

ДЕГРАДАЦИЯ,
ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 504.05+504.53

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВ МИКРОПЛАСТИКОМ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА

© 2022 г. Т. И. Кухарчик^а, *, В. Д. Чернюк^а

^аИнститут природопользования Национальной академии наук Беларуси, ул. Ф. Скорины, 10, Минск, 220076 Беларусь

*e-mail: tkukharchyk@gmail.com

Поступила в редакцию 29.07.2021 г.

После доработки 04.10.2021 г.

Принята к публикации 29.10.2021 г.

Представлены результаты изучения загрязнения почв микропластиком в зоне влияния промышленного предприятия по производству пенополистирольных плит (Минск, Беларусь). Исследования выполнены на промплощадке и в пойме малой реки на расстоянии до 500–600 м от источника; отобраны и проанализированы пробы аллювиальной (Fluvisols) почвы, донных отложений и наносных грунтов с промплощадки. Определение содержания частиц полистирола в отобранных пробах осуществлялось с использованием методов просеивания сухих навесок, флотации в дистиллированной воде и нагревания. Для удаления природных органических веществ использовался 30%-ный раствор перекиси водорода. Количество частиц микропластика определялось визуально во фракциях 3–5, 2–3, 1–2 и <1 мм. Установлено, что частицы полистирола обнаруживаются во всех изученных пробах почв, донных отложений и техногенных грунтов. Содержание частиц полистирола размером <5 мм в почве промплощадки варьирует от 31 до 175 ед./кг, в почве поймы – от 94 до 8864 ед./кг. В большинстве случаев доминируют фракции размером <1, реже – 1–2 мм. Микропластик обнаружен как в верхних горизонтах почвы (0–5 см), так и на глубине до 15–20 см. Показано, что рассеяние гранул сырья (полистирола вспенивающегося) и отходов (вспененных гранул и крошки пенопласта) осуществляется преимущественно с поверхностным стоком.

Ключевые слова: полистирол вспенивающийся, пенопласт, гранулы сырья, промплощадка, пойма

DOI: 10.31857/S0032180X2203008X

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы особое внимание уделяется загрязнению природной среды пластиком и микропластиком, который обнаруживается в различных компонентах и представляет собой новую угрозу природным экосистемам и здоровью человека [3, 17, 34]. Однако, несмотря на огромный интерес к данной проблеме в целом, и тот факт, что еще в 1970-х годах идентификация микропластика была выполнена не только в морской среде, но и на побережье [9, 14], почвы до недавнего времени оставались практически вне поля зрения ученых. Лишь в 2012 г. на актуальность и необходимость исследований наземных экосистем и почв в связи с их загрязнением микропластиком указал М. Риллиг [31]. Менее чем за 10 лет работы по изучению загрязнения активизировались в различных странах, подтверждая как глобальный характер распространения микропластика [3, 4, 25, 30, 36], так и его негативное воздействие на почвенную биоту [2, 7, 18, 21]. Распространение микропластика в почвах достигло уровня, который нельзя игнорировать, поскольку объе-

мы аккумуляции могут значительно превышать его накопление в Мировом океане [3, 16, 18].

Загрязнение почв микропластиком отличается чрезвычайным разнообразием, что обусловлено широкой вариабельностью размеров частиц пластика, их характеристик (формы, физических и химических свойств и др.), источников поступления и путей распространения. Накопленный к настоящему времени опыт исследований, представленный в ряде обобщающих работ [6, 17, 22, 27, 29, 37], а также теоретические расчеты и моделирование [26, 36] подтверждают многогранность проблемы в связи с растущими объемами отходов пластика, огромным количеством источников и потоков, а также объектов живой и неживой природы, на которые воздействует микропластик.

Различают первичный пластик, представляющий собой сырье в виде твердых гранул или порошка, и вторичный – фрагменты готовых изделий и отходов. В большинстве случаев и первичный, и вторичный пластик поступает именно в почву и лишь затем перераспределяется с радиальными и латеральными потоками в другие природные среды. Попадая в почву, пластик сохра-

няется многие годы, подвергаясь механическим и биологическим воздействиям, воздействию ультрафиолета, колебаниям температуры и влаги. Фрагментация и частичная деградация пластика делает его биодоступным, что представляет потенциальный риск для организмов.

Особого внимания заслуживает полистирол как один из приоритетных по масштабам производства и применения полимеров (после полиэтилена, полипропилена и поливинилхлорида). По состоянию на 2015 г. объемы производства полистирола в глобальном масштабе составили 25 млн т, что составляет 7.6% общего объема полимеров [13]. Полистирол производится в виде мелких гранул размером от <1 до 4 мм, которые могут рассыпаться на различных этапах обращения с сырьем. Продукция из полистирола, в том числе пенополистирольные плиты (пенопласт), состоящий на 98% из воздуха, легко ломается и крошится, и, оказавшись в окружающей среде, может легко переноситься ветром и поверхностным стоком. Негативные воздействия микропластика полистирола на живые организмы уже получили подтверждение. Так, на опасность полистирола для почвенной биоты (дождевых червей) указано в исследованиях [7, 20], для человека – в работе [19].

Вместе с тем изученность загрязнения почв микропластиком в полевых условиях, включая микропластик полистирола, очень низка [21]. Практически нет работ, посвященных промышленным предприятиям как источникам воздействия.

В Беларуси с 2010 г. объемы использования только вспенивающегося полистирола составляют около 20 тыс. т ежегодно, а объемы производства пенополистирольных изделий в целом составляют от 46.3 до 63.1 тыс. т [1]. Насчитывается несколько десятков промышленных предприятий по производству пенополистирольных плит.

Цель работы – количественно оценить содержание частиц микропластика в почве и других твердых субстратах в зоне воздействия предприятия по производству пенополистирольных плит.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования выбрано предприятие по производству пенополистирольных плит и других изделий из пенопласта, расположенное в юго-западной части г. Минска (Беларусь) вблизи малой р. Мышка, на левом высоком берегу. Технологический цикл производства включает процесс вспенивания гранул полистирола. Отходы от производства и брак отправляются на дробильную установку и возвращаются в технологический процесс. Производство осуществляется с 1991 г.

На территории предприятия непокрытые участки почвы сохранились в виде небольших га-

зонов с травянистой растительностью и посадками декоративных кустарников, также имеются незадернованные участки. Поверхностные горизонты почвы представлены насыпными грунтами (песком разнозернистым, супесью гумусированной). На асфальтированной поверхности в понижениях, в том числе у ливневых решеток и бордюров, сформировались наносные грунты, представленные песком мелкозернистым и тонкозернистым с различными техногенными примесями, включая фрагменты пенополистирольных плит и вспененные гранулы полистирола. Поскольку наносные грунты могут перемещаться с различными потоками за пределы промплощадки, выполнен их отбор на различном удалении от цеха по производству пенополистирольных плит и склада открытого хранения.

С учетом рельефа местности и направления поверхностного стока повышенное внимание уделялось сохранившемуся в естественном состоянии участку поймы р. Мышка, удаленному от производственных цехов на 500–600 м. Четко выраженные уклоны поверхности обеспечивают поступление поверхностного стока с территории предприятия. На данном участке пойма реки расширяется до 100 м; в ее пределах имеются остатки небольших старичных водоемов и старое русло, пересыхающие (или сильно мелеющие), как и основное русло, в летний сезон. Русло реки слабо выражено в рельефе. При выборе точек опробования принималось, что во время ливневых осадков или таяния снега поверхность данного участка может полностью затапливаться. Почва аллювиальная (Fluvisols); поверхностные горизонты представлены супесью иловатой, местами оторфованной, с включениями песка и мелких камней. В ряде случаев четко выделяются слои наносных грунтов.

Исследования показали, что фрагменты пенопласта и вспененные гранулы полистирола хорошо диагностируются визуально как на поверхности почвы (под опавшими листьями), так и на глубине до 15–20 см.

Отбор проб почв осуществлялся по обе стороны русла реки, на разном удалении от крутого склона долины, где размещена промплощадка. С использованием пробоотборника из металла, как указано в работе [5], отбирались смешанные и точечные пробы (табл. 1). Смешанная проба формировалась из пяти точечных проб с площади примерно 5 × 5 м.

Стандартизированные методы выделения и количественного определения содержания частиц микропластика из почвы отсутствуют. В зависимости от целей и задач исследований, типов пластика и субстратов используется сочетание методов с первоначальным фракционированием проб на ситах и флотацией в различной плотности растворах или в специальных аппаратах, а

Таблица 1. Общая характеристика мест отбора проб почвы, наносного грунта и донных отложений в зоне влияния предприятия по производству пенополистирольных плит

Место отбора проб	Субстрат	Тип пробы	Глубина отбора, см	Число проб (номер)	Примечание
Промплощадка	Почва техногенная (Technosols)	Смешанная	0–5	1 (236)	Газон в 10–15 м от цеха по производству плит; супесь, грунт насыпной
			0–5	1 (240)	Сквер, 90 м от цеха, супесь, грунт насыпной
	Точечная	10–15	1 (241)	Сквер, 110 м от цеха, песок р/з включениями камней, грунт насыпной	
	Наносной грунт с асфальтовой поверхности		0–1(2)	2 (237, 238)	5–15 м от цеха
Смешанная		0–2	1 (239)	Возле участка хранения плит	
Возле промплощадки, 3 м от забора предприятия	Почва техногенная (Technosols)	Смешанная	0–2	1 (241)	У бордюра, 340 м от цеха
Пойма р. Мышка, 500–600 м от предприятия; правый берег	Почва техногенная (Technosols)	Смешанная	0–5	1 (272)	Песок насыпной, шарики вспененного полистирола
		Смешанная	0–10(15)	5 (273, 275, 277, 280, 282)	Иловатые, песчанистые, местами оторфованные отложения, шарики вспененного полистирола
То же; левый берег	Почва аллювиальная (Fluvisols)	Точечная	0–5	1 (289)	
		Смешанная	0–10(18)	3 (278, 279, 281)	
		Точечная	0–5	1 (288-1)	Иловатые отложения, встречаются шарики вспененного полистирола
			15–20	1 (288-2)	Иловатые отложения, обилие шариков вспененного полистирола
Бывшее русло р. Мышки		Точечная	0–5	1 (290-1)	Иловатые отложения, обилие шариков вспененного полистирола
			10–15	1 (290-2)	Иловатые отложения, обилие шариков вспененного полистирола
Современное русло р. Мышка	Донные отложения	Смешанная	5–10	1 (271-2)	Иловатые отложения, обилие шариков вспененного полистирола
То же, 800 м от предприятия		Смешанная	0–5	2 (286, 291)	Иловатые отложения, встречаются шарики вспененного полистирола
			0–3	1 (292)	Иловатые отложения, на берегу фрагменты пенопласта

также термоаналитических, микроскопических, спектроскопических и других методов [15, 16, 23, 24, 35, 37–39].

Для определения содержания частиц микропластика полистирола выбраны и применены следующие методы: просеивание с использованием стандартного набора сит, флотация в дистиллированной воде и нагревание.

На первом этапе проба почвы и других субстратов после высушивания до воздушно-сухого состояния осторожно перемешивали для исключения механического повреждения частиц полистирола, раскладывали на крафт-бумагу равномерным слоем в виде квадрата и квартовали. После извлечения крупных включений (камней, корней растений) из центра каждой части отбира-



Рис. 1. Общий вид некоторых проб твердых субстратов после фракционирования с использованием сит: а – наносного грунта (пробы 237), б – почва с промплощадки (проба 236), с – почва с поймы (проба 289).

ли пробу в бюкс объемом 70 мл, обеспечивая захват всей толщины слоя. Всего из одной пробы отбирали 4 бюкса. Каждый бюкс взвешивали до и после его заполнения. Далее пробу из каждого бюкса просеивали на ситах 5, 3, 2 и 1 мм. Полученные фракции взвешивали, после чего во фракциях более 2 мм проводили подсчет визуально заметных фрагментов полистирола и рассчитывали их среднее значение.

Общий вид некоторых фракционированных проб приведен на рис. 1.

В более мелких фракциях частицы полистирола были заметны, однако оценить их количество не представлялось возможным. Поэтому для проб с размерами частиц 1–2 и <1 мм применяли дополнительный метод флотации в дистиллированной воде. Для этого пробу соответствующей фракции снова квартовали, и отбирали усредненную навеску 10 г. Затем проводили очистку почвы с целью удаления естественных органических остатков, которые всплывают в воде и мешают определению частиц полистирола. Для этого пробу обрабатывали 30%-ным раствором перекиси водорода в соотношении 1 : 5. Согласно [11], данный реагент используется чаще других для аналогичных целей. Полученную суспензию тщательно перемешивали и оставляли до окончания реак-

ции перекиси водорода с органической частью. После разложения растительных остатков к пробе доливали 50 мл дистиллированной воды. Раствор тщательно взбалтывали для высвобождения полистирола от частиц почвы и отстаивали для осаждения взвешенных частиц. Далее полученный раствор подогревали в сушильном шкафу при температуре около 100°C до полного испарения воды и получения сухой почвы. Под действием температуры гранулы сырья полистирола начинали набухать и вспениваться, что в дальнейшем позволяло визуально определить их количество в выбранной навеске (рис. 2).

В ряде проб из-за того, что после их высушивания имелись сцементированные глинистыми частицами фрагменты, в которых могли быть частицы полистирола, фазу фракционирования пропускали. Из пробы путем квартования отбирали навеску почвы 10 г, которую заливали дистиллированной водой в соотношении почва : вода – 1 : 5 и тщательно взбалтывали для высвобождения полистирола. Затем повторяли процедуру с нагревом и последующим подсчетом вымытых водой и/или вспененных гранул полистирола. В некоторых случаях гранулы полистирола, оставаясь сильно загрязненными почвой, достаточно хоро-

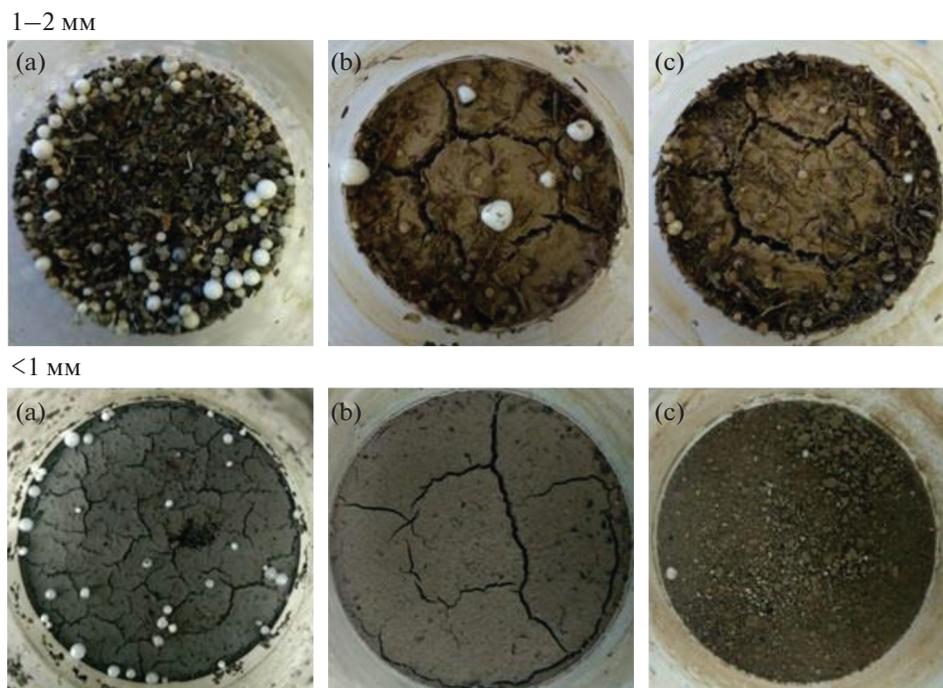


Рис. 2. Общий вид некоторых проб твердых субстратов после флотации и нагрева. Пробы сверху: а – наносного грунта (проба 237), б – почва с промплощадки, 0–5 см (проба 240); с – почва с промплощадки, 10–15 см (проба 241); пробы снизу: а – наносного грунта (проба 237); б – почва с промплощадки, 0–5 см (проба 236); с – почва с промплощадки, 10–15 см (проба 241).

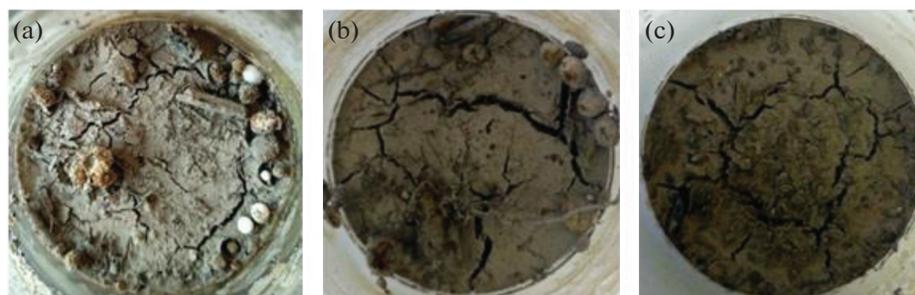


Рис. 3. Общий вид некоторых проб твердых субстратов после флотации и нагрева (без фракционирования на ситах): а – почва с поймы, 0–13 см (проба 273), б – почва с поймы, 0–18 см (проба 279); с – донные отложения, 0–5 см (проба 286).

шо выделялись по морфологическим и другим признакам (рис. 3).

Всего было проанализировано 17 проб почвы, 4 пробы донных отложений и 4 пробы техногенных грунтов.

При оценке общего содержания частиц микропластика полистирола в пробах почвы и других субстратов суммировали данные по фракциям от <1 до 5 мм. Количество частиц микропластика пересчитано на килограмм сухой массы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полистирол в пробах почв и грунтов промплощадки. Результаты исследований показали, что во

всех пробах содержатся частицы полистирола. При этом в пробах наносных грунтов, сформированных вблизи цеха по производству плит и места хранения готовой продукции на расстоянии от 5 до 20 м, хорошо выделяются фрагменты пенополистирольных плит размером от 5 до 25 мм, а также отдельные гранулы вспененного полистирола белого цвета. Во фракциях проб размером от 2 до 5 мм также присутствуют фрагменты пенопласта и гранулы серого и белого вспененного полистирола. Во фракциях 1–2 и <1 мм количество таких частиц особенно высоко и достигает сотен и тысяч единиц на килограмм грунта (табл. 2).

Суммарное содержание частиц микропластика полистирола (размером <5 мм) в наносных грунтах варьирует в пределах 621–5594 ед./кг

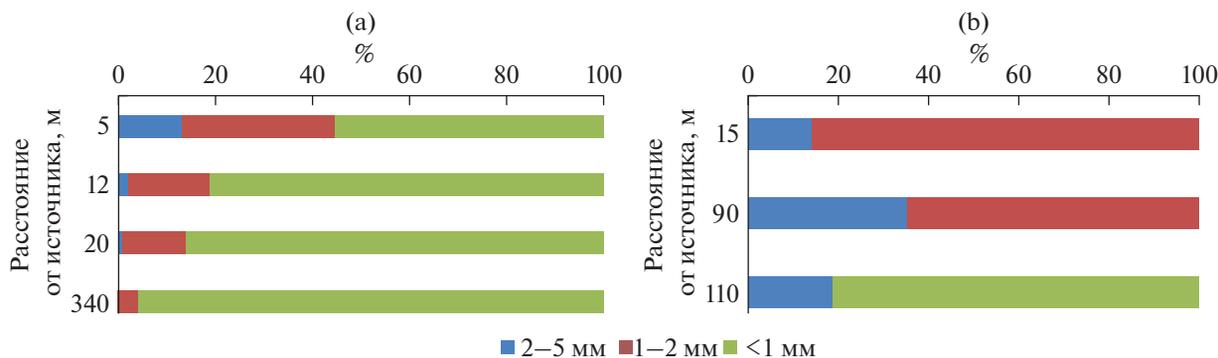


Рис. 4. Доля частиц полистирола различных фракций в пробах наносных грунтов (а) и почв (б), отобранных на промплощадке предприятия по производству пенополистирольных плит.

грунта. Максимальное количество частиц полистирола размером <5 мм зафиксировано вблизи цеха по производству пенополистирольных плит (проба 237). Обращает на себя внимание большое содержание частиц полистирола в пробах наносного грунта, отобранного у ливневой решетки (проба 239) – примерно 2900 ед./кг субстрата. В пробе грунта, отобранного на удалении от источников на 340 м, обнаружены частицы размером 1–2 и <1 мм, что свидетельствует о рассеянии на промплощадке гранул сырья полистирола.

В пробах почвы, отобранной на промплощадке на разном удалении от цеха по производству пенополистирольных плит, содержание частиц микропластика варьирует от 90 до 315 ед./кг сухого вещества. Фрагменты готовых изделий (пенопласта) обнаружены в почве на ближайшем к цеху газоне (проба 236); в других пробах присутствуют гранулы вспененного полистирола и гранулы сырья. Максимальное количество частиц полистирола, представленных в основном фракцией <1 мм, зафиксировано в почве на глубине 10–15 см, что

может означать перемещение микропластика вниз по профилю (с водой по корням растений, ходам землеройных животных и дождевых червей).

В целом основное количество выявленных частиц микропластика в техногенных грунтах и почве на территории промплощадки представлено фракциями 1–2 и <1 мм, на долю которых в техногенных грунтах приходится иногда до 99–100% (рис. 4, А). В пробах поверхностных горизонтов почвы доминируют частицы полистирола размером 1–2 мм, на глубине 10–15 см – <1 мм (рис. 4, В).

Полистирол в почвах зоны влияния предприятия. В пробе почвы, отобранной вблизи предприятия на газоне, общее количество зафиксированных частиц полистирола размером <5 мм оценивается в 86 ед./кг сухого вещества, в том числе размером менее <1 мм – 64 ед./кг сухого вещества. Это означает, что несмотря на слабо выраженный уклон поверхности, поступление сюда частиц полистирола (прежде всего, в виде гранул сырья) осуществляется с поверхностным стоком с промплощадки.

Таблица 2. Содержание частиц полистирола в пробах техногенного субстрата и почвы на территории промплощадки, ед./кг сухого вещества

№ пробы	Расстояние от цеха, м	Глубина отбора, см	Количество частиц по фракциям					Всего частиц <5 мм
			>5 мм	3–5 мм	2–3 мм	1–2 мм	<1 мм	
Наносные грунты								
237	5	0–2	18	72	693	1727	3102	5594
238	12	0–1	8	18	12	251	1197	1478
239	20	0–2	–	7	22	362	2445	2836
242	340	0–2	–	–	–	25	596	621
Почва								
236	15	0–5	7	3	10	77	–	90
240	90	0–5	–	–	11	20	–	31
241	110	10–15	–	–	3	57	255	315

Примечание. Здесь и далее прочерк – не определяли.

Таблица 3. Содержание частиц микропластика полистирола в пробах почвы в пойме р. Мышка и отложениях русла, ед./кг сухого вещества

№ пробы	Глубина отбора, см	Количество частиц по фракциям					Всего частиц <5 мм
		>5 мм	3–5 мм	2–3 мм	1–2 мм	<1 мм	
Донные отложения							
271-2	5–10	79	1711	1625	2084	557	5977
286	0–5	–	–	–	–	–	100**
291	0–3	25	11	4	–	199	213
292	0–3	–	–	–	34	–	34
Почва							
273	0–13*	–	–	–	–	–	2100**
275	0–12*	–	5	–	20	69	94
277	0–11*	–	14	14	215	226	469
278	0–18*	18	86	52	878	547	1563
279	0–18*	–	–	–	–	–	1750**
280	0–13*	17	163	112	362	327	964
281	0–14*	5	62	21	26	272	380
282	0–15*	–	–	–	–	–	200**
288	0–5	–	–	5	278	802	1085
	5–20	–	11	5	584	93	694
289	0–5	464	5279	2489	1054	53	8875
290	0–5	10	234	78	98	392	802
	10–15	134	771	503	868	1109	3252

* Пробы смешанные, отобранные методом конверта.

** Применялся только метод флотации с нагревом.

Значительно больше содержание частиц полистирола в пробах почв, отобранных в пойме р. Мышка (табл. 3).

Максимальное содержание (8875 ед./кг сухого вещества) зафиксировано в поверхностных горизонтах почвы (проба 289, 0–5 см) возле потенциального места поступления поверхностного стока с промплощадки. Именно вблизи заложения данной точки обнаруживаются скопления фрагментов пенопласта и вспененных гранул полистирола, которые частично перекрыты опавшими листьями. В почве доминируют вспененные гранулы с размерами частиц от 2 до 5 мм, на долю которых приходится 88% общего количества частиц микропластика. Отобранная рядом проба донных отложений в русле (проба 271-2) с глубины 5–10 см характеризуется сходным содержанием частиц полистирола (5977 ед./кг), хотя соотношение здесь вспененных гранул размером от 2 до 5 мм и гранул сырья (<2 мм) примерно одинаково.

Для ряда проб применяли лишь метод флотации с нагревом, поскольку полистирол был прочно сцеплен с почвой и остатками растительности и находился как во вспененной форме, так и в ви-

де сырья. Содержание частиц полистирола в таких пробах варьировало от 200 до 1300 ед./кг сухого вещества в почве и от 100 до 700 ед./кг сухого вещества в донных отложениях.

Во всех смешанных пробах, характеризующих почву поймы на данном участке на глубину до 15–18 см, обнаружены частицы полистирола. Их содержание находилось в диапазоне от 94 до 2100 ед./кг сухого вещества. Во всех случаях преобладали частицы полистирола размером <2 мм, выявляемые только при нагревании пробы за счет их вспенивания. Сравнение результатов определения микропластика в пробах почвы, отобранных на левом и правом берегах реки, позволяет сделать вывод о вариабельности их содержания и достаточно близких уровнях. Так, количество частиц полистирола размером <2 мм соответственно составило 272–1425 и 69–689 ед./кг сухого вещества. Тем самым подтверждается предположение о распространении и латеральном перераспределении микропластика при колебаниях уровня воды в реке и при затоплении поймы. Легкие частицы полистирола могут всплывать на поверхность и при подъеме воды перемещаться от непосредственного места их поступления, закрепляясь в последую-

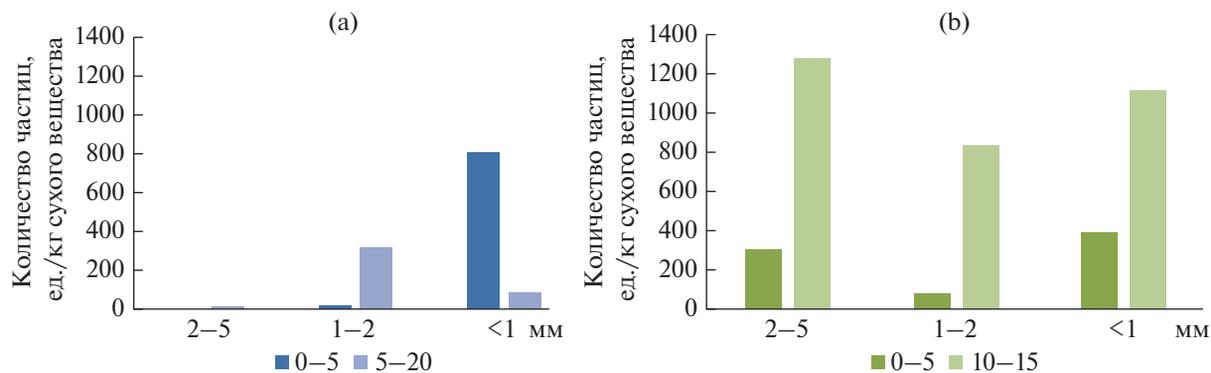


Рис. 5. Распределение частиц полистирола в пробах почвы поймы р. Мышка по фракциям: а – проба 288, б – проба 290.

шем за растения и частицы почвы. На миграцию микропластика в пределах водосборов и их поступление в почву пойменных ландшафтов указано в работах [26, 33, 36], хотя и собственно аквальные системы могут быть источником загрязнения почв микропластиком [6].

Получены подтверждения радиального распространения частиц полистирола в пределах поймы, о чем свидетельствуют результаты их определения на глубинах 5–20 (проба 288) и 15–20 см (проба 290). Содержание частиц микропластика в указанных пробах составило 694 и 3252 ед./кг соответственно. Как и в поверхностных отложениях, преобладали частицы размером <2 мм. В пробе 290 содержание частиц полистирола разных фракций на глубине 15–20 см оказалось гораздо большим по сравнению с поверхностным горизонтом (рис. 5). Вероятно, это связано с характером формирования пойменных отложений и их пополнением привнесенными с ливневыми или паводковыми водами минеральными частицами, которые могут перекрывать поступившие ранее частицы полистирола. Содержание частиц микропластика полистирола в наносных грунтах на территории промплощадки варьирует в пределах 621–5594 ед./кг грунта, что близко значениям, полученным для пойменной почвы в зоне влияния предприятия. Не исключаются и другие механизмы миграции частиц полистирола вниз по профилю, как и других полимеров [29, 37].

Обнаружен полистирол и в пробе донных отложений (34 ед./кг) даже на удалении более 800 м от предполагаемого места поступления (проба 292), что свидетельствует о его дальнейшем перераспределении вниз по течению реки и возможном выносе в принимающую р. Лошица и далее р. Свислочь.

ОБСУЖДЕНИЕ

Большое количество частиц полистирола в почве, зафиксированное на территории и в зоне влияния предприятия по производству пенопо-

листирольных изделий, свидетельствует о необходимости более пристального внимания к данной категории объектов. Именно промышленные предприятия могут являться значительным источником поступления в почву частиц микропластика разного генезиса – и первичных гранул, и вторичных полимеров в виде отходов. Следует отметить, что в зависимости от технологии производства и назначения выделяются вспененный, экструдированный или ударопрочный полистирол, различающиеся физико-химическими свойствами и составом используемых добавок. Соответственно их отходы, как и первичные гранулы сырья, будут отличаться поведением в окружающей среде. По сравнению с другими полимерами полистирол обладает гораздо более высокой способностью сорбировать загрязняющие вещества, как это показано на примере полициклических ароматических углеводородов [32]. Экологические риски могут быть существенно больше при условии присутствия в полистироле гексабромциклододекана, который на протяжении многих лет использовали в качестве антипирена и который является стойким органическим загрязнителем.

В целом уровни накопления частиц полистирола в почвах поймы оказались самыми высокими, что связано с длительным периодом функционирования предприятия и аккумуляцией микропластика в почве и русловых отложениях. Сохранившийся участок поймы в данном случае, являясь соподчиненным в системе местных ландшафтов, выступает природным “депо” по отношению к частицам полистирола (возможно и другим загрязняющим веществам).

Полученные данные не являются исчерпывающими ни в отношении дальности переноса частиц полистирола, ни глубины его миграции. Однако они указывают на потенциальную опасность дальнейшего рассеяния микропластика и выноса его в городские речные экосистемы.

Следует отметить, что пока крайне мало публикаций, касающихся изучения частиц полистирола в почве, хотя именно гранулы полистирола (размером от 0.1 до 2 мм) были впервые идентифицированы в прибрежных водах южной части Новой Англии [8, 9]. В целом разнообразие типов пластика и применяемых единиц измерения, в том числе в отношении размеров частиц микропластика, затрудняют сопоставление полученных данных. К настоящему времени в почве идентифицированы частицы полиэтилена (ПЭ), полиэтилентерефталата (ПЭТ), полипропилена (ПП), полистирола (ПС), поливинилхлорида (ПВХ), акрил-бутадиен-стирола (АБС), полиамида, полиэфира и др. [25, 36].

Например, в пойменных почвах Швейцарии общее количество микропластика оценено в 593 ед./кг или 55.5 мг/кг; 88% частиц представлены размерами 125–500 мкм; в перечне типов пластика – ПЭ, ПС, ПВХ и другие полимеры [33]. Здесь пойменные почвы рассматриваются как нижнее звено в системе сопряженных ландшафтов в водосборе. Приведенные в ряде работ данные о доле частиц полистирола в почвах наряду с другими типами полимеров касаются почв сельскохозяйственных угодий [10, 28], пляжей [40] и связаны с другими источниками их загрязнения. В почвах промплощадок, исследованных в г. Сидней (Австралия), более 80% выявленных частиц микропластика было представлено ПВХ; общее же количество частиц микропластика варьировало от 300 до 67500 мг/кг при среднем значении 2000 мг/кг [12]. Если говорить об изученности проблемы, то сельскохозяйственным почвам, которые подвергаются воздействию мульчирования осадками сточных вод и соответственно загрязнению частицами микропластика, посвящено наибольшее количество работ; обобщение количественных данных представлено в литературе [11, 27].

Большое количество частиц микропластика в почве в зоне влияния предприятия по производству пенополистирольных плит, выявленное в ходе наших исследований, свидетельствует о необходимости принятия природоохранных мер по предотвращению рассеяния гранул сырья, а также минимизации распространения отходов пенопласта.

Особого внимания заслуживают наносные грунты на промплощадке, которые помимо перераспределения с ливневыми и тальмами водами на прилегающие территории, поступают в ливневую канализацию, а также при уборке территории на полигоны отходов. Это означает, что влияние предприятия значительно шире и должно приниматься во внимание при развитии исследований, касающихся загрязнения окружающей среды микропластиком.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые выполнены исследования в зоне воздействия промышленного предприятия по производству пенополистирольных плит, которое представляет собой один из важнейших, весьма распространенных источников поступления частиц полистирола в почву и другие компоненты природной среды. Показано, что рассеяние гранул сырья полистирола (с размером <2 мм) и отходов производимой продукции (в виде вспененных гранул и крошки пенопласта) приводит к загрязнению почв не только на промплощадке, но и за ее пределами. Зафиксированные высокие уровни загрязнения почвы пойменного участка малой реки, расположенного на удалении 500–600 м от предприятия, свидетельствуют о миграции частиц полистирола, прежде всего с поверхностным стоком.

Количество частиц микропластика размером <5 мм достигает сотен и тысяч единиц в пересчете на килограмм сухого вещества, при этом доминирующей фракцией является микропластик размером <1, иногда 1–2 мм, которыми представлены различные типы сырья. Микропластик зафиксирован как в верхних горизонтах почвы (0–5 см), так и на глубине до 15–20 см. Установлено, что в верхних горизонтах преобладают фрагменты вспененного полистирола (осколки плит, либо отдельные вспененные гранулы), тогда как глубже полистирол присутствует в виде гранул сырья.

Выполненные исследования являются первым шагом освоения методов выявления и количественного определения частиц микропластика полистирола. В дальнейшем необходимо привлечение дополнительных методов идентификации частиц микропластика, поскольку помимо гранул полистирола размером <1 мм, которые могут вспениваться при нагревании, в почве могут присутствовать частицы пенопласта, не обладающие такой способностью.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы утверждают об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кухарчик Т.И., Козыренко М.И. Использование гексабромциклододекана в Беларуси, проблемы выявления и предотвращения поступления в окружающую среду // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. хімічных навук. 2016. № 1. С. 74–81.
2. Леонов В.Д., Тиунов А.В. Взаимодействие беспозвоночных и синтетических полимеров в почве (обзор) // Экология. 2020. № 6. С. 403–416. <https://doi.org/10.31857/S0367059720060049>

3. *Bigalke M., Filella M.* Foreword to the research front on Microplastics in Soils // *Environ. Chem.* 2019. V. 16. P. 1–2.
https://doi.org/10.1071/ENv16n1_FO
4. *Bläsing M., Amelung W.* Plastics in soil: analytical methods and possible sources // *Sci Total Environ.* 2018. V. 612. P. 422–435.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.086>
5. *Brander S.M., Renick V.C., Foley M.M., Steele C., Woo M., Lusher A., Carr S., Helm P., Box C., Cherniak S., Andrews R.C., Rochman C.M.* Sampling and Quality Assurance and Quality Control: A Guide for Scientists Investigating the Occurrence of Microplastics Across Matrices // *Applied Spectroscopy.* 2020. V. 74(9). P. 1099–1125.
<https://doi.org/10.1177/0003702820945713>
6. *Büks F., Kaupenjohann M.* Global concentrations of microplastics in soils – a review // *Soil.* 2020. V. 6. P. 649–662.
<https://doi.org/10.5194/soil-6-649-2020>
7. *Cao D., Wang X., Luo X., Liu G., Zheng H.* Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing.* 2017. P. 012148.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/61/1/012148>
8. *Carpenter E., Anderson S., Harvey G., Miklas H., Peck B.* Polystyrene spherules in coastal waters // *Science.* 1972. V. 178. P. 749–750.
9. *Carpenter E.J., Smith K.L.* Plastics on the Sargasso Sea surface // *Science.* 1972. V. 175. P. 1240–1241.
10. *Chen Y., Leng Y., Liu X., Wang J.* Microplastic pollution in vegetable farmlands of suburb Wuhan, central China // *Environ Pollut.* 2020. V. 257.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113449>
11. *Dioses-Salinas D.C., Pizarro-Ortega C.I., De-la-Torre G.E.* A methodological approach of the current literature on microplastic contamination in terrestrial environments: Current knowledge and baseline considerations // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 730. P. 13916–4.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139164>
12. *Fuller S., Gautam A.* A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction // *Environmental Science & Technology.* 2016. V. 50. P. 5774–5780.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00816>
13. *Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L.* Production, use, and fate of all plastics ever made // *Sci. Adv.* 2017. V. 3(7). e1700782.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
14. *Gregory M.R.* Accumulation and distribution of virgin plastic granules on New Zealand beaches, New Zealand // *J. Marine and Freshwater Research.* 1978. V. 12(4). P. 399–414.
<https://doi.org/10.1080/00288330.1978.9515768>
15. *Hansen R.A., Gross A.* Determination of microplastics in coastal beach sediments along Kattegat Sea, Denmark // *Теоретическая и прикладная экология.* 2019. V. 2. P. 75–82.
<https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-2-075-082>
16. *He D., Luo Y., Lu S., Liu M., Song Y., Lei L.* Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks // *Trends in Analytical Chemistry.* 2018. V. 109. P. 163–172.
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.006>
17. *Helmberger M.S., Tiemann L.K., Grieshop M.J.* Towards an ecology of soil microplastics // *Funct Ecol.* 2020. V. 34. P. 550–560.
<https://doi.org/10.1111/1365-2435.13495>
18. *Horton A.A., Walton A., Spurgeon D.J., Lahive E., Svendsen S.* Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 586. P. 127–141.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>
19. *Hwang J., Choi D., Han S., Jung S.Y., Choi J., Hong J.* Potential toxicity of polystyrene microplastic particles // *Scientific Report.* 2020. V. 10. P. 7391.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-64464-9>
20. *Jiang X., Chang Y., Zhang T., Qiao Y., Klobučar G., Li M.* Toxicological effects of polystyrene microplastics on earthworm (*Eisenia fetida*) // *Environ Pollut.* 2020. V. 259. P. 113896.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113896>
21. *Kim S.W., Rillig M.C.* Research trends of microplastics in the soil environment: Comprehensive screening of effects // *Soil Ecol. Lett.* 2021. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1007/s42832-021-0077-3>
22. *Kim Y.-N., Yoon J.-H., Kim K.-H.* Microplastic contamination in soil environment – a review // *Soil science annual.* 2020. V. 71(4). P. 300–308.
<https://doi.org/10.37501/soilsa/131646>
23. *Li O., Wu J., Zhao X., Gu X., Ji R.* Separation and identification of microplastics from soil and sewage sludge // *Environ Pollut.* 2019. V. 254. P. 113076.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019>
24. *McDermid K.J., McMullen T.L.* Quantitative analysis of small-plastic debris on beaches in the Hawaiian archipelago // *Marine Pollution Bulletin.* 2004. V. 48(7–8). P. 790–794.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2003.10.017>
25. *Meixner K., Kubiczek M., Fritz I.* Microplastic in soil – current status in Europe with special focus on method tests with Austrian samples // *AIMS Environmental Science.* 2020. V. 7(2). P. 174–191.
<https://doi.org/10.3934/environsci.2020011>
26. *Nizzetto L., Bussi G., Futter M.N., Butterfield D., Whitehead P.* A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments // *Environ. Sci.: Processes Impacts.* 2016. V. 18(8). P. 1050–9.
<https://doi.org/10.1039/C6EM00206D>
27. *Okoffo E.D., O'Brien S., Ribeiro F., Burrows S.D., Toapanita T., Rauer C., O'Brien J.W., Tschärke B.J., Wang X., Thomas K.V.* Plastic particles in soil: state of the knowledge on sources, occurrence and distribution, analytical methods and ecological impacts // *Environ. Sci.: Processes Impacts.* 2021. V. 23. P. 240.
<https://doi.org/10.1039/d0em00312c>
28. *Piehl S., Leibner A., Löder M.G., Dris R., Bogner C., Laforsch C.* Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. P. 1–9.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-36172-y>

29. *Qi R., Jones D.L., Li Z., Liu Q., Yan C.* Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: A critical review // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 703. P. 134722.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134722>
30. *Rhodes C.J.* Plastic pollution and potential solutions // *Science Progress.* 2018. V. 101(3). P. 207–260.
<https://doi.org/10.3184/003685018X15294876706211>
31. *Rillig M.C.* Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? // *Environ. Sci. Technol.* 2012. V. 46(12). P. 6453–6454.
<https://doi.org/10.1021/es302011r>
32. *Rochman C.M., Browne M.A., Halpern B.S., Hentschel B.T., Hoh E., Karapanagioti H.K., Rios-Mendoza L.M., Takada H., Teh S., Thompson R.C.* Policy: Classify plastic waste as hazardous // *Nature.* 2013. V. 494. P. 169–171.
<https://doi.org/10.1021/es403605f>
33. *Scheurer M., Bigalke M.* Microplastics in Swiss floodplain soils // *Environmental science & technology.* 2018. V. 52(6). P. 3591–3598.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06003>
34. *Vegter A.C., Barletta M., Beck C., Borrero J., Burton H., Campbell M.L., Hamann M.* Global research priorities to mitigate plastic pollution impacts on marine wildlife // *Endangered Species Research.* 2014. V. 25(3). P. 225–247.
<https://doi.org/10.3354/esr00623>
35. *Wang Z., Taylor S.E., Sharma P., Flury M.* Poor extraction efficiencies of polystyrene nano- and microplastics from biosolids and soil // *PLoS ONE.* 2018. V. 13(11). P. e0208009.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208009>
36. *Windsor F.M., Durance I., Horton A.A., Thompson R.C., Tyler C.R., Ormerod S.J.* A catchment-scale perspective of plastic pollution // *Global Change Biology.* 2019. V. 25. P. 1207–1221.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14572>
37. *Yang L., Zhang Y., Kang S., Wang Z., Wu C.* Microplastics in soil: A review on methods, occurrence, sources, and potential risk // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 780. P. 146546.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146546>
38. *Zhang G., Liu Y.* The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 642. P. 12–20.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.004>
39. *Zhang S., Yang X., Gertsen H., Peters P., Salánki T., Geissen V.* A simple method for the extraction and identification of light density microplastics from soil // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 616–617. P. 1056–1065.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv>
40. *Zhou Q., Zhang H., Fu C., Zhou Y., Dai Z., Li Y., Tu C., Luo Y.* The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and Yellow Sea // *Geoderma.* 2018. V. 322.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.015>

Soil Pollution by Microplastic in the Impact Zone of Enterprise for the Production of Expanded Polystyrene

T. I. Kukharchyk^{1, *} and V. D. Chernyk¹

¹ *Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220076 Belarus*

**e-mail: tkukharchyk@gmail.com*

In the paper the experience of investigation of polystyrene content in the impact zone of enterprise for the production of expanded polystyrene (Minsk, Belarus) is presented. The studies were carried out at the industrial site and on the floodplain of a small river at a distance of up to 500–600 m from the enterprise. Samples of soil, bottom sediments and technogenic deposits have been collected and analyzed. To identify microplastic, multiple stages were applied including visual detection, drying, sieving and flotation (with heating for the fractions with the size of 1–2 and <1 mm). To remove natural organic substances, a 30% hydrogen peroxide solution was used. Polystyrene was revealed in all soil, technogenic deposits and bottom sediments samples. It was found that the content of polystyrene particles <5 mm in the soil of the industrial site varies from 31 to 175 units/kg, in the soil of the floodplain – from 94 to 8864 units/kg. In most cases, fractions <1 mm dominate, less often – 1–2 mm. Microplastic was found both in the upper soil horizons (0–5 cm) and at a depth of up to 15–20 cm. It was shown that the dispersion of granules of raw materials and waste is carried out mainly with surface runoff.

Keywords: microplastics, soil pollution, expanded polystyrene, polystyrene foam, granules of polystyrene, industrial site, floodplain