема их образования. Почти четверть отходов (22 %) представлена вышедшими из употребления изделиями и материалами из полистирола.

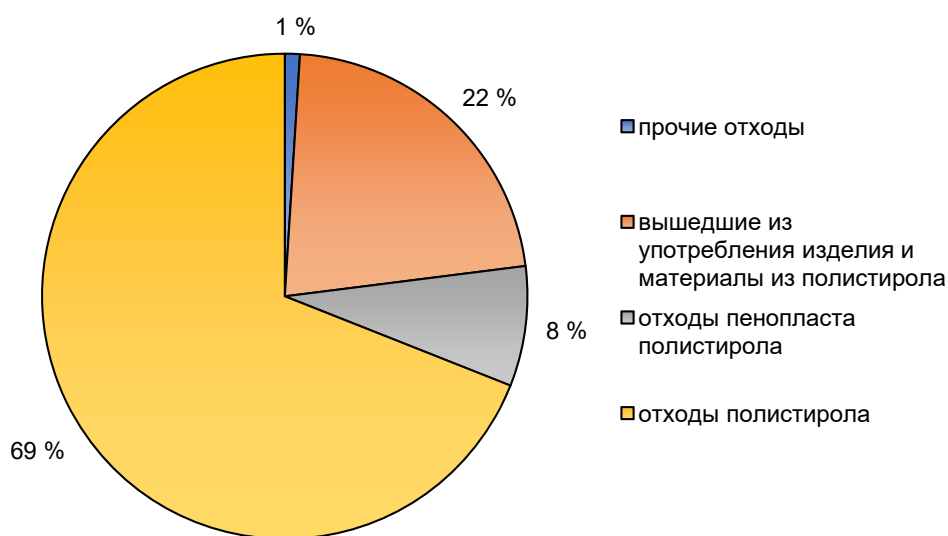


Рис. 5. Структура образования отходов полистирола на территории Беларуси (по данным Бел НИЦ «Экология»), 2020 г.

Fig. 5. The structure of polystyrene waste generation on the territory of Belarus (according to Bel NIC "Ecologiya"), 2020

Пространственное распределение отходов полистирола на фоне высокой доли административных районов, для которых информация отсутствует, весьма неравномерно (рис. 6). Для отходов вспененных материалов из полистирола (коды 57108000, 5710803 и 5710804) характерны более высокие уровни накопления в пределах административных районов с областными городами. Максимальный уровень образования данной категории отходов (более 100 т) в Брестском районе, вероятно, объясняется наличием производств, использующих одноразовую упаковку для перевозки продуктов.

Отходы полистирола под названием «Полистирол» и «Вышедшие из употребления изделия и материалы из полистирола и его сополимеров» также распределены неравномерно. Так, в двух районах (Гомельском и Борисовском) объемы образования превышают 1000 т/год, а в четырех районах составляют от 100 до 1000 т/год. Следует отметить, что 70 % (или 3,45 тыс. т) от общего количества отходов под названием «Полистирол» образуется в Гомельском районе. В то же время в 19 районах образование отходов полистирола не превышает 1 т, а для 64 районов такая информация отсутствует.

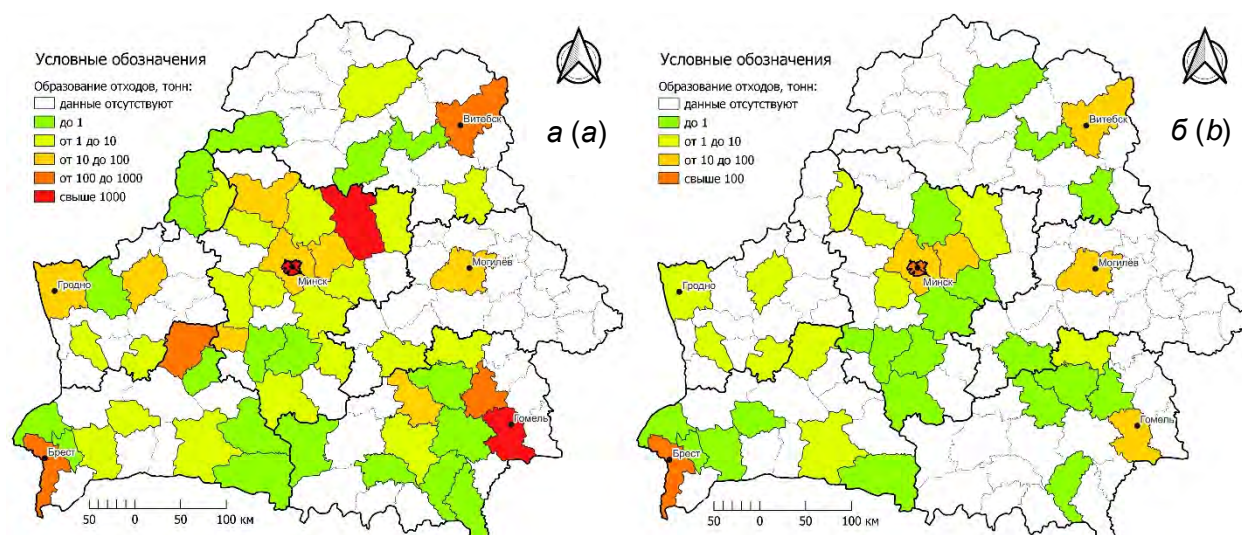


Рис. 6. Распределение отходов полистирола (т) на территории Беларуси по административным районам, 2020 г.: а – всех отходов полистирола; б – отходов пенополистирола

Fig. 6. Distribution of polystyrene waste (t) on the territory of Belarus by administrative districts, 2020: а – all polystyrene waste; б – polystyrene foam waste

Рассматривая номенклатуру и объемы образования отходов необходимо подчеркнуть, что информация касается отходов, образующихся на промышленных предприятиях, в строительстве, на транспорте, в сфере услуг и в коммунальном секторе. Однако пространственный анализ распределения отходов по административным районам показал, что практически для половины территории страны отсутствуют данные официальной статистики. Представляется, что таким образом объемы образования отходов полистирола недоучитываются.

На территории страны нет действующего норматива образования отходов при производстве полистирола беспрессовым способом. Согласно приказу Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 11.05.2011 № 200-ОД, в стране установлен норматив образования отходов производства пенополистирола эмульсионного марок (ПС-1 и ПС-4) в диапазонах от 0,015 до 0,035 т на 1 т готовой продукции. К большинству производств в стране данный норматив малоприменим, поскольку эмульсионный полистирол, получаемый прессовым способом, на данный момент не используется (или практически не используется). Взамен эмульсионного применяется сырье, произведенное суспензионным беспрессовым способом. Вместе с тем производство прессового и беспрессового полистирола имеет схожий процесс. Принимая вышеприведенные удельные показатели, можно предположить, что объемы образования отходов полистирола могут быть существенно более высокими по сравнению с данными официальной статистики. Несмотря на минимизацию отходов полистирола за счет его рециклинга, полное возвращение полистирола в цикл производства практически невозможно, поскольку часть сырья и фрагментов попадает в отходы и выносятся за пределы производственных цехов.

Следует отметить также, что образование отходов полистирола, в первую очередь из вспененных материалов, характерно и в бытовом секторе, так как использование утеплителей из полистирола имеет большую популярность в гражданском строительстве.

Пути поступления полистирола в окружающую среду. Натурные исследования на предприятиях по производству пенополистирольных плит показали, что полистирол вспенивающийся может попадать в окружающую среду практически на всех этапах производственного процесса, начиная с приемки сырья и заканчивая хранением готовой продукции (табл. 2). При этом частицы полистирола могут быть представлены как микропластиком (в случае рассеяния сырья или измельчения изделий/отходов пенополистирола), так и макропластиком различного размера.

При сообщении цехов с открытой промплощадкой возможен перенос частиц на нее ветром или обслуживающим персоналом (ключевую роль здесь играет накопление статического заряда на шариках полистирола и возможность его примагничивания к одежде и рабочей обуви персонала). При попадании на промплощадку любого вида полистирола основными факторами, способствующими его выносу, являются ветровой перенос и ливневый сток. Особую опасность представляют ливневые коллекторы на территории предприятия, поскольку при попадании в них полистирольной крошки или шариков они могут напрямую поступать в водные объекты и в дальнейшем мигрировать на большие

расстояния. Данные процессы миграции сопровождаются выносом частиц в прибрежные зоны при повышении уровня воды, а также осаждением частиц полистирола и попаданием их в донные отложения [20]. Примеры обнаруженных частиц полистирола вблизи промышленных предприятий приведены на рис. 7.

Таблица 2. Источники образования отходов полистирола при производстве материалов из вспенивающегося полистирола

Table 2. Sources of polystyrene waste generation in the production of materials from foaming polystyrene

| Источник поступления | Причина(ы) возникновения | Участок загрязнения | Вид(ы) отходов полистирола |
|---|---|--|--|
| Транспортировка и приемка сырья | Повреждение биг-бэгов (до 1 т), мешков (до 20–30 кг) с сырьем, долговременное хранение открытой тары | Складские помещения / места хранения, промплощадка | Сырье полистирола (гранулы или порошок) |
| Предвспенивание сырья | При ручной загрузке сырья в аппараты, ручной или не полностью закрытый процесс переноса предвспененных гранул (<0,5 мм) в бункеры для вылежки | Помещения цехов (по предвспениванию, с бункерами для вылежки) | Сырье полистирола, отдельные вспененные шарики |
| Формование готовых изделий | Образование обрезков или фрагментов плит при горячей нарезке изделий на листы и блоки | Помещения цехов (по формованию и нарезке готовых изделий) | Мелкие обрезки или крошка пенопласта (макро- и микропластик) |
| Хранение готовой продукции | Повреждение готовой продукции при неосторожном обращении или транспортировке | Склад готовой продукции, промплощадка при организации открытого хранения | Фрагменты, куски или отдельные шарики пенополистирола |
| Вторичное измельчение частиц или фрагментов | Механическое воздействие обуви или шин спецтехники на полистирол, образующийся от вышеописанных источников | Территория, используемая на всех этапах производства | Крошка или отдельные гранулы и их частицы |



Рис. 7. Примеры рассеяния частиц полистирола за пределами промышленных площадок:
а – гранулы пенополистирола около забора предприятия (Дзержинский район);
б – гранулы пенополистирола в водотоке на выходе из ливневого коллектора (г. Минск)

Fig. 7. Examples of releases of polystyrene particles outside industrial sites:
a – foamed polystyrene beads near the fence of the enterprise (Dzerzhinsky district);
b – polystyrene granules in the watercourse at the output of the storm collector (Minsk)

Как указано выше, опасность распространения частиц полистирола обусловлена содержащимися в них антипиренами, прежде всего ГБЦД. В этой связи важным представляется создание эффективной системы природоохранных мероприятий по предотвращению рассеяния и миграции микрочастиц сырья, а также различных фрагментов пенополистирольных изделий.

Заключение. Выполненные исследования показали, что в Беларуси ежегодно используются значительные объемы полистирола вспенивающегося. Насчитывается более 50 промышленных предприятий по производству продукции из данного вида полимерного сырья, которые являются локальными источниками загрязнения окружающей среды частицами полистирола и содержащимися в них антипиренами, прежде всего ГБЦД. Высокая пористость пенополистирола и его способность к легкому разрушению с образованием мельчайших фрагментов способствуют широкому распространению микро- и макрочастиц в водных и наземных экосистемах, что может привести к негативным последствиям для живых организмов.

Предприятия, использующие вспенивающийся полистирол, расположены крайне неравномерно. Наибольшее их количество размещено в г. Минске и Минской области, что обусловлено потребностью крупного города в строительных материалах. Преимущественное расположение предприятий в пределах водосборов рек Днепра и Немана свидетельствует о необходимости повышенного внимания к возможности распространения и миграции микрочастиц полистирола с водными потоками.

Несмотря на то что производство пенополистирола и экструдированного полистирола считается безотходным, на различных этапах производственного процесса происходит рассеяние гранул/порошка полистирола, а также образование и рассеяние различных фрагментов изделий из пенополистирола. Недостаточная организация сбора и утилизации отходов на промышленных площадках способствует их распространению на обширных территориях.

Для эффективного решения данной проблемы необходимо проведение дальнейших исследований, направленных на изучение образования отходов производства, уровней содержания загрязняющих веществ в полимерах стирола, а также совершенствование систем контроля над технологическими процессами производства, повышение осведомленности специалистов и потребителей продукции о необходимости ответственного обращения с сырьем и продукцией из полистирола.

Список использованных источников

1. Bank, M. S. *Microplastic in the Environment: Pattern and Process* / M. S. Bank. – 1st ed. – Cham : Springer International Publishing. – 2022. – 354 p.
2. OECD (2022), *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060*, OECD Publishing, Paris.
3. Cottom, J. W. A local-to-global emissions inventory of macroplastic pollution / J. W. Cottom, E. Cook, C. A. Velis // *Nature*. – 2024. – Vol. 633, № 8028. – P. 101–108.
4. Impacts associated with the plastic polymers polycarbonate, polystyrene, polyvinyl chloride, and polybutadiene across their life cycle: A review / B. J. Seewoo [et al.] // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10, № 12. – P. E32912.
5. Weathering Plastics as a Planetary Boundary Threat: Exposure, Fate, and Hazards / P. H. Arp [et al.] // *Environmental Science & Technology*. – 2021. – Vol. 55, № 11. – P. 7246–7255.
6. Kleshchenkov, A. Microplastic is a problem of planetary scale / A. Kleshchenkov, T. Filatova // *Science almanac of Black Sea region countries*. – 2019. – № 2. – P. 66–78.
7. Data Bridge Market Research Private. Рынок полистирола: размер, доля, спрос и обзор отрасли к 2030 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-polystyrene-market>. – Дата доступа: 11.09.2024.
8. Secondary microplastics generation in the sea swash zone with coarse bottom sediments: Laboratory experiments / I. Efimova [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. – 2018. – Vol. 5, № SEP.
9. Efimova, I. V. Fragmentation of plastic garbage in the surf zone of the sea: a laboratory experiment on the example of expanded polystyrene / I. V. Efimova, I. P. Chubarenko // *Series: Earth Sciences*. – 2018. – Vol. 18, № 1. – P. 10–13.
10. Бек-Булатов, А. И. Пенополистирол – история создания и долговечность / А. И. Бек-Булатов // *Строительные материалы*. – 2010. – № 3.
11. Secretariat of the Stockholm convention Guidance for HBCD / Secretariat of the Stockholm convention [Electronic resource]. – Mode of access: <https://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-NIP-GUID-InventoriesAndSubstitution-HBCD-201703.En.pdf>. – Date of access: 11.09.2024.
12. Widespread detection of a brominated flame retardant, hexabromocyclododecane, in expanded polystyrene marine debris and microplastics from South Korea and the Asia-Pacific coastal region / M. Jang [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2017. – Vol. 231. – P. 785–794.
13. Carpenter, E. J. Plastics on the Sargasso Sea Surface / E. J. Carpenter, K. L. Smith // *Science*. – 1972. – Vol. 175, № 4027. – P. 1240–1241.
14. Polystyrene Spherules in Coastal Waters / E. J. Carpenter [et al.] // *Science*. – 1972. – Vol. 178, № 4062. – P. 749–750.

15. Composition and distribution of beach debris in Orange County, California / S. L. Moore [et al.] // *Mar. Pollut. Bull.* – 2001. – Vol. 42 (3). – P. 241–245
16. Gordon, M. Eliminating land-based discharges of marine debris in California: a plan of action from the plastic debris project [Electronic resource] / M. Gordon // California Coastal Commission. – 2006. – Mode of access: <https://www.yumpu.com/en/document/view/42231824/eliminating-land-based-discharges-of-marine-debris-in-california>. – Date of access: 18.02.2023.
17. Esiukova, E. Plastic pollution on the Baltic beaches of Kaliningrad region, Russia / E. Esiukova // *Marine Pollution Bulletin*. – 2017. – Vol. 114, № 2. – P. 1072–1080.
18. Plastics everywhere: first evidence of polystyrene fragments inside the common Antarctic collembolan *Cryptopygus antarcticus* / E. Bergami [et al.] // *Biology Letters*. – 2020. – Vol. 16, № 6. doi:10.1098/rsbl.2020.0093
19. Кухарчик, Т. И. Загрязнение почв микропластиком при производстве пенополистирола / Т. И. Кухарчик, В. Д. Чернюк // *Почвоведение*. – 2022. – № 3. – С. 370–380.
20. Загрязнение полистиролом прибрежных зон малых рек на урбанизированной территории / Т. И. Кухарчик [и др.] // *Природопользование*. – 2024. – № 1. – С. 68–77.
21. Волкова, А. В. Рынок крупнотоннажных полимеров [Электронный ресурс] / А. В. Волкова. – Режим доступа: <https://dcenter.hse.ru/data/2020/07/07/1595325171/Рынок%20крупнотоннажных%20полимеров-2020.pdf>. – Дата доступа: 16.04.2022.
22. European Commission Study on waste related issues of newly listed POPs and candidate POPs № ENV.G.4/FRA/2007/00 / European Commission [Electronic resource]. – Mode of access: https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/impel_report_09.pdf. – Date of access: 02.06.2024.
23. Кухарчик, Т. И. Использование гексабромциклододекана в Беларуси, проблемы выявления и предотвращения поступления в окружающую среду / Т. И. Кухарчик, М. И. Козыренко // *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук*. – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 74–81.
24. Рупышев, Владимир. Обзор потребительского рынка полистирола России и СНГ [Электронный ресурс] / Владимир Рупышев // *The Chemical Journal*. – Режим доступа: https://tcj.ru/wp-content/uploads/2013/12/2006_1_46-53.pdf. – Дата доступа: 10.05.2023.
25. Полимерный антипирен [Электронный ресурс] // АО «Сибур-Химпром». 28.02.2019. – Режим доступа: <https://alphapor.ru/upload/iblock/e0b/e0b4f6278c7d79be53a9d919eb49ab41.pdf>. – Дата доступа: 10.07.2021.
26. СИБУР перешел на производство ПСВ Альфатор с «зеленым антипиреном» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://alphapor.ru/news/sibur-pereshel-na-proizvodstvo-psv-alfapor-s-zelenym-antipirenom.php>. – Дата доступа: 10.07.2021.
27. Мировой рынок вспенивающегося полистирола [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.polymer.ru/letter.php?n_id=885&cat_id=10. – Дата доступа: 10.09.2024.
28. Inventra: Полистирол и АБС-пластики 2018 – хорошо будет? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://plastinfo.ru/information/articles/664/>. – Дата доступа: 12.09.2024.

References

1. Bank M. S. *Microplastic in the Environment: Pattern and Process*. 1st ed. Cham, Springer International Publishing, 2022, 354 p.
2. OECD (2022), *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060*, *OECD Publishing*, Paris.
3. Cottom J. W., Cook E. Velis, C. A. A local-to-global emissions inventory of macroplastic pollution. *Nature*, 2024, vol. 633, no. 8028, pp. 101–108.
4. Seewoo B. J., e.a. Impacts associated with the plastic polymers polycarbonate, polystyrene, polyvinyl chloride, and polybutadiene across their life cycle: a review. *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 12, pp. E32–912.
5. Arp H. P., e.a. Weathering Plastics as a Planetary Boundary Threat: Exposure, Fate, and Hazards. *Environmental Science & Technology*, 2021, vol. 55, no. 11, pp. 7246–7255.
6. Kleshchenkov A., Filatova T. Microplastic is a problem of planetary scale. *Science almanac of Black Sea region countries*, 2019, no. 2, pp. 66–78.
7. *Data Bridge Market Research Private. Rynok polistirola: razmer, dolya, spros i obzor otrasli k 2030 godu* [Data Bridge Market Research Private Polystyrene Market: Size, Share, Demand and Industry Outlook to 2030]. Available at: <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-polystyrene-market> (accessed 11 September 2024). (in Russian)
8. Secondary microplastics generation in the sea swash zone with coarse bottom sediments: Laboratory experiments. *Frontiers in Marine Science*, 2018, vol. 5, no. SEP.
9. Efimova I., Bagaeva M., Bagaev A., Kileso A., Chubarenko I. P. Fragmentation of plastic garbage in the surf zone of the sea: a laboratory experiment on the example of expanded polystyrene. *Series: Earth Sciences*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 10–13.
10. Bek-Bulatov A. I. *Penopolistirol – istoriya sozdaniya i dolgovechnost'* [Polystyrene foam – history of creation and durability]. *Stroitel'nyye materialy = Construction materials*, 2010, no. 3. (in Russian)
11. Secretariat of the Stockholm convention Guidance for HBCD. Available at: <https://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-NIP-GUID-InventoryAndSubstitution-HBCD-201703.En.pdf> (accessed 11 September 2024).

12. Mi J., Won J. S., Gi M. H., Manvir R., Young K. S., Sang H. H. Widespread detection of a brominated flame retardant, hexabromocyclododecane, in expanded polystyrene marine debris and microplastics from South Korea and the Asia-Pacific coastal region. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 231, pp. 785–794.
13. Carpenter E. J., Smith K. L. Plastics on the Sargasso Sea Surface. *Science*, 1972, vol. 175, no. 4027, pp. 1240–1241.
14. Carpenter E. J., Anderson S. J., Harvey G. R., Miklas H. P., Peck B. B. Polystyrene Spherules in Coastal Waters. *Science*, 1972, vol. 178, no. 4062, pp. 749–750.
15. Moore S. L., Gregorio D., Carreon M., Weisberg S. B., Leecaster M. K. Composition and distribution of beach debris in Orange County, California. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, vol. 42 (3), pp. 241–245.
16. Gordon M. Eliminating land-based discharges of marine debris in California: a plan of action from the plastic debris project. *California Coastal Commission*. 2006. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/view/42231824/eliminating-land-based-discharges-of-marine-debris-in-california> (accessed 18 February 2023).
17. Esiukova E. Plastic pollution on the Baltic beaches of Kaliningrad region, Russia. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, vol. 114, no. 2, pp. 1072–1080.
18. Bergami E., Rota E., Caruso E., Birarda T., Vaccari G., Corsi L. I. Plastics everywhere: first evidence of polystyrene fragments inside the common Antarctic collembolan *Cryptopygus antarcticus*. *Biology Letters*, 2020, vol. 16, no. 6. doi:10.1098/rsbl.2020.0093
19. Kukharchyk T. I., Chernyuk V. D. *Zagryazneniye pochv mikroplastikom pri proizvodstve vspenennogo polistirola* [Soil pollution with microplastics in the production of expanded polystyrene]. *Pochvovedeniye = Soil Science*, 2022, no. 3, pp. 370–380. (in Russian)
20. Kukharchyk T. I., Ryabychin K. O., Meleshko A. A., Chernyuk V. D. *Zagryazneniye polistirolom pribrezhnykh zon malen'kikh rek na urbanizirovannoy territorii* [Polystyrene pollution of coastal zones of small rivers in urbanized areas]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 68–77. (in Russian)
21. Volkova A. V. *Rynok krupnotonnazhnykh polimerov – 2020* [Large-Tonnage Polymers Market – 2020]. Available at: [https://dcenter.hse.ru/data/2020/07/07/1595325171/Рынок %20крупнотоннажных %20полимеров-2020.pdf](https://dcenter.hse.ru/data/2020/07/07/1595325171/Рынок%20крупнотоннажных%20полимеров-2020.pdf) (accessed 16 March 2022). (in Russian)
22. European Commission Study on waste related issues of newly listed POPs and candidate POPs № ENV.G.4/FRA/2007/00 / European Commission. Available at: https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/impel_report_09.pdf (accessed 02 June 2024).
23. Kukharchyk, T. I., Kozyrenko M. I. *Ispol'zovaniye geksabromtsiklododekana v Belarusi, problemy vyyavleniya i pre-dotvrashcheniya postupleniya v okruzhayushchuyu sredu* [Use of hexabromocyclododecane in Belarus, problems of detection and prevention of release into the environment]. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarus'i. Seryya khimichnykh navuk* [News of the National academy of sciences of Belarus. Series of chemical sciences]. 2016, no. 1, pp. 7481. (in Russian)
24. *The Chemical Journal. Vladimir Rupyshev. Obzor potrebitel'skogo rynka polistirola Rossii i SNG* [The Chemical Journal. Vladimir Rupyshev. Review of the consumer market of polystyrene in Russia and the CIS]. Available at: https://tcj.ru/wp-content/uploads/2013/12/2006_1_46-53.pdf (accessed 10 May 2023). (in Russian)
25. *Polimernyy antipiren. AO "Sibur-Khimprom"*. [Polymer fire retardant. JSC Sibur-Khimprom]. Available at: <https://alphapor.ru/upload/iblock/e0b/e0b4f6278c7d79be53a9d919eb49ab41.pdf> (accessed 10 July 2021). (in Russian)
26. *SIBUR pereshel na proizvodstvo PSV Al'fapor s "zelenym antipirenom"* [SIBUR Switches to Production of PSV Alfapor with "Green Flame Retardant"]. Available at: <https://alphapor.ru/news/sibur-pereshel-na-proizvodstvo-psv-alfapor-s-zelenym-antipirenom.php> (accessed 10 July 2021). (in Russian)
27. *Mirovoy ryok vspenivayushchegosya polistirola* [World market of expanded polystyrene]. Available at: http://www.polymer.ru/letter.php?n_id=885&cat_id=10 (accessed 10 September 2024). (in Russian)
28. *Inventra: Polistirol i ABS-plastiki 2018 – khorosho budet?* [Inventra: Polystyrene and ABS plastics 2018 – will it be good?]. Available at: <https://plastinfo.ru/information/articles/664/> (accessed 12 September 2024). (in Russian)

Информация об авторах

Кухарчик Тамара Иосифовна – доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tkukharchyk@gmail.com

Рябычин Кирилл Олегович – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: ryabychin.ltp.bas@gmail.com

Information about the authors

Tamara I. Kukharchyk – D. Sc. (Geography), Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tkukharchyk@gmail.com

Kirill O. Ryabychyn – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: ryabychin.ltp.bas@gmail.com