

ЗАГРЯЗНЕНИЕ МОРЕЙ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА ПРОДУКТАМИ ИЗНОСА АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

**Е. А. Мазлова, А. В. Лобанов,
Я. Ю. Блиновская, А. П. Педченко**

*ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина», Москва, Россия;
ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,
Владивосток, Россия;
ГНЦ РФ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Москва, Россия*

Ключевые слова: автомобильные шины; загрязнение; микропластик; нефтехимические отходы; окружающая среда; отходы; предотвращение загрязнения; продукты разложения шин; Северный Ледовитый океан; частицы износа шин и дорог.

Аннотация: Рассмотрены результаты исследования количественного и физико-химического состава и частиц износа шин и дорог (ЧИШД), выявленных в составе общего микроразмерного загрязнения вод российской Арктики. Попадая в окружающую среду, ЧИШД поглощаются морскими организмами, что приводит к нарушению процессов их жизнедеятельности. Несмотря на существующее мнение о пагубном влиянии ЧИШД на окружающую среду, их концентрация, физико-химические особенности и биологические эффекты не до конца изучены. Исследования показали, что концентрация ЧИШД в окраинных морях Северного Ледовитого океана (СЛО) составляла $0,25 \text{ шт./}(\text{км}^3 \cdot 10^{-6})$. Установлено, что Печорское море характеризовалось наибольшей концентрацией ЧИШД ($20,76 \text{ шт./}(\text{км}^3 \cdot 10^{-6})$), а Баренцево и море Лаптевых – наименьшими концентрациями $0,68$ и $0,39 \text{ шт./}(\text{км}^3 \cdot 10^{-6})$ соответственно. Выявлено, что в море Лаптевых ЧИШД встречались на наименьшем расстоянии от

Мазлова Елена Алексеевна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной экологии; Лобанов Алексей Валерьевич – аспирант кафедры промышленной экологии, ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина», Москва, Россия; Блиновская Яна Юрьевна – доктор технических наук, доцент, профессор департамента природно-технических систем и техносферной безопасности, e-mail: blinovskaia.iayu@dvfu.ru; ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия; Андрей Петрович Педченко – кандидат географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела пресноводных рыб, ГНЦ РФ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Москва, Россия.

берега и имели наибольшую массу. Частицы износа шин и дорог из Чукотского моря встречались на наибольшем расстоянии от берега и имели наименьшую массу; из Баренцева – в своем составе имели нетоксичные парафины и пластификаторы; из Чукотского – состояли из токсичного стеарата кальция, а ЧИШД из Восточно-Сибирского моря – из токсичного полиуретанового лака. Установлено, что концентрация и свойства ЧИШД отличаются между окраинными морями СЛО, что диктует необходимость дальнейшего изучения их природы, стратегии миграции и оценки эффекта воздействия на окружающую среду.

Введение

Частицы износа шин и дорог (ЧИШД) – это частицы, образующиеся в процессе трения автомобильных шин (АШ) о поверхность дороги во время движения [1]. Из-за высокой встречаемости полимеров в составе ЧИШД, их относят к вторичному микропластику (МП) [1]. Однако помимо полимеров ЧИШД включают в себя примеси частиц износа дороги и тормозов, бензина, автомобильных масел и других соединений [1]. Следовательно, ЧИШД обладают уникальными физико-химическими свойствами и являются самостоятельными источниками загрязнения, что диктует необходимость изучения их концентрации в педосфере, атмосфере и гидросфере. Мы предполагаем, что ввиду высокой представленности полимеров в составе ЧИШД, изучение распределения и концентрации ЧИШД возможно в образцах МП. В свою очередь, микропластик, попадающий в почву, воздух, поверхностные или грунтовые воды всегда стремится в воды мирового океана, поэтому его изучение (в том числе ЧИШД) наиболее перспективно в гидросфере [1, 2].

В течение последнего десятилетия активно накапливаются данные о концентрации МП в водах мирового океана [3]. До 55 % всех опубликованных исследований проведены в Азии, что объясняется наиболее неблагоприятной экологической обстановкой в этом регионе [4]. Напротив, менее изученной областью является Арктический регион, несмотря на имеющуюся тенденцию к таянию ледников и возможное смешение вод Северного Ледовитого океана (СЛО) с водами мирового океана [3]. Тем не менее результаты единичных исследований демонстрируют наличие МП в акватории морей СЛО. Так, было показано, что концентрация МП в Баренцевом море составляет $0,007...0,015$ шт./м⁻³ [5]. Эти данные сопоставимы с ранее опубликованными результатами, полученными из акватории от юго-западной части Баренцева моря до Восточно-Сибирского моря [6]. Таким образом, даже самые изолированные арктические регионы не защищены от загрязнения МП и, вероятно, ЧИШД.

Изучение концентрации ЧИШД в водах СЛО позволит акцентировать внимание экспертов по всему миру на проблеме загрязнения мирового океана ЧИШД и инициировать разработку новых инновационных методов контроля, выявления и переработки МП, в частности, ЧИШД.

Цель исследования – изучение концентрации и физико-химических особенностей ЧИШД в арктических водах.

Материалы и методы исследования

В период с 2019 по 2022 гг. было исследовано 136 проб МП на наличие в их составе ЧИШД. В область изучения вошли образцы, полученные в акватории окраинных морей СЛО: в Баренцевом море (63 станции), Печорском (11 станций), Карском (19 станций), море Лаптевых (7 станций), Восточно-Сибирском (16 станций) и Чукотском (20 станций). Распределение станций забора исследуемого материала в окраинных морях СЛО представлено на рис. 1.

Выбор акватории объяснялся тем, что окраинные моря СЛО являются критически важными компонентами арктической экосистемы и играют значительную роль в глобальной климатической динамике. Ключевые характеристики окраинных морей СЛО представлены в табл. 1.

Отбор проб МП проводился на поверхности арктических вод. Траления выполняли по ходу движения судна на скорости 2,0 – 3,5 узлов, нейстонной сетью Манта с ячейей 335 мкм, оснащенной калиброванным счетчиком General Oceanic's. В ходе наблюдений в 2019 – 2022 гг. собрано 136 проб МП. Для идентификации МП из полученных образцов использован ИК-Фурье спектрометр IRTracer-100 (Shimadzu, Япония) с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) Quest ATR diamond accessory GS10801-B (Specac Ltd, Орпингтон, Великобритания) и микроскоп Imager.Z1 с системой освещения НВО-100 (Carl Zeiss, Германия). Полученные образцы исследовали под микроскопом при облучении ультрафиолетом в целях установления их природы. Найденные люминесцентные частицы переносили на алмазную линзу спектрофотометра и прижимали к ней встроенным прессом с массой 40 фунтов (18 кг), после

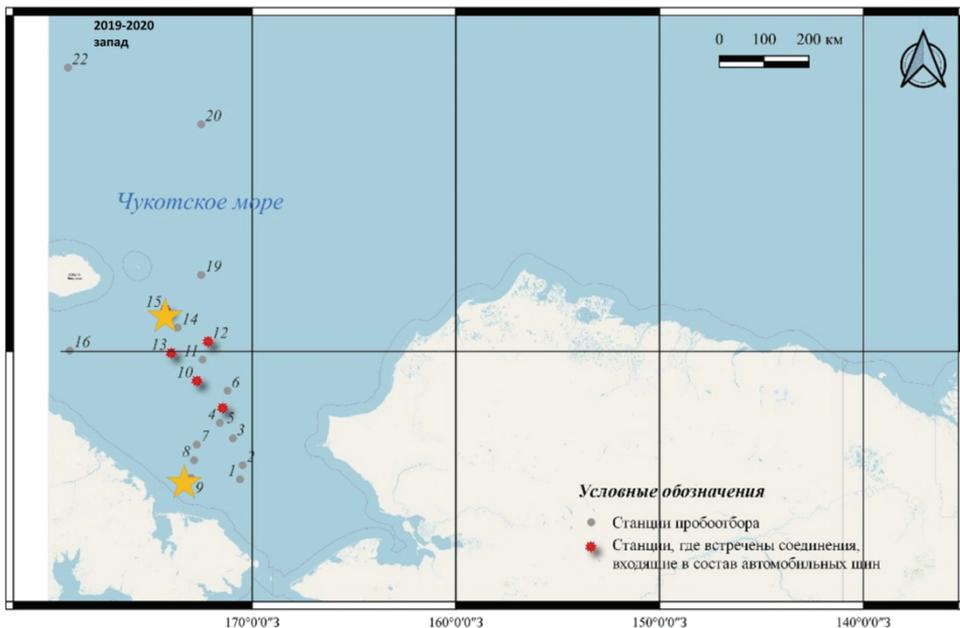


Рис. 1. Распределение станций забора исследуемого материала в окраинных морях СЛО

Таблица 1

Ключевые характеристики окраинных морей СЛО [7]

Характеристика	Море					
	Баренцево	Печорское	Карское	Лаптевых	Восточно-Сибирское	Чукотское
Площадь, тыс. км ²	1424	81,3	883	662	913	595
Объем, тыс. км ³	316	4,3	98	353	49	42
Рельеф дна	Большая часть моря имеет глубину 300...400 м, средняя глубина 222 м	Море мелководное (средняя глубина 6 м)	Полностью лежит на шельфе глубиной до 100 м	53 % моря мелководье. В северной части – глубина более 1 км	Море мелководное, 72 % площади дна имеет глубину до 50 м	85 % площади – глубина до 200 м. Наибольшая глубина – 1256 м
Речной сток	Невелик (река Печора)	Существенный: впадает река Печора	Наибольший по сравнению с другими морями: Обь, Енисей, Пур и др.	Значимое влияние речного стока (реки Лена, Яна)	Невелик (реки Колыма и Индигирка)	Невелик (реки Амгуэма, Ноатак, Кобук)
Водообмен	Водообмен высокий, за счет вод Нордкапского течения	Постоянный с Баренцевым морем	С соседними морями		С Тихим океаном и Арктическим бассейном	
Ледовитость	Высокая	Средняя	Высокая		Средняя	

чего снимали ИК-Фурье спектры поглощения. Идентификацию МП и выявление химических компонентов, входящих в состав исследуемых образцов, проводили путем автоматического и при необходимости последующего ручного сравнения спектров образца с эталонными спектрами материалов и веществ из встроенной базы данных прибора. Таким образом, был получен спектр веществ, которые с высокой долей вероятности входили в состав частиц МП ($n = 509$).

Ввиду необходимости изучения преимущественно ЧИШД в акватории окраинных морей СЛО, из 136 исследуемых образцов в последующий анализ включались те образцы, которые в своем составе (по данным ИК-Фурье спектрометра IRTracer-100) имели возможные компоненты ЧИШД: частицы износа дороги и асфальта, износа тормозов, бензина, автомобильных масел и красок. Таким образом, только 29 из 136 образцов МП имели в своем составе компоненты АШ и дорог. При этом идентифицированные 29 образцов суммарно имели в своем составе 49 частиц, соответствующих ЧИШД на основании наличия одного или нескольких веществ износа шин и дорог.

В дальнейшем отобранные частицы, содержащие компоненты шин и дорожного покрытия ($n = 49$), подвергались лабораторной обработке, сортировке частиц и волокон для получения объективных, сопоставимых количественных оценок загрязнения поверхностных вод морей в соответствии со стандартной методикой изучения частиц МП, подробно представленной в работе [8]. Единый алгоритм анализа ЧИШД и МП использован в связи с тем, что ЧИШД являются вторичным МП.

Результаты

Проведено исследование, оценивающее концентрацию и физико-химические характеристики 29 образцов МП, имеющих в своем составе ЧИШД ($n = 49$).

Сравнительная характеристика представленности и концентрации ЧИШД в окраинных морях СЛО. В Баренцевом море 12 из 63 образцов МП включали в себя ЧИШД, в Восточно-Сибирском море – 6 из 16 образцов, Карском – 4 из 19 образцов, в море Лаптевых – 1 из 7 образцов, в Печорском – 1 из 11 образцов. В Чукотском море – 5 из 20 образцов МП имели в своем составе компоненты АШ и дорог. Следовательно, наибольшая относительная представленность ЧИШД выявлена в Восточно-Сибирском море – 38 %. Несколько реже ЧИШД встречались в Чукотском, Карском и Баренцевом морях: относительное значение ЧИШД составляло 25, 21 и 19 % соответственно. Море Лаптевых и Печорское характеризовались наименьшей представленностью ЧИШД. Однако, ввиду различного объема окраинных морей СЛО, говорить о том, что Восточно-Сибирское море больше остальных морей загрязнено отходами ЧИШД не представляется возможным. Именно поэтому в дальнейшем оценивалась концентрация ЧИШД в целом в акватории окраинных морей СЛО и в каждом из изучаемых морей, и обнаружилось, что общая концентрация ЧИШД в окраинных морях СЛО составляет $0,25 \text{ шт./}(\text{км}^3 \cdot 10^{-6})$, тогда как Печорское море характеризуется наибольшей концентрацией ЧИШД, равной $20,76 \text{ шт./}(\text{км}^3 \cdot 10^{-6})$, а Баренцево и море Лаптевых – наименьшими концентрациями ЧИШД, равными $0,68$ и $0,39 \text{ шт./}(\text{км}^3 \cdot 10^{-6})$ соответственно. Однако достоверность не была подтверждена. Тем не менее выявлена закономерность, определяющая Печорское море как более неблагоприятное, а Баренцево и море Лаптевых – как более благоприятные акватории в отношении представленности компонентов износа АШ и дорог. Распределение абсолютного и относительного количества станций, содержащих компоненты ЧИШД в окраинных морях СЛО представлено в табл. 2, где P – критерий Краскелла–Уоллиса.

Различия глубины и удаленности от береговой линии проб, содержащих ЧИШД, в зависимости от акватории окраинных морей СЛО. При анализе данных глубины отбора проб, содержащих компоненты ЧИШД, между окраинными морями СЛО выявлены достоверно значимые различия между всеми исследуемыми морями: Баренцевым, Восточно-Сибирским, Чукотским, Карским, Печорским и морем Лаптевых. При этом Баренцево море характеризовалось наибольшей глубиной отбора проб с ЧИШД (258,00 м [182,00; 276,00]), тогда как море Лаптевых и Восточно-Сибирское ассоциировались с наименьшей глубиной: 22,00 м [22,00; 22,00] и 15,00 м [14,00; 23,00] соответственно. Полученные результаты, вероятнее всего, объясняются архитектурой дна исследуемых морей. Действительно, Баренцево море по сравнению с другими морями Северного Ледовитого океана считается наиболее глубоким и имеет характерный резкий континентальный склон, тогда как Восточно-Сибирское и море Лаптевых являются наиболее мелководными и имеют пологий континентальный склон [8 – 10].

Важная изучаемая характеристика – удаленность ЧИШД от береговой линии. Море Лаптевых ассоциировалось с наименьшим расстоянием от береговой линии (20,00 м [20,00; 20,00]), при котором встречались ЧИШД.

Таблица 2

Распределение абсолютного и относительного количества станций, содержащих компоненты ЧИШД, а также значение концентрации ЧИШД в окраинных морях СЛО

Параметр	Море						Р
	Баренцево	Восточно-Сибирское	Карское	Лаптевых	Печорское	Чукотское	
Общее число проб (n = 136)	63 (46,3 %)	16 (11,8 %)	19 (14,0 %)	7 (5,1 %)	11 (8,1 %)	20 (14,7 %)	0,54
Число проб с ЧИШД (n = 29)	12 (41,4 %)	6 (20,7 %)	4 (13,8 %)	1 (3,4 %)		5 (17,2 %)	–
Доля ЧИШД, %	19	38	21	14	9	25	Не установлено
Концентрация ЧИШД, шт./((км ³ ·10 ⁻⁶))	0,68	6,18	2,15	0,39	20,76	5,51	
Общая концентрация ЧИШД, шт./((км ³ ·10 ⁻⁶))	0,25						

Ключевыми характеристиками ЧИШД при этом установлены наибольший вес на фоне наименьшего среднего размера по сравнению с ЧИШД, полученными при сборе образцов в других окраинных морях СЛО. В свою очередь, Чукотское море было связано с наибольшим расстоянием от береговой линии, при котором встречались ЧИШД: 280,00 км [243,50; 305,00]. При этом ЧИШД в данном море характеризовались наименьшим весом и более высокими показателями среднего размера по сравнению с частицами, полученными в море Лаптевых. Важно отметить, что ЧИШД с наибольшим средним размером и наибольшей площадью, которые были легче частиц, полученных из моря Лаптевых, но тяжелее ЧИШД из Чукотского моря, получены из акватории Баренцева моря, для которого характерна наибольшая глубина отбора проб с ЧИШД. Таким образом, можно сделать вывод о том, что физические характеристики вносят неотъемлемый вклад в распространение ЧИШД в гидросфере, а значит, знания о весе и размерах ЧИШД могут являться одними из ключевых параметров, определяющих зону загрязнения данными отходами в различных морях. Ключевые характеристики ЧИШД, полученные из акватории различных окраинных морей СЛО, представлены в табл. 3.

Различия физико-химических характеристик ЧИШД в зависимости от акватории окраинных морей СЛО. Учитывая ограниченность данных, в нашем исследовании не было выявлено каких-либо достоверных взаимосвязей между физико-химическими характеристиками ЧИШД в зависимости от акватории окраинных морей СЛО, в которых были получены исследуемые образцы. Тем не менее выявлены закономерности в отношении различий химического состава ЧИШД между морями.

Частицы износа шин и дорог, выявленные в окраинных морях СЛО, преимущественно включали в себя компоненты смазочных материалов (32,7 %), парафины (24,5 %), компоненты резины и каучука (14,3 %), пластификаторы (12,2 %) и фталаты (6,1 %). При этом доминирующими химическими веществами являлись стеарат кальция (10,2 %), полиуретановый лак на водной основе – V1605 POLYUREXMAT 0000 (10,2 %), микрокристаллический воск (10,2 %), дотриаконтан (8,16 %) и этилен-пропиленовый каучук торговой марки Dutral (6,12 %). Учитывая наибольшую представленность данных веществ в составе ЧИШД, мы предположили, что они потенциально могут являться маркерами данных частиц и определять характер миграции ЧИШД в арктических водах. Именно поэтому в дальнейшем изучалась динамика распределения данных химических веществ в зависимости от акватории окраинных морей СЛО.

Частицы износа шин и дорог, полученные в акватории Баренцева моря, в своем составе имели преимущественно парафины (а именно, микрокристаллический воск) и пластификаторы; ЧИШД из Чукотского и Восточно-Сибирского морей характеризовались высокой представленностью компонентов смазочных материалов, причем ЧИШД из Чукотского моря состояли преимущественно из стеарата кальция, а из Восточно-Сибирского – из полиуретанового лака на водной основе – V1605 POLYUREXMAT 0000. Физико-химические характеристики ЧИШД, полученных из акватории различных окраинных морей СЛО, представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

**Ключевые характеристики ЧИШД,
полученные из акватории различных окраинных морей СЛО**

Параметр	Море							P
	Общее (n = 49)	Баренцево (n = 21)	Восточно- Сибирское (n = 11)	Чукотское (n = 8)	Карское (n = 4)	Печорское (n = 3)	Лаптевых (n = 2)	
Глубина отбора проб, м	75,00 [38,00; 258,00]	258,00 [182,00; 276,00]	15,00 [14,00; 23,00]	52,00 [51,00; 55,00]	85,50 [44,00; 212,00]	75,00 [75,00; 75,00]	22,00 [22,00; 22,00]	0,000
Удаленность от берега, км	84,00 [43,00; 182,00]	84,00 [62,00; 109,00]	43,00 [35,00; 94,00]	280,00 [243,50; 305,00]	107,50 [46,50; 190,50]	50,00 [50,00; 50,00]	20,00 [20,00; 20,00]	0,009
Вес, мг	0,55 [0,10; 1,35]	0,70 [0,40; 0,80]	2,00 [0,80; 3,70]	0,10 [0,10; 0,40]	0,45 [0,25; 3,32]	0,70 [0,10; 0,80]	2,10 [0,10; 4,10]	0,091
Размер, мм × мм	1,20 × 1,10 [0,90 × 0,70; 2,10 × 2,10]	1,50 × 3,30 [0,50 × 3,10; 1,90 × 5,10]	1,80 × 1,10 [1,10 × 0,90; 3,40 × 1,80]	1,20 × 0,90 [0,80 × 0,60; 1,70 × 1,20]	1,10 × 0,70 [0,90 × 0,50; 1,10 × 1,10]	1,70 × 1,20 [0,90 × 0,70; 3,20 × 5,30]	0,95 × 0,55 [0,90 × 0,40; 1,00 × 0,70]	-
Средний размер, мм	1,20 [0,80; 2,20]	3,30 [2,10; 4,10]	1,57 [1,00; 2,60]	1,12 [0,70; 1,37]	0,80 [0,80; 1,10]	2,20 [0,80; 3,50]	0,75 [0,70; 0,80]	0,029
Площадь, мм ²	1,43 [0,63; 4,37]	4,37 [4,15; 7,65]	2,33 [0,99; 4,83]	1,25 [0,49; 1,72]	0,63 [0,55; 1,21]	3,84 [0,63; 9,01]	0,51 [0,40; 0,63]	0,173

Таким образом, полученные закономерности расширяют представление о химических особенностях ЧИШД и характере их распространения в окраинных морях СЛО, а также диктуют необходимость дальнейшего более детального изучения природы ЧИШД и стратегии их миграции в акватории Арктических морей.

Обсуждение

В течение последнего десятилетия отмечается увеличение продукции АШ. Так, в мире ежегодно выбрасывается до 1,5 млрд АШ. К 2030 году ожидается их увеличение до 5 миллиардов, что определяет лавинообразный

Таблица 4

**Физико-химические параметр ЧИШД,
полученные из акватории окраинных морей СЛО**

Характеристика	Море (n= 49)					
	Баренцево (n = 21)	Восточно- Сибирское (n = 11)	Чукотское (n = 8)	Карское (n = 4)	Печорское (n = 3)	Лаптевых (n=2)
<i>Природа (P = 0,0662)</i>						
Синтетическая	18	9	7	2	1	2
Смешанная	3	2	1	1	2	–
Натуральная	–	–	–	1	–	–
<i>Структура волокнистая (P = 0,8027)</i>						
Да	1	–	1	–	–	–
Нет	20	11	7	4	3	2
<i>Цвет (не установлен)</i>						
Белый	2	–	1	1	–	–
Желтый	–	–	3	–	–	–
Серый	2	1	2	–	1	–
Синий	–	–	1	–	–	–
Черный	1	–	1	2	2	–
<i>Крошится при обработке (P = 0,0041)</i>						
Да	–	–	4	1	1	–
Нет	21	11	4	3	2	2
<i>Химический состав (P = 0,1169)</i>						
Стеарат кальция	–	–	5	–	–	–
Полиуретановый лак на водной основе V1605 POLYUREX MAT 0000	–	4	–	–	–	1
Микрокристаллический воск	5	–	–	–	–	–
Дотриаконтан	2	2	–	–	–	–
Этилен-пропиленовый каучук Dutral	1	1	1	–	–	–
<i>Химическая группа веществ</i>						
Компоненты смазочных материалов	–	5	7	2	1	1
Парафины	9	2	–	–	1	–
Компоненты резины и каучука	1	3	1	–	1	1
Пластификаторы	6	–	–	–	–	–
Фталаты	3	–	–	–	–	–
Другое	2	–	–	1	–	–
Компоненты асфальта	–	1	–	1	–	–

прирост количества отходов шин и компонентов их износа (ЧИШД), попадающих в окружающую среду [11].

Несмотря на то что процесс образования ЧИШД сосредоточен вдоль автомобильных дорог, ЧИШД могут накапливаться не только в почве и воздухе вдоль автомагистралей, но и с поверхностным стоком, дождем, снегом попадать в ливневые стоки и поверхностные воды, достигать озер и рек, переносящих данные отходы в моря и океаны. Поскольку ЧИШД плотнее морской воды, путь из океана на сушу маловероятен [1, 12]. Тем не менее в морских водах ЧИШД способны накапливаться в организмах морских животных. Попадание ЧИШД в организм живых существ, в том числе в организм человека, приводит к механическому воздействию на ткани, подобно МП: изъязвлению слизистых оболочек желудочно-кишечного тракта, роговицы и др. Однако входящие в состав ЧИШД тяжелые металлы, компоненты лакокрасочных и смазочных материалов способны оказывать биологическое действие, изменяя структуру ДНК и влияя на процессы роста, дифференцировки и размножения. Таким образом, ЧИШД могут являться триггерами развития мутаций и злокачественных опухолей, что не свойственно для МП [1]. Поэтому изучение отходов ЧИШД в гидросфере – крайне востребованно и перспективно.

Географические особенности России определяют важность изучения накопления МП и ЧИШД в окраинных морях СЛО ввиду того, что данные отходы, попадая в крупные реки Сибири (Енисей, Обь, Лена, Колыма и др.), мигрируют в арктические воды. В свою очередь, ввиду прогрессивного таяния ледников, поступившие в окраинные моря СЛО отходы МП и ЧИШД стремятся в воды Атлантического океана, оказывая непосредственное влияние на загрязнение мирового океана [12], поэтому в исследовании дана оценка концентрации и ключевых характеристик ЧИШД в окраинных морях СЛО. Предполагаемая динамика отходов МП и ЧИШД в зависимости от течений в арктических водах представлена на рис. 2.

Концентрация ЧИШД в окраинных морях СЛО. В проведенном исследовании концентрация ЧИШД в окраинных морях СЛО составила $0,25 \text{ шт./}(\text{км}^3 \cdot 10^{-6})$. В литературе отсутствуют данные о концентрации ЧИШД в гидросфере, однако имеются сведения представленности МП в прибрежных водах различных стран мира. Так, было выявлено, что концентрация МП в окраинных морях СЛО равнялась $0,15 \text{ ед./м}^3$ [8]. При этом значение концентрации МП в водах Бохайского моря (Китай) составляло $(0,49 \pm 0,18) \text{ частиц/м}^3$, что в 3,2 раза превышало концентрацию МП в водах СЛО [8]. Таким образом, стоит предположить, что представленность ЧИШД в составе МП в Арктическом регионе (по сравнению с наиболее загрязненным регионом – Китаем) низкая, а ЧИШД – крайне низкая ($0,15 \text{ ед./м}^3$ – концентрация МП [8]; $0,25 \text{ шт./}(\text{км}^3 \cdot 10^{-6})$ – концентрация ЧИШД по данным представленного исследования). Однако, по сравнению с количеством автодорог и автотранспорта в Китае, зона крайнего Севера России характеризуется резкой ограниченностью автомагистралей и автомобилей. Также имеется скудная представленность автодорог в Сибири вблизи рек Обь и Енисей, впадающих в Карское море и определяющих наибольший речной сток в акваторию арктической зоны по сравнению со всеми другими реками России [7]. Это определяет низкий

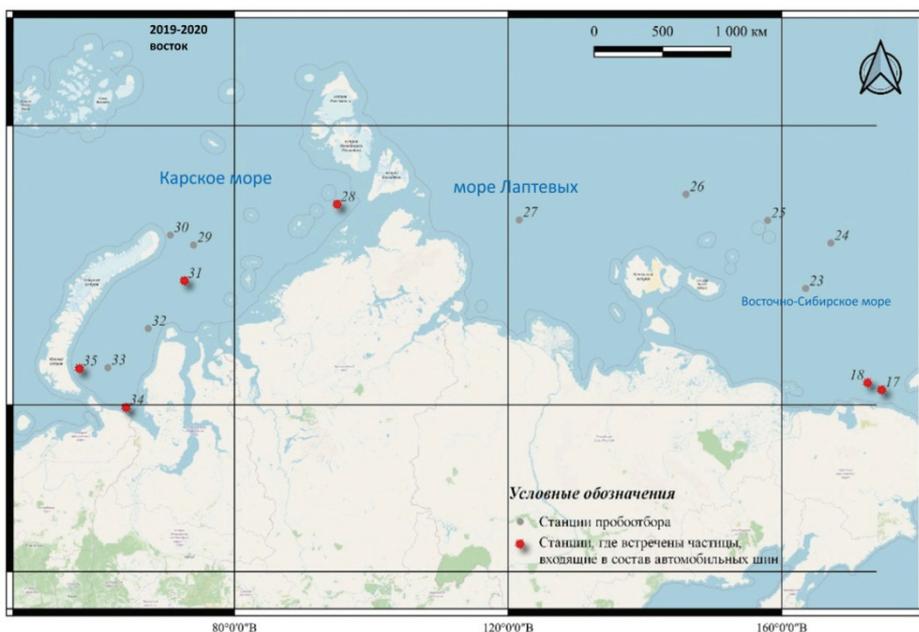


Рис. 2. Предполагаемая динамика отходов МП и ЧИШД в зависимости от течений в арктических водах

риск попадания ЧИШД в арктические воды. Однако, несмотря на эти географические и урбанистические особенности, результаты данного исследования продемонстрировали наличие ЧИШД в окраинных морях СЛО.

Результаты проведенного исследования не показали достоверность в различии между концентрацией ЧИШД в исследуемых окраинных морях СЛО. Тем не менее более высокая концентрация ЧИШД отмечалась в Печорском море и составляла $20,76 \text{ шт./}(\text{км}^3 \cdot 10^{-6})$, тогда как наименьшая концентрация ЧИШД выявлена в Баренцевом море и море Лаптевых: $0,68$ и $0,39 \text{ шт./}(\text{км}^3 \cdot 10^{-6})$ соответственно. Стоит предположить, что более высокая концентрация ЧИШД в Печорском море объясняется его географическими особенностями: крайне малыми размерами, полузамкнутым контуром, мелководностью (средняя глубина – 6 м), высоким речным стоком за счет реки Печора, средней ледовитостью, а значит отсутствием препятствия к вертикальному распространению ЧИШД [7]. В свою очередь, низкие концентрации ЧИШД в Баренцевом море вероятно объясняются его большим объемом, низким речным стоком и высокой ледовитостью [7]. Море Лаптевых характеризуется высоким речным стоком (впадают реки Лена и Яна), который, по-видимому, не играет существенной роли в миграции ЧИШД в воды данного моря [7]. Подобным образом обращает на себя внимание невысокие значения концентрации ЧИШД в Карском море ($2,15 \text{ шт./}(\text{км}^3 \cdot 10^{-6})$), имеющем наибольший речной сток (реки Енисей, Обь) из всех окраинных морей СЛО [7]. В работе [8] отмечено, что концентрация МП была наименьшей в море Лаптевых ($0,02 \text{ ед./м}^3$) и наибольшей в Карском ($0,15 \text{ ед./м}^3$), что предсказуемо подтверждает вклад речного стока рек Енисея и Оби в загрязнение МП Карского моря. Аналитическое сравнение полученных результатов

с данными работы [8] позволяет предположить весомое значение речного стока на уровне МП и ЧИШД в арктических водах и незначительный его вклад в загрязнение вод окраинных морей СЛО. Действительно, российской экспертной группой определено, что на концентрацию МП в водах СЛО влияют два ключевых фактора: сброс сибирских рек и поверхностные воды атлантического происхождения [6]. Однако ввиду слабо развитых автомобильных дорог и автомобильной промышленности в Сибири и Арктическом регионе, вероятно, ключевой вклад в загрязнение ЧИШД вод СЛО вносит Атлантическое течение, наибольший водообмен с которым отмечается в Баренцевом море. При этом акватория юго-восточной части Баренцева моря представлена полузамкнутым Печорским морем, что создает дополнительные условия для более выраженного загрязнения отходами ЧИШД его акватории, что было продемонстрировано в проведенном исследовании.

Таким образом, наибольшее загрязнение отходами ЧИШД характерно для акватории Печорского моря, что, вероятно, объясняется его полузамкнутым контуром и высоким водообменом с атлантическими водами. В свою очередь, речной сток вносит незначительный вклад в загрязнение вод Арктического региона отходами ЧИШД. Тем не менее полученные результаты требуют последующих научных подтверждений.

Различие в физико-химических характеристиках ЧИШД между водами окраинных морей СЛО. В исследовании не выявлено каких-либо достоверных взаимосвязей между физико-химическими характеристиками ЧИШД в зависимости от акватории морей, в которых были получены исследуемые образцы. Тем не менее замечены некоторые закономерности.

Так, результаты проведенного исследования продемонстрировали, что ЧИШД, полученные на разном расстоянии в акватории арктических морей, характеризовались различными показателями веса и размера. Так, в море Лаптевых ЧИШД встречались на наименьшем расстоянии от береговой линии и имели наибольший вес на фоне наименьшего среднего размера; ЧИШД из Чукотского моря встречались на наибольшем расстоянии от береговой линии и имели наименьший вес и более высокие показатели среднего размера по сравнению с частицами, полученными в море Лаптевых. Подобные результаты были получены в ранее опубликованных исследованиях, изучающих физико-химические характеристики МП в Арктическом регионе. Так, было показано, что более мелкие частицы МП, имеющие высокое соотношение поверхности к объему, оседают на дно быстрее крупных частиц [10]. Более того, в работе [13] продемонстрировано, что МП в арктических морях осаждаются в прибрежной зоне, имеющей более выраженную глубину. В этих исследованиях вектор изучения касался размера, но не веса изучаемых частиц. В нашей работе определено, что более тяжелые частицы, имеющие более низкие показатели среднего размера оседают ближе к берегу, тогда как более легкие частицы способны мигрировать далеко от береговой линии. Можно сделать вывод, что физические характеристики вносят неотъемлемый вклад в распространение ЧИШД в гидросфере, а значит, знания о весе и размерах ЧИШД могут являться одними из ключевых параметров, определяющих зону загрязнения данными отходами в различных окраинных морях СЛО.

Также в проведенном исследовании выявлен различный химический состав ЧИШД в акватории Баренцева, Чукотского и Восточно-Сибирского морей. Частицы износа шин и дорог, полученные в акватории Баренцева моря, в своем составе имели парафины (микrokристаллический воск), тогда как ЧИШД из Чукотского и Восточно-Сибирского морей характеризовались высокой представленностью компонентов смазочных материалов: в Чукотском море доминировал стеарат кальция, а в Восточно-Сибирском – полиуретановый лак на водной основе. Стоит предположить, что парафины определяют большую площадь поверхности ЧИШД, существенно не утяжеляя частицы, в связи с чем последние способны достаточно далеко распространяться от береговой линии Баренцева моря. В свою очередь, компоненты смазочных материалов не способны резко увеличивать размер ЧИШД, но, вероятно, способны влиять на вес полученных образцов. Так, ЧИШД, имеющие в своем составе стеарат кальция, характеризовались наименьшим весом и встречались в наиболее удаленных от береговой линии зонах Чукотского моря. Частицы износа шин и дорог, содержащие в своем составе полиуретановый лак, имели более высокий вес и быстро оседали у береговой линии Восточно-Сибирского моря.

Еще одной важной особенностью различного химического состава ЧИШД в зависимости от окраинных морей СЛО является разнообразное влияние данных отходов на экологию гидросферы. Так, считается, что парафины (микrokристаллический воск) не являются токсичными для окружающей среды и человека, тогда как стеарат кальция и полиуретановый лак способны оказывать механическое и биологическое действия на морские организмы [14 – 16]. При этом наиболее неблагоприятным является способность компонентов смазочных материалов (стеарата кальция, полиуретанового лака на водной основе), выявленных в Чукотском и Восточно-Сибирском морях, к биологическому воздействию, то есть воздействию на структуру ДНК, процессы размножения, роста и дифференцировки клеток. Это определяет высокий риск мутаций и развития злокачественных образований у организмов, обосновывает важность изучения характера миграции ЧИШД с различным химическим составом в водах окраинных морей СЛО, доказывает необходимость исследований возможных пагубных эффектов данных частиц на окружающую среду и человека [15, 16].

Заключение

Концентрация и физико-химические характеристики частиц износа шин и дорог отличаются между окраинными морями СЛО, что диктует необходимость дальнейшего более детального изучения их природы, стратегии миграции в акватории морей и оценки эффекта воздействия на окружающую среду, в частности на гидросферу. Полученные результаты позволят разработать и внедрить в практику меры предотвращения накопления ЧИШД в мировом океане и способы ликвидации имеющихся в морских водах загрязнений данными отходами.

Список литературы

1. A review of tire wear particles: Occurrence, adverse effects, and control strategies / Y. Wang, X. Li, H. Yang [et al.] // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2024. – Vol. 283, No. 421. – Art. 116782. doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.116782
2. Мазлова, Е. А. Влияние отходов автомобильных шин на окружающую среду / Е. А. Мазлова, А. В. Лобанов, Р. Р. Усманов // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. – 2024. – № 3(318). – С. 37 – 46.
3. Идентификация микропластика в береговом грунте арктических и дальневосточных морей / Я. Ю. Блиновская, О. А. Куликова, Е. А. Мазлова, М. В. Гаврило // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. – 2020. – № 1(292). – С. 35 – 38. doi: 10.33285/2411-7013-2020-1(292)-35-38
4. Microplastics in water systems: A review of their impacts on the environment and their potential hazards / H. Kye, J. Kim, S. Ju [et al.] // *Heliyon*. – 2023. – Vol. 9, No. 4. – Art. e14359. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14359
5. Microplastics in the Arctic: a transect through the Barents Sea / H. Emberson-Marl, R. L. Coppock, M. Cole [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. – 2023. – No. 10. – Art. 1241829. doi: 10.3389/fmars.2023.1241829
6. Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers / E. Yakushev, A. Gebruk, A. Osadchiev [et al.] // *Communications Earth & Environment*. – 2021. – Vol. 2, No. 23. doi: 10.1038/s43247-021-00091-0
7. Атлас биологического разнообразия морей и побережий Российской Арктики. – Текст : электрон. / под ред. В. А. Спиридонова, М. В. Гаврило, Е. Д. Красновой, Н. Г. Николаевой. – М. : WWF России, 2011. – 64 с. – URL: https://wsbs-msu.ru/res/DOCFOLDER120/atlas_biol_ros_arkt_web.pdf (дата обращения: 23.04.2025)
8. Колончин, К. В. Исследования содержания микропластика в воде и промысловых рыбах: от научного поиска к масштабному мониторингу / К. В. Колончин, А. П. Педченко, В. А. Беляев // *Труды ВНИРО*. – 2023. – Т. 193. – С. 162 – 173. doi: 10.36038/2307-3497-2023-193-162-173
9. Microplastic pollution in tropical estuary gastropods: Abundance, distribution and potential sources of Klang River estuary, Malaysia / M. Zaki, S. Zaid, A. Zainuddin, et al. // *Marine Pollution Bulletin*. – 2021. – Vol. 162, No. 12. – Art. 111866. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111866
10. Arctic Ocean sediments as important current and future sinks for marine microplastics missing in the global microplastic budget / S. Kim, J. Kim, S. Kim [et al.] // *Science Advances*. – 2023. – Vol. 9, No. 27. – Art. eadd2348. doi: 10.1126/sciadv.add2348
11. A Review on Management of End of Life Tires (ELTs) and Alternative Uses of Textile Fibers / P. Grammelis, N. Margaritis, P. Dallas [et al.] // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, No. 3. – Art. 571. doi: 10.3390/en14030571
12. Rudels, B. Arctic Ocean Water Mass Structure and Circulation / B. Rudels, E. Carmack // *Oceanography*. – 2022. – Vol. 35, No. 3-4. – P. 52 – 65. doi: 10.5670/oceanog.2022.116
13. Arctic threads: Microplastic fibres in Chukchi and Beaufort Sea Sediments / K. Dhineka, P. Mishra, T. Ikenoue [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. – 2024. – Vol. 208. – Art. 116954. doi: 10.1016/j.marpolbul.2024.116954
14. Safety Data Sheet. Calcium stearate. According to Regulation (EU) No 453/2010. Issue Date 20.10.2020. – Текст : электрон. – URL: https://www.tepekimya.com.tr/application/files/8316/0680/4174/Calcium_stearate_SDS_EN.pdf (дата обращения: 23.04.2025)
15. Rose, M. D. Scientific Opinion on the re-evaluation of microcrystalline wax (E 905) as a food additive EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (ANS) / M. D. Rose // *EFSA Journal*. – 2013. – Vol. 11, No. 4. – P. 3146. [32 pp.] doi: 10.2903/j.efsa.2013.3146

16. Effects of polyurethane microplastics combined with cadmium on maize growth and cadmium accumulation under different long-term fertilisation histories / M. Zhao, Y. Li, C. Li [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2024. – Vol. 15, No. 473. – P. 134726. doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.134726

References

1. Wang Y., Li X., Yang H. [et al.], A review of tire wear particles: Occurrence, adverse effects, and control strategies, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, vol. 283, no. 421, art. 116782. doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.116782

2. Mazlova Ye.A., Lobanov A.V., Usmanov R.R. [Impact of waste automobile tires on the environment], *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental protection in the oil and gas complex], 2024, no. 3(318), pp. 37-46. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Blinovskaya Ya.Yu., Kulikova O.A., Mazlova Ye.A., Gavrilov M.V. [Identification of microplastics in the coastal soil of the Arctic and Far Eastern seas], *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental protection in the oil and gas complex], 2020, no. 1(292), pp. 35-38. doi: 10.33285/2411-7013-2020-1(292)-35-38 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Kye H., Kim J., Ju S. [et al.], Microplastics in water systems: A review of their impacts on the environment and their potential hazards, *Heliyon*, 2023, vol. 9, no. 4, art. e14359. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14359

5. Emberson-Marl H., Coppock R.L., Cole M. [et al.], Microplastics in the Arctic: a transect through the Barents Sea, *Frontiers in Marine Science*, 2023, no. 10, art. 1241829. doi: 10.3389/fmars.2023.1241829

6. Yakushev E., Gebruk A., Osadchiv A. [et al.], Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers, *Communications Earth & Environment*, 2021, vol. 2, no. 23. doi: 10.1038/s43247-021-00091-0

7. Available at: https://wsbs-msu.ru/res/DOCFOLDER120/atlas_biol_ros_arkt_web.pdf (accessed 23 April 2025)

8. Kolonchin K.V., Pedchenko A.P., Belyaev V.A. [Studies of microplastic content in water and commercial fish: from scientific research to large-scale monitoring], *Trudy VNIRO* [Proceedings of VNIRO], 2023, vol. 193, pp. 162-173. doi: 10.36038/2307-3497-2023-193-162-173 (In Russ., abstract in Eng.)

9. Zaki M., Zaid S., Zainuddin A. [et al.], Microplastic pollution in tropical estuary gastropods: Abundance, distribution and potential sources of Klang River estuary, Malaysia, *Marine Pollution Bulletin*, 2021, vol. 162, no. 12, art. 111866. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111866

10. Kim S., Kim J., Kim S. [et al.], Arctic Ocean sediments as important current and future sinks for marine microplastics missing in the global microplastic budget, *Science Advances*, 2023, vol. 9, no. 27, art. eadd2348. doi: 10.1126/sciadv.add2348

11. Grammelis P., Margaritis N., Dallas P. [et al.], A Review on Management of End of Life Tires (ELTs) and Alternative Uses of Textile Fibers, *Energies*, 2021, vol. 14, no. 3, art. 571. doi: 10.3390/en14030571

12. Rudels B., Carmack E. Arctic Ocean Water Mass Structure and Circulation, *Oceanography*, 2022, vol. 35, no. 3-4, pp. 52-65. doi: 10.5670/oceanog.2022.116

13. Dhineka K., Mishra P., Ikenoue T. [et al.], Arctic threads: Microplastic fibres in Chukchi and Beaufort Sea Sediments, *Marine Pollution Bulletin*, 2024, vol. 208, art. 116954. doi: 10.1016/j.marpolbul.2024.116954

14. Safety Data Sheet. Calcium stearate. According to Regulation (EU) No 453/2010. Issue Date 20.10.2020, available at: https://www.tepekimya.com.tr/application/files/8316/0680/4174/Calcium_stearate_SDS_EN.pdf (accessed 23 April 2025).

15. Rose M.D. Scientific Opinion on the re-evaluation of microcrystalline wax (E 905) as a food additive EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added

to Food (ANS), *EFSA Journal*, 2013, vol. 11, no. 4, pp. 3146. [32 pp.], doi: 10.2903/j.efsa.2013.3146

16. Zhao M., Li Y., Li C. [et al.] Effects of polyurethane microplastics combined with cadmium on maize growth and cadmium accumulation under different long-term fertilisation histories, *Journal of Hazardous Materials*, 2024, vol. 15, no. 473, pp. 134726. doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.134726

Pollution of the Arctic Ocean Seas by Tire Wear Products

**E. A. Mazlova, A. V. Lobanov,
Ya. Yu. Blinovskaya, A. P. Pedchenko**

*Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia;
Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia;
All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography,
Moscow, Russia*

Keywords: tires; pollution; microplastics; petrochemical waste; environment; waste; pollution prevention; tire decomposition products; Arctic Ocean; tire and road wear particles.

Abstract: The article considers the results of the study of the quantitative and physicochemical composition of tire and road wear particles (TRWP) identified as part of the total micro-sized pollution of the Russian Arctic waters. When entering the environment, TRWP is absorbed by marine organisms, which disrupts their vital processes. Despite the existing opinion about the detrimental impact of TRWP on the environment, their concentration, physicochemical properties and biological effects have not been fully studied. Studies have shown that the TRP concentration in the marginal seas of the Arctic Ocean (AO) was 0.25 pcs./($\text{km}^3 \cdot 10^{-6}$). It was found that the Pechora Sea was characterized by the highest concentration of tire wear debris (20.76 pcs./($\text{km}^3 \cdot 10^{-6}$), while the Barents and Laptev Seas had the lowest concentrations of 0.68 and 0.39 pcs./($\text{km}^3 \cdot 10^{-6}$), respectively. It was revealed that in the Laptev Sea, tire wear debris were found at the shortest distance from the coast and had the greatest mass. Tire and road wear debris from the Chukchi Sea were found at the greatest distance from the coast and had the lowest mass; from the Barents Sea, they contained non-toxic paraffins and plasticizers; from the Chukchi Sea, they consisted of toxic calcium stearate, and tire wear debris from the East Siberian Sea consisted of toxic polyurethane varnish. It has been established that the concentration and properties of TRWP differ between the marginal seas of the Arctic Ocean, which dictates the need for further study of their nature, migration strategy and assessment of the impact on the environment.

© Е. А. Мазлова, А. В. Лобанов,
Я. Ю. Блиновская, А. П. Педченко, 2025