

СОДЕРЖАНИЕ МИКРОПЛАСТИКА ВО ЛЬДУ, СНЕГЕ И ПОДЛЁДНОЙ ВОДЕ КУРШСКОГО ЗАЛИВА ЗИМОЙ 2021 г.

И. Ю. Бочерикова^{1,2}, И. П. Чубаренко¹

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: irina_chubarenko@mail.ru

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Россия, 236041, Калининград, ул. Александра Невского, д. 14,
e-mail: ibocherikova@yandex.ru

Загрязнение водной толщи, донных осадков и пляжей мелкими частицами пластика (микропластик, МП, < 5 мм) в настоящее время исследуется активно. Однако по загрязнению льда и снега данные пока единичны. В работе представлены результаты анализа количества частиц МП (0.3–5 мм) в кернах льда, образцах снега и подледной воды Куршского залива (Балтийское море), отобранных на пяти станциях 19 февраля 2021 г. Подтверждено более высокое загрязнение льда, выраженное в количестве частиц МП (0.3–5 мм) на 1 л (талых или естественных) вод; оно составило в среднем 66.4 шт./л для снега, 90.5 шт./л для льда и 9.1 шт./л для подледных вод. Значительно повышенные концентрации частиц МП (до 281 шт./л) отмечены в поверхностном слое льда (1.5–3 см). Это может быть в данном случае следствием накопления загрязнения, поступающего из атмосферы: в мягком прибалтийском климате чередование оттепелей и морозных периодов способствует образованию верхних слоёв льда из снега, находящегося на нём. Синтетическая природа частиц подтверждена с помощью рамановской спектрометрии, показавшей присутствие наряду с полиэтиленом (15 %) также значительного количества тяжёлых видов пластика (полиуретан, поливинилацетат, полиакрилонитрил и др., в сумме более 24 %). Волокна составили около 95 % частиц, плёнки – 1 % и прочие фрагменты – 4 %. Подледные воды Куршского залива, содержащие от 5.9 до 15.3 частиц МП на литр, оказались более чем на два порядка сильнее загрязнены, чем воды толщи Балтийского моря, содержащие в среднем 0.03 частицы МП на литр в том же размерном диапазоне. Это подтверждает общую тенденцию аккумуляции частиц МП в заливах и эстуариях рек, имеющих ограниченный водообмен с морем.

Ключевые слова: микропластик, лёд, снег, вода, распределение, лагуна, натурный эксперимент, Балтийское море

Введение

Пластик начали широко производить в 50-х годах XX столетия. В настоящее время производится не менее 360 млн т/год различных пластиков, причём около половины составляют одноразовые товары и упаковка (PlasticsEurope, 2021). Согласно отчётам независимой международной природоохранной некоммерческой организации Greenpeace за 2020 г. (Greenpeace, 2020), на одного человека в России приходилось примерно 400 кг пластиковых отходов в год.

На данный момент пластик, в том числе микропластик (МП) – частицы пластика до 5 мм (Thompson et al., 2004; GESAMP, 2016), распространены по всему Мировому океану от Арктики до Антарктики и обнаруживаются в донных осадках, на поверхности воды и в водной толще. Самой распространенной формой частиц пластика в океане являются волокна (до 95 % (Lusher et al., 2015)). Пластик составляет 60–80 % морского мусора (Derraik, 2002).

Балтийское море часто называют самым загрязненным морем в мире (HELCOM, 2010). Известно, что в среднем 62 % мусора, выброшенного на берег в Швеции, Финляндии, Эстонии и Латвии, – это пластик, а на морском дне его доля составляет примерно 36 % (электронный ресурс: blastic.eu). Пластиковый мусор в больших количествах обнаруживается на пляжах Балтийского моря, у поверхности и в толще воды и на морском дне. Чаще всего встречаются такие виды пластикового мусора, как упаковки из-под чипсов и сладостей, фасовочные пакеты, полиэтиленовые пленки и т.д. Окурки – наиболее часто выбрасываемый вид мусора и главный загрязнитель побережий в мире (Greenpeace, 2020).

В настоящее время идёт активное изучение содержания МП в морской среде (поверхность, водная толща, дно, береговая зона), однако до сих пор очень мало исследований посвящено пластиковому загрязнению во льдах и снеге. Большая часть статей по этой тематике относится к загрязнению пластиком льдов Арктики и Антарктиды (Obbard et al., 2014; Peeken et al., 2018; Kanhai et al., 2021; Kim et al., 2021). Исследования, которые рассказывали бы о проблеме пластикового загрязнения во льдах других водоёмов, практически отсутствуют. Единственное наблюдение в акватории Балтийского моря (Ботнический залив), показало, что концентрация МП в морском льду составляет от 8 до 41 частицы на литр растаявшего льда (Geilfus et al., 2019).

Целью данного исследования является анализ загрязнения микропластиком льда, снега и подлёдных вод Куршского залива Калининградской области.

Регион исследования

Экспедиция по отбору проб льда, снега и подлёдной воды в Куршском заливе Калининградской области состоялась 19 февраля 2021 г. (рисунок 1). Работы проведены на 5 станциях (таблица 1), находящихся на расстоянии 300–500 м от берега. Глубина воды на станциях составляла 1.2–3 м.

Поскольку толщина льда на станции 4 оказалась всего 18 см, на расстоянии 30 м от неё был отобран ещё один керн (станция 5).

Зима 2020–2021 гг. в регионе южной Балтики была умеренной (по принятой классификации зим (Железова, 2021)), облачной и малоснежной, со средним значением температуры воздуха в январе -1°C – днём и -2°C – ночью (электронный ресурс: rp5.ru). Ледовый покров на заливе начал формироваться с января, и ко времени отбора проб его толщина составляла 10–30 см. (электронный ресурс: en.ilmatieteenlaitos.fi).

Во время отбора проб на Куршском заливе погода была ясной, температура воздуха в регионе держалась на отметке -5 – (-6) $^{\circ}\text{C}$, наблюдался слабый юго-восточный ветер 5 м/с (электронный ресурс: rp5.ru, станция Храброво). Ледовый покров был плотным, ровным, местами встречались трещины (рисунок 2). Снег был старый, на станции 2 его не было. Расстояние от мест пробоотбора до ближайшей метеостанции составляло от 12 до 33 км; во время пробоотбора также велись наблюдения за погодными условиями (облачность, структура льда и снежного покрова на заливе).

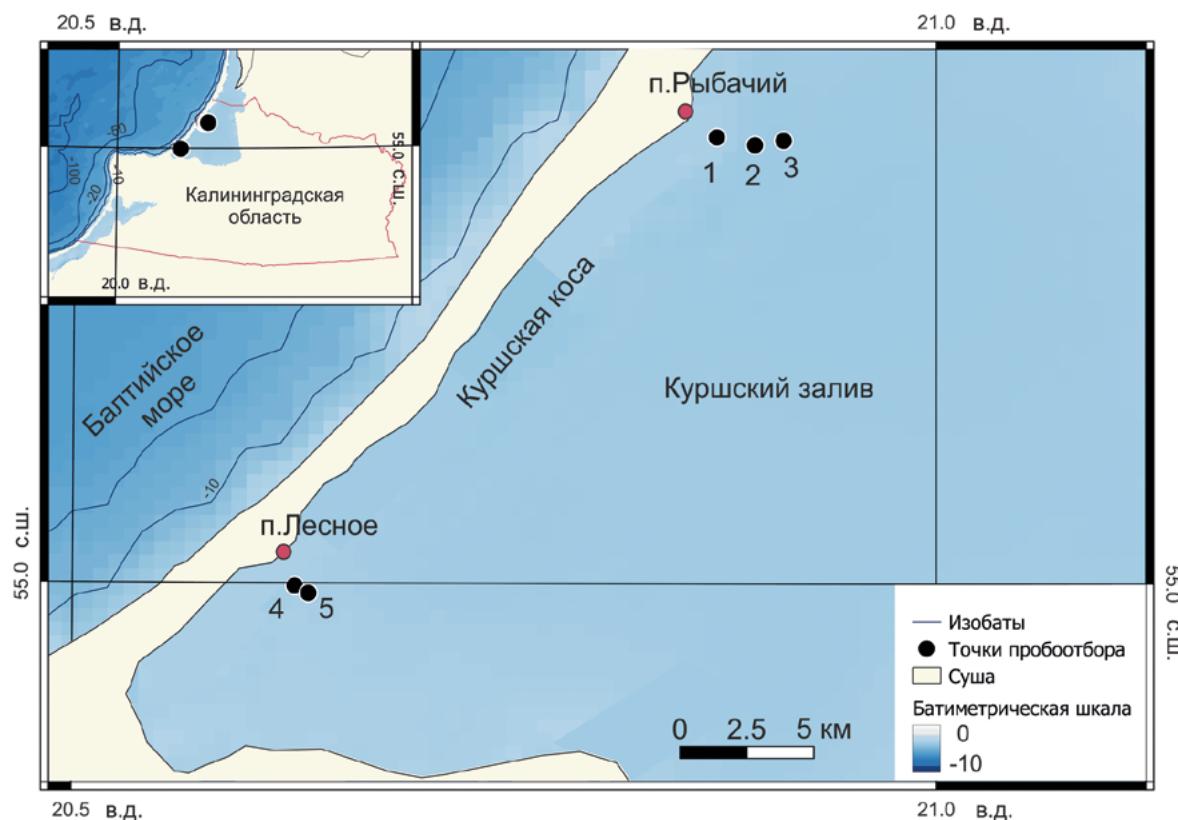


Рис. 1 – Карта района работ и станции отбора проб в Куршском заливе

Таблица 1 – Характеристики станций отбора проб

№ станции	Широта	Долгота	Глубина, м	Пробы
1	55.1466	20.8607	2.4	лёд, снег, вода
2	55.1455	20.8625	2.4	лёд, вода
3	55.1359	20.865	2.8	лёд, снег, вода
4	54.9994	20.6028	1.2	лёд, снег, вода
5	54.998	20.6033	1.2	лёд, снег, вода



Рис. 2 – Поверхность льда на станции 2 (Куршский залив)

Методы исследований

Керны вырезали ручным ледобуром ПИ-8 (производства ООО «Метеоприбор») с внутренним/внешним диаметром 17 см / 22 см, соответственно. Вырезаемые керны имели диаметр 15–16 см, не всегда одинаковый по длине керна (например, см. фото на рисунке 3). Снег отбирался в том же месте, где затем бурили керн; подлёдную воду отбирали непосредственно из лунки. Снег и лёд упаковывали в новые зип-пакеты из полиэтилена (аналогично (Peeken et al., 2018; Kim et al., 2021)) и подписывали. Дополнительно на станции 1 был отобран ящик снега (ёмкостью 5.8 л) для последующей оценки его плотности и пересчёта загрязнения на dm^3 собственно снега. Для этого широкий ящик с тонкими прозрачными стенками медленно вдавливается в снег сверху до заполнения, исключая спрессовывание, затем снизу вставлялась крышка. Подлёдную воду отбирали в 5-литровые пластиковые чистые ПЭТ-бутылки. Для контроля внешнего загрязнения в непосредственной близости от точек отбора на всё время работы (10–15 мин на станции) устанавливали чашки Петри с чистыми бумажными фильтрами. Впоследствии, при их анализе под микроскопом, в лаборатории на 5 фильтрах было обнаружено 2 волокна (по одному на станциях 2 и 4). Такой уровень внешнего загрязнения был признан незначительным, и соответствующая коррекция при последующем анализе не вводились.

Керны на МП, извлекаемые из ледяной толщи, упаковывали в плотные полимерные мешки и для транспортировки помещали в контейнеры. Последующие циклы работ с кернами были выполнены в лабораторных условиях в Атлантическом отделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук (АО ИО РАН). Упакованные керны до их обработки на МП хранились в морозильных камерах в горизонтальном положении при температуре -12°C .

Далее в лабораторных условиях керны льда разрезали на несколько частей: верх, середина (могло быть от 3 до 5 частей, в зависимости от длины керна) и низ. Высота отрезанных дисков составляла 4–6 см. Керны, имеющие слои с явно различной структурой льда, разрезали по границам слоёв. Часто керны были разделены структурно на две части: верхняя часть была белого цвета, непрозрачная и более рыхлая по структуре, а нижняя – прозрачная и однородная (рисунок 3). После разрезания кернов отдельные части упаковывали в плотные полиэтиленовые зип-пакеты.



Рис. 3 – Самый длинный керн – 33 см. Отобран на станции 3, имеет ярко выраженные различия в структуре слоёв: верхняя часть молочного цвета, непрозрачная, а в нижней части лёд сплошной и прозрачный

Разделённые части керна, как и пробы снега, оставляли на сутки при комнатной температуре в плотно закрытых полиэтиленовых зип-пакетах до образования талой воды. Талую воду проливали через фильтр прибора вакуумного фильтрования (ПВФ) с тремя воронками. В каждую воронку подкладывали вырезанные фильтры (в два слоя) с размером ячейки 100 мкм. После фильтрации фильтры упаковывали в стерильную чашку Петри и подписывали. Объём талой воды измеряли химическим мерным стаканом с точностью до 10 мл.

Для удаления остатков органики и биоты фильтры подвергались окислению. Фильтр помещали в лабораторный стакан, добавляли перекись водорода H_2O_2 (30 %), дистиллированную воду и катализатор Fe(II), всё это выдерживалось в течение 24 часов на водяной бане при температуре 75 °C. После окисления в пробу добавляли раствор HCl для удаления фракций кальцита, затем пробу с фильтром оставляли отставаться примерно на сутки (Зобков, Есюкова, 2018). На следующий день остывший раствор из стакана проливали через ПВФ на те же самые фильтры пробы, с которыми он окислялся. После фильтрации фильтры снимали и помещали в сухие подписанные чашки Петри.

Фильтры просматривали на стереоскопическом цифровом микроскопе Микромед МС-2-ZOOM Digital с десятикратным увеличением. Регистрировали частицы МП размером 0.3–5 мм всех трёх форм – волокна, плёнки и фрагменты иной

формы. МП от биоты визуально отличали по некоторым признакам (Norén, 2007; Nor and Obbard, 2014): 1) волокна/нити имеют примерно одинаковый диаметр по всей длине; 2) нитевидные частицы МП, как правило, имеют однородную окраску по всей длине; 3) волокна не сегментированы и не выглядят как скрученные плоские ленты; 4) пластиковые плёнки не блестят, как чешуйки рыб, за которые их можно принять. Поскольку (как и в других исследованиях, например, см. (Peeken et al., 2018; Kim et al., 2021)) в процессе отбора и обработки проб применялась тара из новых полиэтилена и полиэтилентерефталата, для исключения возможного загрязнения от тары при просмотре фильтров оператор должен был откладывать частицы из визуально схожих материалов для их дальнейшей спектроскопической идентификации. Однако, как и в работах (Есиюкова, Чубаренко, 2019; Кривошлык, Чубаренко, 2021; Chubarenko et al., 2018, 2020; Esiukova et al., 2020, 2021), таковых обнаружено не было. В целом, для плёнок и фрагментов размером более 0.3 мм стереомикроскоп позволяет легко отличить новые материалы от тех, которые подвергались действию разрушающих факторов окружающей среды, так что применение новой пластиковой тары при исследовании загрязнения относительно крупными частицами МП представляется вполне оправданным. Для определения материала выделенных частиц случайная выборка (1.2 % от общего количества) была проанализирована с помощью рамановского спектрометра. Большая часть (около 90 %) частиц, взятых для рамановского анализа, брались с фильтров от льда, в связи с тем, что этих фильтров было количественно больше.

Контроль возможного внешнего загрязнения при работе в лаборатории проводился на каждом этапе обработки проб. Рядом с местом обработки устанавливались чашки Петри с чистыми фильтрами. В течение 10 часов экспозиции на фильтрах обнаруживалось 6–9 нитей. В общей сложности в чашках обнаружено 187 частиц за 210 часов экспозиции, что принято несущественным по сравнению с количеством выделенных из пробы частиц, и соответствующая поправка не вводилась.

Результаты

На загрязнение микропластиком проанализированы 11 проб, отобранных на пяти станциях (таблица 1). Длина кернов на станциях и объёмы полученной из них талой воды приведены в таблице 2. Следует отметить, что не только диаметр кернов мог изменяться на 1–2 см вдоль оси керна (рисунок 3), но и верхняя/нижняя поверхности льда имели неровности высотой до 0.5–1 см. Поэтому ошибка оценки объёма льда керна

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \cdot h$$

по его диаметру d и длине h может составлять до 60 %. При этом объёмы, указанные в таблице 2, получены прямым измерением в лаборатории, а потери талой воды после извлечения керна были минимальны за счёт герметичности упаковки и хранения при отрицательных температурах.

Таблица 2 – Длина кернов льда и объёмы полученной талой воды

Керны	1	2	3	4	5
Длина (см)	24	20	33	18	14
Объём талой воды (мл)	4120	3650	5465	3310	2925

Из отобранных проб льда, снега и подлёдной воды получено 37 фильтров (см. таблицу 3). Общий объём профильтрованных вод составил 50.33 л, из них подлёдной воды – 26 л, воды из растаявшего льда/кернов – 19.47 л, снега – 4.86 л. Объём воды от одного сегмента керна (т.е. воды, профильтрованной через один фильтр) изменялся от 0.1 л до 1.24 л.

Таблица 3 – Количество полученных проб, фильтров и их распределение по средам

Место	Лёд		Снег	Подлёдная вода
	кернов	фильтров	фильтров	фильтров
Куршский залив	5	27	5	5

Из всех проб было выделено (с учётом коррекции) в общей сложности 2507.4 частиц, визуально определяемых как частицы антропогенного происхождения (пример см. на фото рисунка 4). В целом, волокна составляли 95 % всех найденных частиц МП, плёнок (1 %) и фрагментов иной формы (4 %) было значительно меньше. Волокна, плёнки и прочие частички во всех пробах чаще всего встречались в размерном диапазоне 0.3–1 мм. Плёнок таких размеров было найдено 68 % от общего количества, а волокон и частичек иной формы – 48 %. Реже всего встречались частицы МП в размерном диапазоне 2–5 мм. По цвету частицы распределялись по загрублённой цветовой шкале: прозрачный, белый, зелёный, синий, жёлтый, красный, коричневый и чёрный (Esiukova et al., 2020). Больше всего найдено бесцветных волокон (51 %) и волокон синих цветов (42 %), плёнок – чёрного (41 %), синего и белого (16 %) фрагментов – синего (19 %) и жёлтого цветов (15 %).

Для определения материала выделенных из проб частиц, часть образцов с фильтров была проанализирована с помощью рамановского спектрометра. Всего было отобрано 80 частиц, или 1.2 % от общего количества найденных частиц на фильтрах. Из этих 80 частиц при анализе удалось определить всего 49 образцов. Следует отметить, что спектрометрический анализ позволил у некоторых частиц определить состав из нескольких элементов (например, вид пластика и несколько красителей). По этой причине количество определённых элементов в составе больше, чем количество проанализированных частиц (49 из 80 частиц было определено, в составе 49 частиц было определено 57 элементов). Из этих 49 частиц 6 имели естественное происхождение (кварц, волос и т.д.), 5 образцов определили как химические соединения (хлорид талия, фенилфенацилсульфид и этилендианилин), 9 частиц определились как красители (*indigo carmine*, *ivory black*, *hostasol green G-K* и др.) и 34 частицы были антропогенного происхождения, из которых 25 частиц относятся к синтетическим полимерам (МП).

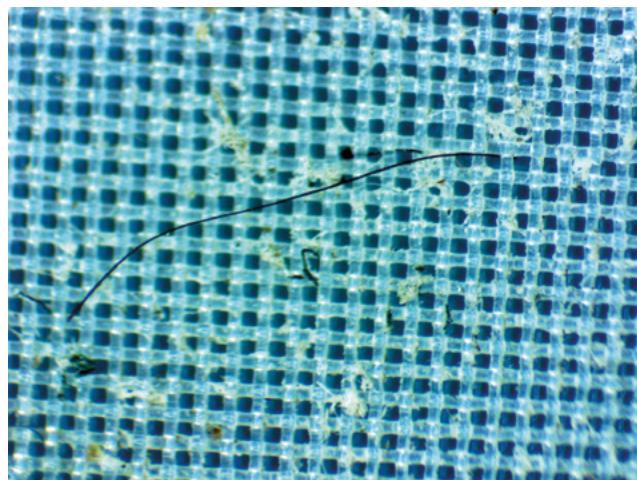


Рис. 4 – Волокно МП на фильтре 100 мкм. Масштаб 40Х

После определения химического состава были вычислены соответствующие коэффициенты поправок. Из 49 идентифицированных частиц 53 % определили как синтетические полимеры (пластики), а 69.4 % – в целом частицы антропогенного происхождения (включая карбоновые нити, краски, цветные волокна целлюлозы и др.). С учётом этого процентного состава высчитывали реальные значения количества частиц для каждого из просмотренных фильтров, которые и приводятся далее. Полученное с помощью спектроскопии распределение микрочастиц, обнаруженных в пробах снега, льда и воды Куршского залива, по материалам (в процентах) приведено на рисунке 5 отдельно для частиц МП (синтетических полимеров, 53 % от всех частиц) и частиц антропогенного происхождения, не являющихся синтетическими полимерами.

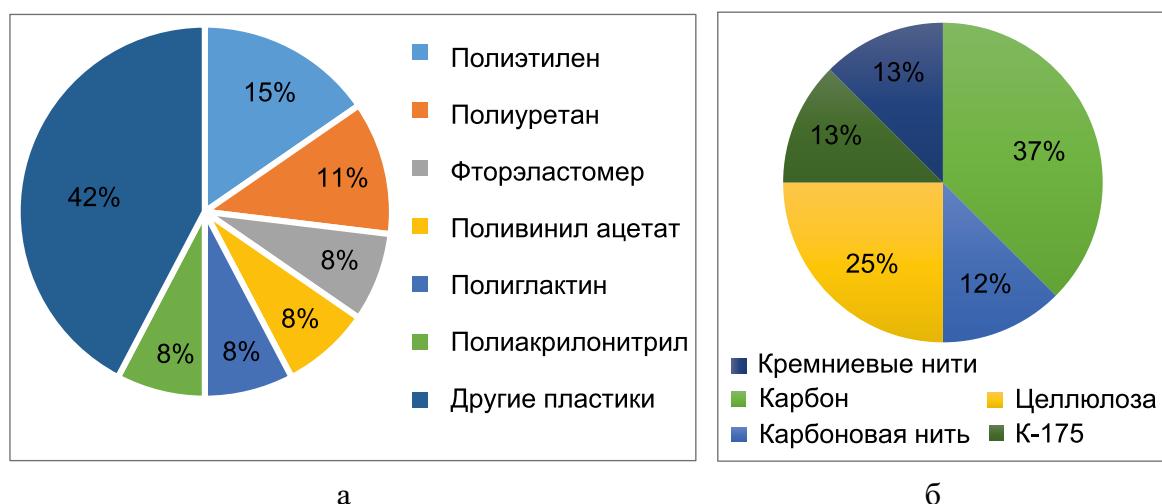


Рис. 5 – Состав микрочастиц (в процентах), обнаруженных в пробах снега, льда и воды Куршского залива: (а) частицы МП, (б) частицы антропогенного происхождения, не являющиеся синтетическими полимерами

На 5 фильтрах *подлёдной воды* (с учётом коррекции по результатам спектроскопии) было обнаружено 216.8 частиц МП и 283.8 антропогенных частиц. Средняя концентрация МП в 1 л воды составила 8.3 шт. Средняя концентрация антропогенных частиц – 10.9 шт./л. В фильтрах, помимо волокон, было обнаружено 2 плёнки и 5 частичек иной формы. Больше всего было прозрачных и синих волокон. Найденные плёнки были синего и чёрного цветов, среди иных фрагментов преобладали синие и белые.

Образцы *снега* на станциях отбирались как в пакеты – для определения загрязнения на литр талой воды, так и в ящик известного объёма – для оценки его плотности и дальнейшего пересчёта загрязнения на 1 м^3 собственно снега. Для снега было получено 5 фильтров, в которых было насчитано (с учётом коррекции) 293.1 частица МП или 383.8 антропогенных частиц. Средняя концентрация МП в пробах снега Куршского залива составила 60.3 шт. на литр талой воды, а антропогенных частиц – 79.0 шт./л. Волокна были в основном синего цвета и прозрачные (46 % и 45 % соответственно), но встречались также зелёные, красные, жёлтые, реже всего коричневые, белые и чёрные. Плотность снега, оцененная из его массы и объёма тестового сосуда (ящика), оказалась равна $289\text{ кг}/\text{м}^3$, что хорошо соответствует типичным значениям для лежалого снега. Таким образом, в пересчёте на 1 м^3 собственно снега в среднем приходится 17.5 частиц МП.

Из 5 кернов *льда* в сумме было получено 27 фильтров, в которых обнаружили 1322.9 частиц МП из 1839.8 антропогенных частиц. Средняя концентрация МП в керне составила 67.9 шт./л, а средняя концентрация антропогенных частиц была 94.5 шт./л. Больше половины обнаруженных волокон были прозрачного цвета (53 %), немного меньше было синих (43 %), затем следовали зелёные, жёлтые и красные (около 1 % каждый цвет). Также были обнаружены плёнки (преимущественно белого цвета) и фрагменты иной формы (больше всего было синего, белого и жёлтого цветов).

Средняя концентрация МП в верхних частях кернов (2–5 см) составляет $188.6\text{ шт.}/\text{л}$, в средних и нижних частях – 64.7 и $74.2\text{ шт.}/\text{л}$, соответственно. Во всех кернах, кроме одного, взятого на 4 станции, наиболее высокие концентрации МП были отмечены в верхней части, наименьшие – в отдельных слоях в середине керна, и незначительное повышение концентрации – в нижней части (рисунок 6). Высокая концентрация МП в верхней части льда и её резкое снижение после первых сантиметров льда обнаружено и в пробах льда в Ботническом заливе (Geilfus et al., 2019).

Средняя концентрация антропогенных частиц в верхней части кернов составляла $247.0\text{ шт.}/\text{л}$. В средней части концентрация составила $84.7\text{ шт.}/\text{л}$, в нижней части – $97.1\text{ шт.}/\text{л}$. Самая высокая концентрация обнаружена в верхней части керна, взятого на станции 5 – $353.9\text{ шт.}/\text{л}$; самая низкая концентрация – в средней части керна со станции 1 – $31.4\text{ шт.}/\text{л}$.

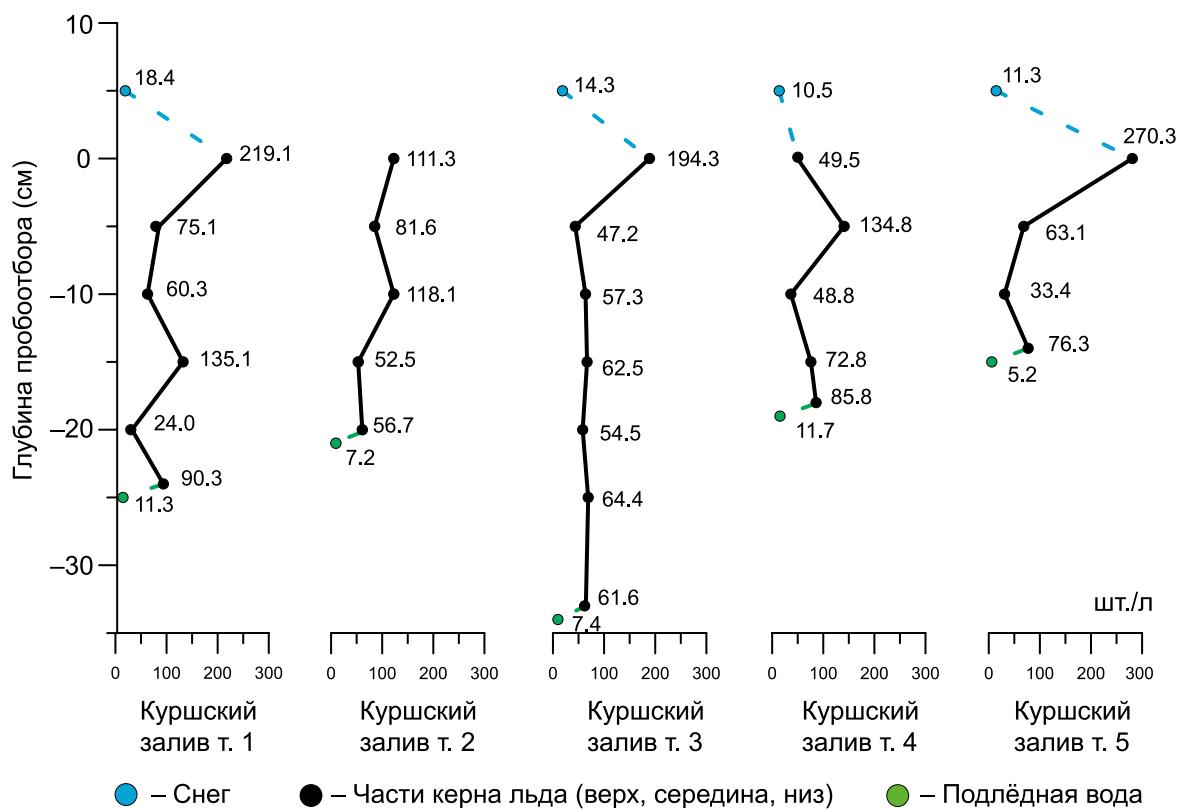


Рис. 6 – Графики изменений средней концентрации частиц МП (шт./л) в пробах снега, льда и подледной воды. Цветом показан вид пробоотбора на данной точке (станции). Для снега значения приведены в шт. на 1 дм³ собственно снега

Обсуждение и выводы

Частицы МП (0.3–5 мм) были обнаружены во всех пробах снега, льда и подледной воды Куршского залива. Загрязнение, выраженное в количестве частиц на 1 л (талых или естественных) вод, составило в среднем 60.3 шт./л для снега, 67.9 шт./л для льда и 8.3 шт./л для подледных вод. Таким образом, оказалось, что лёд действительно загрязнён частицами МП значительно больше снега и подледной воды. Этот вывод хорошо согласуется с результатами исследований (Kanhai et al., 2020) для Арктического региона, где загрязнение частицами МП льда (2–17 шт./л) оказалось на порядки выше, чем загрязнение подледных вод (0–18 штук на кубометр). При этом следует отметить, что если для отбора проб льда в данном исследовании и в работе (Kanhai et al., 2020) применялся один и тот же метод, то для подледных вод они различны. Из-за большой толщины льда (до 140 см), его солёности и значительно меньшей загрязнённости вод, в Арктике для отбора подледных вод необходимо было использовать насосную систему, закачивавшую через лунку от отобранного керна 780–1200 л воды на каждой станции (Kanhai et al., 2020). В данном исследовании, учитывая потенциально высокую

загрязнённость вод залива, из-за его закрытости и населённости водосбора и побережья, вода отбиралась в 5-литровые ёмкости и непосредственно из лунки. Такой объём действительно оказался достаточным для достоверного определения уровня загрязнения вод (8.3 шт./л). Поскольку толщина льда составляла всего 14–33 см и он на данной акватории практически пресный (измеренная солёность вод на всех станциях составляла всего 0.3–0.4 г/л), влияние поровых вод из стенок лунки на загрязнение подлёдных вод можно считать несущественным. Таким образом вывод (Kanhai et al., 2020) о значительно большем загрязнении льда по сравнению с подлёдной водой подтверждается: в данном случае однолетний лёд залива оказался на порядок более загрязнён.

Количественное сравнение концентраций частиц МП во льдах других регионов пока затруднительно, поскольку имеющиеся немногочисленные исследования проведены различными методами и охватывают различные диапазоны частиц МП. Тем не менее, (Obbard et al., 2014) обнаружили в многолетних льдах центральной части Арктики загрязнение частицами МП (< 5 мм, включая волокна) от 38 до 234 шт./л. Исследуя однолетний лёд Ботнического залива в Балтийском море, (Geilfus et al., 2019) получил концентрации частиц МП от 8 до 41 шт./л (< 5 мм, волокна не считали). Плавучие льдины в Чукотском море были исследованы на содержание частиц МП > 0.1 мм (включая волокна) в работе (Kim et al., 2021): в среднем загрязнение составило 11.4 ± 9.12 шт./л. В размерном диапазоне частиц МП 0.3–5 мм и теми же методами, что и в данной работе, проведено исследование загрязнения однолетнего льда в узкой закрытой бухте Новик (Залив Петра Великого, Японское море): оно составило от 135 до 273 шт./л (Chubarenko et al., 2022, under preparation).

Интересно отметить присутствие во льду большого количества тяжёлых (тонущих) пластиков – полиуретана, поливинилацетата, полиакрилонитрила и т.п. (см. рисунок 5). Учитывая относительно спокойные условия вертикального перемешивания при нарастании (практически пресного) льда в исследуемом водоёме, захват образующимся льдом (тонущих) частиц МП можно объяснить значимым влиянием их ассоциации с пузырьками воздуха: многие пластики гидрофобны (в данном случае гидрофобны все материалы, прямо перечисленные на рисунке 5а (Kraukis et al., 2022)) и в условиях лабораторного эксперимента обнаруживаются включёнными в пресный лёд именно вместе с пузырьками воздуха (Бочерикова, Чубаренко, 2022).

Заметно повышенные концентрации частиц МП в поверхностном слое льда могут быть в данном случае следствием накопления загрязнения, поступающего из атмосферы. Помимо прямого переноса частиц МП на поверхность льда ветром, в мягком прибалтийском климате чередование оттепелей и морозных периодов способствует образованию верхних слоёв льда из находящегося на нём снега, а снег в проведённом исследовании содержал заметно больше частиц МП, чем вода.

Подлёдные воды Куршского залива, содержащие от 5.2 до 11.3 частиц МП на литр, более, чем на два порядка, сильнее загрязнены, чем воды толщи Балтийского моря, имеющие в среднем 0.03 частицы МП на литр в том же диапазоне размеров частиц (Zobkov et al., 2019). Заметим, что подо льдом мелководного залива, в отличие

от морской толщи, гидродинамические условия очевидно существенно спокойнее, при этом из-за низкой солёности вод можно ожидать и устойчивой обратной термической стратификации. Ослабление перемешивания способствует более эффективному оседанию/всплытию частиц МП, т.е. в безлёдный период можно ожидать ещё большего содержания частиц МП в воде. Это предполагает, что Куршский залив, имеющий очень ограниченный водообмен с Балтийским морем, удерживает и накапливает пластиковые частицы, поступающие в него со стоком рек.

Благодарности. Исследование загрязнения льда частицами микропластика проводится в рамках проекта РНФ 19-17-00041(П). Лаборатория камеральной обработки проб поддерживается в рамках темы Г3 ИО РАН FMWE-2021-0012. Авторы благодарят С. В. Фетисова и А. Н. Граве за предоставление образцов для анализа, Е. Е. Есиюкову за методическую поддержку и А. Ю. Зюбина за проведение спектроскопического анализа.

Список литературы

1. Бочерикова И. Ю., Чубаренко И. П. Частицы пластика в морском и пресном льду: результаты лабораторного эксперимента. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2022. С. 82–86.
2. Есиюкова Е. Е., Чубаренко И. П. Микропластик в водной толще, донных осадках и песках пляжей юго-восточной части Балтийского моря: концентрации, распределение частиц по размерам и формам // Региональная экология. 2019. Т. 2. № 56. С. 1–14. <https://doi.org/10.30694/1026-6500>.
3. Железова Е. В. Зимние периоды в Вислинском/Калининградском заливе Балтийского моря по метеорологическим данным в 2011–2021 годах // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. Т. 8. № 1. С. 184–191.
4. Зобков М. Б., Есиюкова Е. Е. Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов // Океанология. 2018. Т. 58. № 1. С. 149–157. <https://doi.org/10.7868/S0030157418010148>.
5. Кривошлык П. Н., Чубаренко И. П. Сезонные изменения содержания частиц микропластика в песках прибойной зоны пляжа // Океанологические исследования. 2021. Т. 49. № 2. С. 57–66.
6. Финский метеорологический институт = Finnish Meteorological Institute // <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/ice-winter-2020-2021> (дата обращения 15.12.2021).
7. Blastic // www.blastic.eu/ (дата обращения 30.11.2021).
8. Chubarenko I. P., Esiukova E. E., Bagaev A. V., Bagaeva M. A., Grave A. N. Three-dimensional distribution of anthropogenic microparticles in the body of sandy beaches // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 628–629. P. 1340–1351. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.167>.
9. Chubarenko I., Esiukova E., Khatmullina L., Lobchuk O., Grave A., Kileso A., Haseler M. From macro to micro, from patchy to uniform: analyzing plastic contamination along and across a sandy tide-less coast // Marine Pollution Bulletin. 2020. 156 (111198). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111198>.
10. Chubarenko I. Physical processes behind interactions of microplastic particles with natural ice // Environmental Research Communications. 2022. 4 (012001). <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac49a8>.

11. *Derraik J. G. B.* The pollution of the marine environment by plastic debris: a review // *Marine Pollution Bulletin*. 2002. Vol. 44. P. 842–852. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5).
12. *Esiukova E. E., Zobkov M. B., Chubarenko I. P.* Data on microplastic contamination of the Baltic Sea bottom sediment samples in 2015–2016 // *Data in Brief*. February, 2020. Vol. 28. No. 104887. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104887>.
13. *Esiukova E., Lobchuk O., Volodina A., Chubarenko I.* Marine macrophytes retain microplastics // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 171. No. 112738. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112738>.
14. *Geilfus N.-X., Munson K. M., Sousa J., Germanov Y., Bhugaloo S., Babb D., Wang F.* Distribution and impacts of microplastic incorporation within sea ice // *Marine Pollution Bulletin*. 2019. Vol. 145. 2019. P. 463–473. ISSN: 0025-326X. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.029>.
15. GESAMP, 2016. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment (part 2) Available: <http://www.gesamp.org/publications/microplastics-in-the-marine-environment-part-2>.
16. Greenpeace. В поисках пластика. Как Greenpeace в России и люди по всей стране изучали пластиковый мусор на берегах морей, рек и озёр / Под ред. И. Скиптор. 2020.
17. HELCOM. Hazardous substances in the Baltic Sea – an integrated thematic assessment of hazardous substances in the Baltic Sea. In: *Baltic Sea Environment Proceedings*. 2010. No. 120B.
18. *Kanhai L. D. K., Gardfeldt K., Krumpen T., Thompson R. C., O'Connor I.* Microplastics in sea ice and seawater beneath ice floes from the Arctic Ocean // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. No. 5004. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61948-6>.
19. *Kim S.-K., Lee H.-J., Kim J.-S., Kang S.-H., Yang E.-J., Cho K.-H., Tian Z., Andrady A.* Importance of seasonal sea ice in the western Arctic ocean to the Arctic and global microplastic budgets // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 418. No. 125971. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125971>.
20. *Krauklis A. E., Karl C. W., Rocha I. B. C. M., Burlakovs J., Ozola-Davidane R., Gagani A. I., Starkova O.* Modelling of Environmental Ageing of Polymers and Polymer Composites-Modular and Multiscale Methods // *Polymers* (Basel). 2022. Vol. 5. No. 14. P. 216. <https://doi.org/10.3390/polym14010216>.
21. *Lusher A., Tirelli V., O'Connor I., Officer R.* Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples // *Scientific reports*. 2015. <https://doi.org/10.1038/srep14947>.
22. *Norén F.* Small plastic particles in Coastal Swedish waters // KIMO report. 2007. 11 p.
23. *Obbard R. W., Sadri S., Wong Y. Q., Khitun A. A., Baker I., Thompson R. C.* Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice // *Earth's Future*. Vol. 2. No. 6. 2014. P. 315–320.
24. *Peeken I., Primpke S., Beyer B., Gütermann J., Katlein C., Krumpen T., Bergmann M., Hehemann L., Gerdts G.* Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic // *Nat. Commun.* 2018. Vol. 9. No. 1505. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03825-5>.
25. Plastics Europe // <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021> // Europe P. Plastics – The Facts 2021. An analysis of European latest plastics production, demand and waste data. 2021 (дата обращения: 25.09.2022).
26. Rp5.ru// [https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Храброво,_им._императрицы_Елизаветы_Петровны_\(аэропорт\),_METAR/](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Храброво,_им._императрицы_Елизаветы_Петровны_(аэропорт),_METAR/) (дата обращения 08.05.2022).
27. *Thompson R. C., Olsen Y., Mitchell R. P., Davis A., Rowland S. J., John A. W., McGonigle D., Russell A. E.* Lost at sea: where is all the plastic? // *Science*. 2004. Vol. 304. No. 5672. P. 838–838.

28. Zobkov M. B., Esiukova E. E., Zyubin A. Y., Samusev I. G. Microplastic content variation in water column: the observations with novel sampling tool in stratified Baltic Sea // Marine Pollution Bulletin. 2019. Vol. 138. P. 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.047>.

Статья поступила в редакцию 19.07.2022, одобрена к печати 02.11.2022.

Для цитирования: Бочерикова И. Ю., Чубаренко И. П. Содержание микропластика во льду, снеге и подледной воде Куршского залива зимой 2021 г. // Океанологические исследования. 2022. № 50 (3). С. 102–117. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(3\).6](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(3).6).

MICROPLASTICS CONTENT IN ICE, SNOW AND UNDER-ICE WATER OF THE CURONIAN LAGOON IN WINTER 2021

I. Yu. Bocherikova^{1,2}, I. P. Chubarenko¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: irina_chubarenko@mail.ru

² Immanuel Kant Baltic Federal University,
14, A. Nevskogo ul., Kaliningrad, 236016, Russia
e-mail: ibocherikova@yandex.ru

Contamination of the water column, bottom sediments and beaches with small plastic particles (microplastics, MPs, < 5 mm) is currently being actively investigated, but data on ice and snow contamination are still very limited. The paper presents the results of the analysis of the number of MPs particles (0.3–5 mm) in ice cores, snow samples and under-ice water of the Curonian Lagoon (Baltic Sea), sampled at five stations on February 19, 2021. Higher ice contamination is confirmed: expressed in the number of MPs particles (0.3–5 mm) per 1 liter of (thawed or natural) water, it averaged at 66.4 items/l for snow, 90.5 items/l for ice and 9.1 items/l for under-ice water. Significantly increased amount of MPs particles (up to 281 items/l) were observed in the surface layer of ice (1.5–3 cm). This may in the given case be the consequence of the accumulation of contamination coming from the atmosphere: in the mild Baltic climate, the alternation of thaws and frosty periods favours the formation of the upper layers of ice from the snow on it. The synthetic nature of the particles was confirmed by Raman spectrometry, which showed the presence along with polyethylene (15 %) also, a significant number of heavy types of plastics (polyurethane, polyvinyl acetate, polyacrylonitrile, etc., in total more than 24 %). Fibers made up about 95 % of the particles, films 1% and fragments – 4 %. The under-ice waters of the Curonian Lagoon, containing from 5.9 to 15.3 MPs particles per liter, turned out to be more than two orders of magnitude more contaminated than the waters of the Baltic Sea, having an average of 0.03 MPs particles per liter in the same particle's size range. This confirms the general tendency of accumulation of MPs in bays and estuaries of rivers with limited water exchange with the sea.

Keywords: microplastic, ice, snow, water, distribution, lagoon, field experiment, Baltic sea

Acknowledgements: Investigations of ice contamination by microplastic particles is carried out within the framework of the Russian Science Foundation project No. 19-17-00041.

Laboratory facilities for sample processing are supported within the framework of the State Assignment of IO RAS No. FMWE-2021-0012. The authors thank S. V. Fetisov and A. N. Grave for providing samples for analysis, E. E. Esyukova for methodical support and A. Yu. Zyubin for spectroscopic analysis.

References

1. Bocherikova, I. Yu. and I. P. Chubarenko, 2022: *Plastic particles in sea and fresh ice: Results of the laboratory experiment*. Tomsk, Tomsk State University Publishing House, 82–86.
2. Blastic, www.blastic.eu/ (last accessed in 30.11.2021).
3. Chubarenko, I. P., E. E. Esiukova, A. V. Bagaev, M. A. Bagaeva, and A. N. Grave, 2018: Three-dimensional distribution of anthropogenic microparticles in the body of sandy beaches. *Science of The Total Environment*, **628–629**, 1340–1351, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.167>.
4. Chubarenko, I., E. Esiukova, L. Khatmullina, O. Lobchuk, A. Grave, A. Kiles, and M. Haseler, 2020: From macro to micro, from patchy to uniform: analyzing plastic contamination along and across a sandy tide-less coast. *Marine Pollution Bulletin*, **156** (111198), <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111198>.
5. Chubarenko, I. P., 2022: Physical processes behind interactions of microplastic particles with natural ice. *Environmental Research Communications*, **4** (012001), <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac49a8>.
6. Derraik, J. G. B., 2002: The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, **44** (9), 842–852, [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5).
7. Esiukova, E. E., O. I. Lobchuk, A. A. Volodina, and I. P. Chubarenko 2021: Marine macrophytes retain microplastics. *Marine Pollution Bulletin*, **171** (112738), <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112738>.
8. Esiukova, E. E., M. B. Zobkov, and I. P. Chubarenko, 2020: Data on microplastic contamination of the Baltic Sea bottom sediment samples in 2015–2016. *Data in Brief*, **28** (104887), <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104887>.
9. Esyukova, E. E. and I. P. Chubarenko, 2019: Microplastics in the water column, bottomsediments, and a beach sands of the southeastern Baltic sea: concentrations, particle distributions by size and shape. *Regional ecology*, **2** (56), 1–14, <https://doi:10.30694/1026-6500>.
10. Finnish Meteorological Institute, <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/ice-winter-2020-2021> (last accessed in 15.12.2021).
11. Geilfus, N.-X., K. M. Munson, J. Sousa, Y. Germanov, S. Bhugaloo, D. Babb, and F. Wang, 2019: Distribution and impacts of microplastic incorporation within sea ice. *Marine Pollution Bulletin*, **145**, 463–473, ISSN: 0025-326X. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.029>.
12. GESAMP, 2016. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment (part 2) Available: <http://www.gesamp.org/publications/microplastics-in-the-marine-environment-part-2>.
13. Greenpeace, 2020: V poiskah plastika. Kak Greenpeace v Rossii i lyudi po vsej strane izuchali plastikovyj musor na beregah morej, rek i ozyor (In search of plastic. Both Greenpeace in Russia and people across the country studied plastic garbage on the shores of seas, rivers and lakes) Edited by I. Skiptor.
14. HELCOM, 2010: Hazardous substances in the Baltic Sea – an integrated thematic assessment of hazardous substances in the Baltic Sea. In: *Baltic Sea Environment Proceedings*. **120B**.

15. Kanhai, L. D. K., K. Gardfeldt, T. Krumpen, R. C. Thompson, and I. O'Connor, 2020: Microplastics in sea ice and seawater beneath ice floes from the Arctic Ocean. *Scientific Reports*, **10** (5004), <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61948-6>.
16. Kim, S.-K., H.-J. Lee, J.-S. Kim, S.-H. Kang, E.-J. Yang, K.-H. Cho, Z. Tian, and A. Andradý, 2021: Importance of seasonal sea ice in the western Arctic ocean to the Arctic and global microplastic budgets. *Journal of Hazardous Materials*, **418** (125971), <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125971>.
17. Krauklis, A. E., C. W. Karl, I. B. C. M. Rocha, J. Burlakovs, R. Ozola-Davidane, A. I. Gagani, and O. Starkova, 2022: Modelling of Environmental Ageing of Polymers and Polymer Composites-Modular and Multiscale Methods. *Polymers (Basel)*, **5** (1), 216, <https://doi.org/10.3390/polym14010216>.
18. Krivoshlyk, P. N. and I. P. Chubarenko, 2021: Dependence of microplastic content on granulometric indicators in the sediments of the surf zone of the sea. *Journal of oceanological research*, **49** (2), 57–66, [https://doi:10.29006/1564-2291.JOR-2021.49\(2\).4](https://doi:10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(2).4).
19. Lusher, A., V. Tirelli, I. O'Connor, and R. Officer, 2015: Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Scientific reports*, <https://doi.org/10.1038/srep14947>.
20. Norén, F., 2007: Small plastic particles in Coastal Swedish waters. *KIMO report*, 11 p.
21. Obbard, R. W., S. Sadri, Y. Q. Wong, A. A. Khitun, I. Baker, and R. C. Thompson, 2014: Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future*, **2** (6), 315–320.
22. Peeken, I., S. Primpke, B. Beyer, J. Gütermann, C. Katlein, T. Krumpen, M. Bergmann, L. Hehemann, and G. Gerdts, 2018: Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic. *Nat. Commun.*, **9** (1505), <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03825-5>.
23. Plastics Europe // <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021> // Europe P. Plastics – The Facts 2021. An analysis of European latest plastics production, demand and waste data. 2021 (дата обращения: 25.09.2022).
24. Rp5.ru, [https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Храброво,_им._императрицы_Елизаветы_Петровны_\(аэропорт\),_METAR/](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Храброво,_им._императрицы_Елизаветы_Петровны_(аэропорт),_METAR/) (last accessed in 08.05.2022).
25. Thompson, R. C., Y. Olsen, R. P. Mitchell, A. Davis, S. J. Rowland, A. W. John, D. McGoniglead, and A. E. Russell, 2004: Lost at sea: where is all the plastic? *Science*, **304** (5672), 838–838.
26. Zhelezova, E. V., 2021: Winter periods in the Vistula lagoon (the Baltic sea) according to meteorological data in the period from 2011 to 2021. *International Research Journal*, **8**, 184–191, <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.110.8.031>.
27. Zobkov, M. B. and E. E. Esiukova, 2018: Microplastics in the Marine Environment: Review of Methods of Selection, Preparation and Analysis of Samples of Water, Sediments and Coastal Sediments. *Oceanology*, **58** (1), 149–157, <https://doi.org/10.7868/S0030157418010148>.
28. Zobkov, M. B., E. E. Esiukova, A. Y. Zyubin, and I. G. Samusev, 2019: Microplastic content variation in water column: the observations with novel sampling tool in stratified Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **138**, 193–205, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.047>.

Submitted 19.07.2022, accepted 02.11.2022.

For citation: Bocherikova, I. Yu. and I. P. Chubarenko, 2022: Microplastics content in ice, snow and under-ice water of the Curonian Lagoon in winter 2021. *Journal of oceanological research*, **50** (3), 102–117, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(3\).6](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(3).6).