



Контроль и охрана состояния водной среды и биоресурсов

Исследования содержания микропластика в воде и промысловых рыбах: от научного поиска к масштабному мониторингу

К.В. Колончин, А.П. Педченко, В.А. Беляев

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»), Окружной проезд, 19, Москва, 105187
E-mail: pedchenko@vniro.ru

Цель работы: в статье представлены предложения по развитию исследований загрязнения микропластиком вод и биоресурсов в районах российского рыболовства.

Материалы и методы: обобщены материалы ФГБНУ «ВНИРО» по количественной оценке содержания микропластика в Арктических морях, собранные в августе-октябре 2019–2022 гг., и современных исследований по данной проблеме. Пробы микропластика собраны на поверхности морей сетью Манта 335 мкм и обработаны по единой методике.

Результаты: проведенные исследования восполнили пробелы в знаниях о реальном уровне загрязнения микропластиком морской среды Арктического региона.

Новизна работы: в районах наблюдений масштабных локализаций микропластика не выявлено, уровень пластикового загрязнения поверхностных вод морей Российской Арктики был ниже по сравнению с другими районами Мирового океана. Мы указываем на актуальность предположения о том, что значительная часть фрагментов микропластика и волокон переносится атлантическими и тихоокеанскими течениями в Арктический бассейн. Выборочное обследование рыб в промысловых уловах на загрязнение микропластиком подтвердило наличие его фрагментов и волокон в ЖКТ некоторых особей (горбуша, терпуг, сельдь, морской окунь), выловленных в морях северной части Тихого океана в 2019, 2021 и 2022 гг.

Практическая значимость: глобальное увеличение содержания микропластика в морях Северного полушария, усугубляемое изменением климата, требует перехода от поисковых научных наблюдений к регулярному междисциплинарному изучению пластикового загрязнения биотопов экосистем морей Арктики, северной части Тихого океана и Атлантики. Ключевые положения и задачи мониторинга загрязнения микропластиком вод и биологических ресурсов в районах российского рыболовства предусматривают получение объективных и сопоставимых оценок на основе использования единых методов сбора и обработки проб, а также экосистемного подхода для предупреждения экологических рисков и обеспечения пищевой безопасности.

Ключевые слова: микропластик, антропогенное загрязнение, промысловые биоресурсы, пищевая безопасность, моря Арктики и северной части Тихого океана.

Studies of microplastic content in water and commercial fish: from scientific research to large-scale monitoring

Kirill V. Kolonchin, Andrey P. Pedchenko, Vladimir A. Belyaev

Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography («VNIRO»), 19, Okruzhnoy proezd, Moscow, 105187, Russia

Purpose. The article presents proposals for the development of studies of microplastic pollution of waters and biological resources in the Russian fishery areas.

Materials and methods. The materials of VNIRO on the quantitative assessment of the MPs content in the Arctic Seas in August-October 2019–2022 and modern research on this problem are summarized. MPs samples were collected on the surface of the seas with a Manta-trawl 335 and processed according to a single method.

Results. The conducted studies pick up knowledge gaps regarding the real level of marine MPs pollution of the Arctic region.

Novelty. No large-scale localization of MPs was detected in the observation areas, the level of plastic pollution on the surface of the Russian Arctic seas was lower compared to other areas of the World Ocean. We point out the relevance of the assumption that a significant part of MPs fragments and fibers are transported by Atlantic and Pacific currents to the Arctic basin. A sample survey of fish in commercial catches for MPs contamination confirmed the presence of its fragments and fibers in the digestive tract of some individuals (pink salmon, greenlings, herring, sea bass) caught in the North Pacific seas in 2019, 2021 and 2022.

Practical significance. The global increase in MPs content in the Northern hemisphere seas, exacerbated by climate change, requires a transition from exploratory scientific observations to regular multidisciplinary study of plastic pollution of biotopes of ecosystems of the Arctic, North Pacific and Atlantic seas. The key points and tasks of monitoring microplastic pollution of waters and biological resources in the Russian fishing areas provide for objective and comparable assessments based on the use of unified methods of collection and processing of samples, as well as an ecosystem approach to prevent environmental risks and ensure food safety.

Keywords: microplastics, anthropogenic pollution, fishing biological resources, food safety, Arctic and North Pacific seas.

ВВЕДЕНИЕ

Обобщение материалов исследований микропластика, выполненные учёными разных стран, подтверждают мнение, высказанное в монографии [Чубаренко и др., 2021], что масштабы проблемы загрязнения окружающей среды микропластиком сопоставимы в пространстве и времени с глобальными климатическими изменениями. Исследованиями подтверждено, что мелкие частицы пластика (включая микропластик с размерами <5 мм) отмечаются в разном количестве повсюду, во всех оболочках планеты и её обитателях. Одна из причин этого – активное использование пластика, обладающего «огромным спектром самых нужных свойств», в различных отраслях промышленности и быту, которое началось не так давно, всего 60–70 лет назад. Отмечено [Lusher et al., 2017; GESAMP, 2020], что рост мирового производства пластика сопровождается кратным и масштабным увеличением антропогенной нагрузки на морские экосистемы. Сведения, представленные в этих материалах, вызывают беспокойство, в первую очередь, с точки зрения потенциальной угрозы человеку, живым организмам, равновесию экосистем.

Немногочисленные публикации о загрязнении микропластиком биотопов Арктического региона [Bergmann et al., 2022] вызывают повышенный интерес учёных и общества, обусловленный широким распространением частиц пластика в окружающей среде, способных вызывать последствия планетарного масштаба [NOAA,¹ Казмирук, 2015]. Проблема перешла на более высокий уровень после публикации [Wright et al., 2013] о «биоаккумуляции» микропластиков, в материалах которой показано, что живые организмы загрязнены на порядки больше, чем среда их обитания.

Широко обсуждается вопрос о путях поступления микропластика в арктический бассейн и направлениях его дрейфа. Ответом на него стали результаты моделирования переноса частиц, выполненного норвежскими учёными [Strand et al., 2021], согласно которым одним из основных источников загрязнения Арктики является морской пластик, дрейфующий в атлантических водах из Центральной Европы. Отмечено, что его перемещение в потоках тёплых течений до границ Арктики длится около года, при этом крупный морской мусор переносится быстрее, чем микропластик, и в более разнообразных направлениях.

Многочисленными исследованиями подтверждено наличие и расположение пяти зон накопления пла-

вающего мусора и микропластика [Чубаренко и др., 2021]. Высказано предположение [Van Sebille et al., 2012; Cozar et al., 2017] о существовании шестого мусорного пятна в Арктике, в границах Баренцева моря.

Для получения количественной оценки загрязнения микропластиком поверхностных вод арктических морей, а также подтверждения/опровержения, высказанных предположений, проведено обобщение и анализ материалов сборов микропластика нейстонными сетями Манта-трал ячейей 335 мкм, выполненных специалистами ФГБНУ «ВНИРО» в Арктике в 2019–2022 гг. Результаты этих исследований были использованы при подготовке обоснования развития научных исследований для оценки загрязнения микропластиком вод и водных биоресурсов в районах российского рыболовства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования ВНИРО по оценке загрязнения вод микропластиком начаты в 2019 г. В продолжение исследований загрязнения вод микропластиком, выполненных в заливе Аляска на НИС «Профессор Кагановский» в феврале-марте [Egger et al., 2020], были проведены аналогичные наблюдения в Арктических морях по маршруту Трансарктического перехода НИС «Профессор Леванидов» в августе-сентябре 2019 г. [Педченко, Блиновская, 2020]. Эти исследования уникальны, поскольку выполнялись в рамках комплексного рыбохозяйственного мониторинга экосистем арктического региона, для которых даже незначительное увеличение антропогенной нагрузки может иметь необратимый характер. В том же году, в рамках проекта «Трансарктика 2019», был выполнен ряд научных экспедиций, включавших сбор проб микропластика нейстонными сетями в Арктическом регионе [Yakushev et al., 2021].

Специалистами ВНИРО выполнена оценка загрязнения поверхностных вод микропластиком в ходе комплексных морских экспедиций ФГБНУ «ВНИРО»:

- Трансарктическая экспедиция ФГБНУ «ВНИРО» на НИС «Профессор Леванидов» в августе-октябре 2019 г. [Педченко, Блиновская, 2020];
- Арктический переход барка «Седов» по Северному морскому пути в августе-октябре 2020 г. [Педченко, Сомов, 2021];
- Первая совместная съёмка микропластика в ходе российско-норвежской экосистемной съёмки в Баренцевом море в августе-сентябре 2021 г., BESS'2021 [Педченко и др., 2021];
- Сбор проб на загрязнение вод микропластиком на НИС «ТИНРО» в ходе съёмки тихоокеанских лососей в северной части Тихого океана в феврале-марте

¹ https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/noaa_microplastics_methods_manual.pdf

2022 г., выполненной в рамках международного года лосося IYS 2022 по Программе НПАФК;

- Совместная съёмка микропластика в ходе российско-норвежской экосистемной съёмки в Баренцевом море в августе-сентябре 2022 г., BESS'2022.

Акватория исследований и положение станций отбора проб микропластика в Арктическом регионе по маршрутам Трансарктической экспедиции ФГБНУ «ВНИРО» на НИС «Профессор Леванидов» в августе-октябре 2019 г. и Арктического перехода барка «Седов» по Северному морскому пути в августе-октябре 2020 г. представлены на рис. 1.

Отбор проб микропластика на поверхности арктических вод проводили по единой методике. Траления выполняли по ходу движения судна (на циркуляции только в 2019 г.) на скорости 2,0–3,5 узлов, в поверхностном слое моря нейстонной сетью Манта-трал с ячей 335 мкм, оснащённой калиброванным счётчиком General Oceanic's для контроля дистанции трале-

ния и объёма протока воды через её рамку размером 600×150 мм (рис. 2).

В ходе наблюдений в 2019–2022 гг. собрано 220 проб для оценки загрязнения микропластиком поверхностных вод российского сектора Арктики и северной части Тихого океана (табл. 1).

Лабораторную обработку проб, сортировку частиц микропластика и волокон для получения объективных, сопоставимых количественных оценок загрязнения поверхностных вод морей выполняли в соответствии с опубликованными методами [NOAA¹, Зобков, Есюкова, 2018], адаптированным к особенностям лабораторной базы, в несколько этапов: плотностное разделение методом флотации, фильтрование, центрифугирование (редко применялось), очистка проб от органического материала. В частности, для флотации использовали насыщенный раствор NaCl (с плотностью более 1,2 г/см³) или насыщенный раствор хлорида цинка ZnCl₂ (2,9 г/см³),

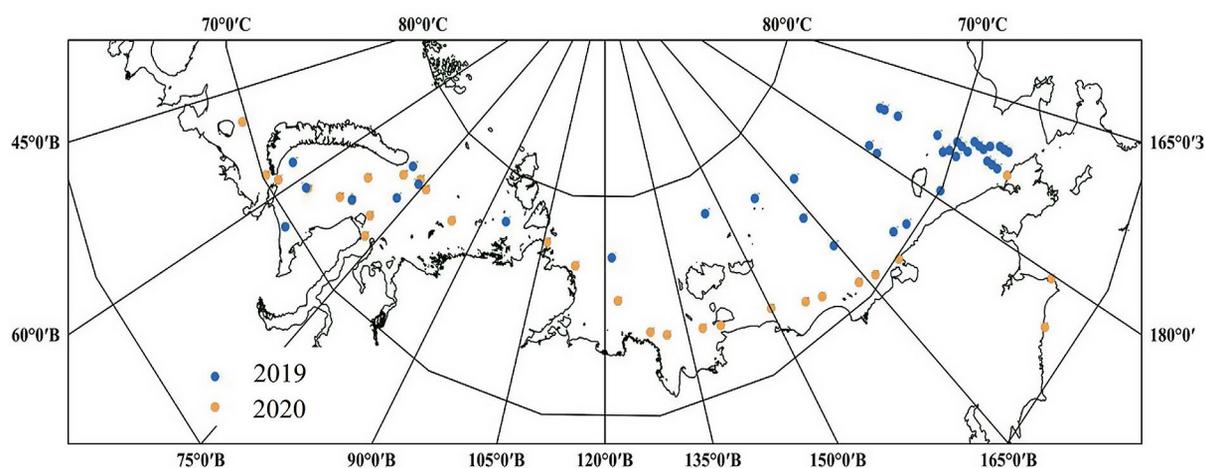


Рис. 1. Районы наблюдений и положение станций отбора проб микропластика в Арктическом регионе в 2019 и 2020 гг.

Fig. 1. Observation areas and location of microplastic sampling stations in the Arctic region in 2019 and 2020

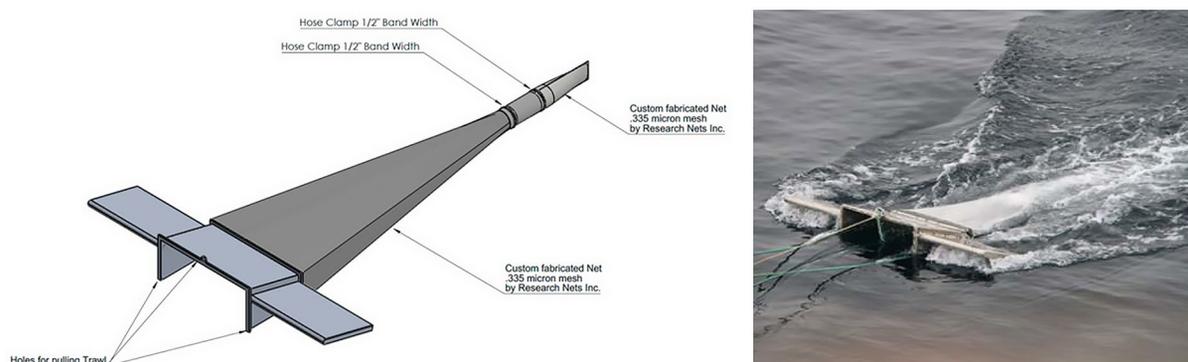


Рис. 2. Схема нейстонной сети Манта-трал (слева) и её вид в режиме сбора проб микропластика (справа)

Fig. 2. Diagram of the Manta-trawl neuston net (left) and its view in the microplastic sample collection mode (right)

Таблица 1. Общее количество собранных проб (числитель) и обнаруженных в них фрагментов микропластика (знаменатель) в ходе экспедиций ФГБНУ «ВНИРО» в 2019–2022 гг.

Table 1. The total number of samples collected (numerator) and fragments of microplastics found in them (denominator) during the expeditions of VNIRO in 2019–2022

Год	Районы наблюдений						Всего проб
	Баренцево море (восточная часть)	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море	Северная часть Тихого океана	
2019	0/0	8/16	1/0	7/2	23/11	45*/129	84
2020	2/2	11/10	6/1	6/9	1/0	2/2	28
2021	43/112	0/0	0/0	0/0	0/0		43
2022	33/18					32*/21	65
Всего проб	78/132	19/16	7/1	13/11	24/11	79/152	220

Примечание: * – по материалам наблюдений НИС «Профессор Кагановский» (IYS 2019) и «ТИНРО» (IYS 2022).

имеющие большую плотность, чем известные на сегодняшний день пластики. Перемешивание раствора выполняли в течение 10–30 минут с использованием магнитной мешалки. В ряде случаев пробоподготовки применяли центрифугирование при температуре 20–25 °С в течение 5 минут. Раствор с пробой, после сбора с его поверхности всплывших частиц, фильтровали с применением вакуумной фильтрующей установки. Для этого использовали мембраны типа МФАС-ос-2 диаметром 47 мм, изготовленные на основе смеси ацетатов целлюлозы с размером пор 0,45 мкм и общей пористостью 80–85%. Для предотвращения потери части анализируемого материала ввиду прилипания частиц к стенкам сосуда проводилась промывка ёмкости прямо на фильтр. Высушивание фильтров проводили при комнатной температуре в закрытых стерильных чашках Петри во избежание изменений в составе и физико-химических свойствах пластика. Во избежание шумов при определении качественного состава полученных образцов выполняли очистку их поверхности от органического материала жидким азотом. Размеры частиц и волокон определяли с помощью ИК-микроскопа Shimadzu AIM-8800, их массу – на аналитических весах с точностью 0,1 мкг.

Качественный анализ полученных проб проведён на базе Политехнического института Дальневосточного федерального университета с использованием методов инфракрасной микроскопии (ИК) и спектроскопии. Определение химического состава микропластика и вида полимера выполняли на ИК-спектрофотометре IRTaser-100 с приставкой НПВО (нарушенное полное внутренне отражение) Quest горизонтального типа (Shimadzu, Япония) с диапазоном измерений от 400 до 4000 см⁻¹ и разрешением 2 см⁻¹. Идентификация проводилась автоматическим срав-

нением со встроенной библиотекой спектров (STJ-Europe Spectral Database, Германия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сбор проб микропластика нейстонными сетями Манта-трал имеет преимущество перед другими методами и активно применяется норвежскими специалистами для проведения наблюдений в западной части Арктики [Lusher, et al., 2017]. Их использование в экспедиционных работах в 2019–2022 гг. позволило провести репрезентативный отбор проб микропластика, за счёт фильтрации большого объёма воды с большой площади водной поверхности, и выполнить корректное сопоставление результатов с данными о количестве микропластика на единицу объёма в других морях Мирового океана.

Количественные оценки содержания микропластика, полученные в экспедициях ФГБНУ «ВНИРО», показали, что наибольшие концентрации микропластика в водах Арктических морей в 2019–2022 гг. не превышали 0,15 ед./м³ (Чукотское – 0,02 ед./м³; Восточно-Сибирское – 0,05 ед./м³; Лаптевых – 0,02 ед./м³; Карское – 0,15 ед./м³; восточная часть Баренцева – 0,06 ед./м³). Полученные оценки пластикового загрязнения были сопоставимы с результатами, полученными в 78 рейсе НИС «Академик Келдыш» в сентябре-октябре 2019 г. [Yakushev et al., 2021], в которых среднее количество единиц частиц на единицу объёма составляло в Восточно-Сибирском, Лаптевых, Карском и Баренцевом морях 0,01, 0,002, 0,003 и 0,005 ед./м³, соответственно. Представленные оценки свидетельствуют о низкой загрязнённости микропластиком поверхностных вод российской части Арктических морей, по сравнению с таковыми в водах Финского залива Балтийского моря (0,3–2,1 ед./м³) [Setälä et al., 2016], южнее и юго-западнее Шпицбер-

гена в западной части Баренцева моря ($0,34 \pm 0,31$ ед./м³) [Lusher et al., 2015], Восточно-Китайского моря ($0,17 \pm 0,14$ ед./м³) [Zhao et al., 2014], морях у побережья Восточной Азии, Китая ($3,70 \pm 10,40$ ед./м³) [Isobe et al., 2015], водах юго-восточного побережья Кореи ($0,62 \pm 0,81$ ед./м³) [Kang et al., 2015] и других морей Мирового океана.

Пути переноса микропластика, а также вклад различных источников его поступления в Арктику недостаточно изучены в виду сложности реализации этой задачи. Быстрый перенос микропластика тёплыми течениями из Атлантики в Арктический бассейн подтверждён результатами моделирования [Strand et al., 2021], а также рабочими материалами одного из авторов (А.П. Педченко) и Bjørn Einar Grøsvik (Institute of Marine Research, Bergen, Norway) при обсуждении результатов первой совместной съёмки микропластика в Баренцевом море в 2021 г. и подготовке раздела «Загрязнение микропластиком» научного отчёта Рабочей группы по комплексным оценкам состояния Баренцева моря (WGIBAR) [ICES, 2022]. В частности, отмечено увеличение встречаемости частиц микропластика и волокон в границах распределения атлантических водных масс в центральной части Баренцева моря и потоках тёплых течений на акватории первой совместной съёмки микропластика в Баренцевом море в 2021 г.

Это позволяет говорить, что перенос микропластика из внешних вод в Арктический регион осуществляется несколькими путями. На западных его границах микропластик выносится несколькими потоками атлантических вод: (1) через центральную и прибрежную часть Баренцева моря, далее – пролив Карские ворота и пролив между архипелагами Земля Франца Иосифа и Новая Земля; (2) вдоль западного и северного побережья архипелага Шпицберген атлантическими водами Шпицбергенской ветви течения Западного Шпицбергена и далее в арктический бассейн по границе континентального шельфа. На восточных границах Арктического бассейна вынос частиц и волокон микропластика осуществляется через Чукотское море тёплыми тихоокеанскими водами из Северной части Тихого океана, что подтверждают сведения о встречаемости микропластика на станциях отбора проб на НИС «Профессор Леванидов» в российской части Чукотского моря в 2019 г. и данные наблюдений [Mu et al., 2019] в центральной его части.

Идентификация частиц микропластика, собранных на поверхности морей Арктики показала высокую встречаемость 4-х типов пластика: полиэтилена (PE и HDPE), полипропилена (PP), полистерола (PS), поливинилхлорида (PVC) (рис. 3), что согласуется с объём-



Рис. 3. Встречаемость видов МП на акватории Арктических морей по наблюдениям ФГБНУ «ВНИРО» в 2019–2022 гг.

Fig. 3. Occurrence of MP species in the waters of the Arctic Seas according to observations of VNIRO in 2019–2022

мами европейского производства наиболее распространённых видов полимеров [Plastic Europe, 2013²] и подтверждает ранее выявленные закономерности [Hidalgo-Ruz et al., 2012]. Аббревиатуры микропластика приведены согласно их международным наименованиям.

Выполненные исследования не выявили локализаций микропластика в границах обследованных морей Северного Ледовитого океана. В составе нейстонных уловов фрагменты микропластика составляли около 74% и волокна – 16%, перенос и распределение которых в Арктическом бассейне осуществляется преимущественно атлантическими и тихоокеанскими течениями.

На текущий момент оценки загрязнения микропластиком вод Арктических морей, полученные в ходе исследований ФГБНУ «ВНИРО», можно условно принять за «начальные» или «нулевые» показатели. Это актуально в преддверии активной фазы развития судоходства и эксплуатации трассы Северного морского пути, расширения рыбного промысла и развития марикультуры в условиях потепления Арктики и реализации крупных инфраструктурных проектов в Арктическом регионе. Учитывая [Чубаренко и др., 2021], что свойства частиц микропластика не только разнообразны и специфичны, но и изменяются в зависимости от времени пребывания в морской среде, представленные результаты могут быть полезны для оценки динамики антропогенной нагрузки на биоту и условия её обитания в экосистемах Арктических и Дальневосточных морей России.

² Plastic Europe. 2013. <http://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/103-plastics-fact-2013>.

Можно предположить, что загрязнение вод пластиком способно генерировать экологические угрозы для экосистем, поскольку области повышенной биопродуктивности не редко совпадают с районами наиболее сильного антропогенного воздействия [Патин, 2015].

Вследствие своих физико-химических свойств микропластик может вовлекаться в трофическую систему, что увеличивает опасность его попадания в организм человека [Масленников и др., 2017]. Поглощение частиц микропластика морскими организмами различного трофического уровня может оказывать как физиологическое (связанное, например, с закупоркой путей у фильтратов или кишечных трактов у рыб), так и потенциальное токсикологическое воздействие, обусловленное веществами (и/или микроорганизмами), сорбированными на поверхности частиц пластика или мигрирующими из них их мономеров. В отличие от других материалов, производимых человеком, вовлечение синтетических полимеров в пищевые цепи биоты неуклонно увеличивается с ростом их промышленного производства [Lusher et al., 2017].

Проблема загрязнения водных объектов микропластиком и выявление его негативного воздействия на гидробионты в условиях динамичности водной среды относится к чрезвычайно важным и актуальным направлениям современной экологии. Регистрация фактов обнаружения пластика в пище морских обитателей с каждым годом увеличивается, после первой публикации в конце 1960-х гг. [Kenyon, Kridler, 1969]. Учёные регулярно констатируют встречаемость микропластика в различных видах гидробионтов (рыбы, беспозвоночные и т. д.) [Bråte et al., 2016; Lusher et al., 2017; Burns, Voxall, 2018; Liboiron et al., 2016; и др.], что свидетельствует о его включении в трофические цепи. Результаты выборочных обследований рыб в промысловых уловах на загрязнение микропластиком в 2019, 2021, 2022 гг. [Гордеев и др., 2019; устные сообщения И.И. Гордеева и А.В. Согриной (ВНИРО)] подтверждают наличие фрагментов микропластика и волокон в ЖКТ некоторых особей (горбуша, терпуг, сельдь, морской окунь), выловленных в морях северной части Тихого океана.

Важно отметить, что исследования механизмов накопления микропластика в ЖКТ рыб тесно связаны с оценкой качества рыбной продукции и активно изучаются и обсуждаются как зарубежными, так и отечественными исследователями. Расширение географии исследований микропластика и проведение мониторинга его содержания в воде и промысловых рыбах позволит специалистам ФГБНУ «ВНИРО» получить новые данные о его встречаемости в районах отече-

ственного и трансграничного рыболовства, выполнить количественную оценку загрязнения микропластиком водных экосистем.

Обеспокоенность общества этой проблемой наглядно иллюстрирует динамика количества научных публикаций о загрязнении морской среды и биоты микропластиком. До 1975 года сообщения о встречаемости микропластика в воде и её обитателях были единичными. В последующие годы учёные всё чаще обращали внимание на загрязнение пластиком различных природных сред и живых организмов. Кратное ежегодное увеличение научных публикаций в международных реферируемых изданиях WoS и Scopus отмечено после 2015 года [Никитин и др., 2020].

Публикационная активность учёных по этой проблеме сопоставима с динамикой его мирового производства, которая демонстрирует рост от 2 млн тонн в 1950 г. до более чем 400 млн тонн в 2015-м г., с резким динамичным увеличением объёмов выработки в последние 13 лет [Соколов, 2020]. Учёные констатировали тенденцию увеличения встречаемости фрагментов пластика разного размера в морских экосистемах, включая пляжи и прибрежные воды, а также в пресноводных водных объектах по мере ежегодного увеличения объёмов мирового производства пластика [Lusher et al., 2017]. Примечательно, что около 55% от всех научных работ по данной проблеме опубликовано специалистами Китая, США, Германии и Индии, где расположены основные пластиковые производства (рис. 4).

Необходимо отметить возможные риски, связанные с увеличением пластикового загрязнения вод Мирового океана, и возрастающие в связи с этим потенциальные угрозы для морских экосистем, морских организмов и человека. Исследование скоплений морского мусора и пластика в Мировом океане [Zettler et al., 2013] выявило формирование новых биоценозов на этих участках. Исследователи [Lee, Park, 2022] по результатам изучения морского микро-/макропластика, дрейфующего в границах Чеджудского пролива у берегов Кореи, установили, что пластики, с одной стороны, служат новой экологической средой обитания вредных видов эукариот и паразитов в море, с другой, — функционируют как транспорт, обеспечивающий их распространение.

Представленный обзор исследований указывает на целесообразность перехода от поисковых научных исследований к регулярному междисциплинарному изучению загрязнения пластиком биотопов экосистем морей Арктики, северной части Тихого океана и Атлантики, особенно в районах промысла. Изучение этих аспектов весьма востребовано при решении ши-

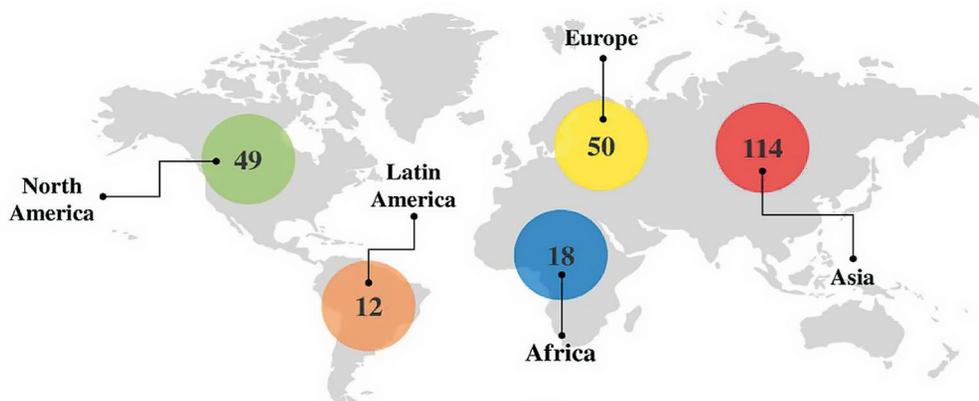


Рис. 4. Мировое производство пластика (млн тонн) как было объявлено FAO в 2017 г. [Lusher et al., 2017]

Fig. 4. Global plastic production (million tons) as declared by FAO 2017 [Lusher et al., 2017]

рокого круга задач, связанных с оценкой возможных рисков от воздействия микропластика на экосистемы морей. Наблюдения специалистов ВНИРО и обзор материалов современных исследований по данной проблеме стал основой для разработки Программы мониторинга загрязнения микропластиком вод и водных биоресурсов в районах отечественного рыболовства (далее – Программа).

В частности, в Программе отмечено, что с учётом Стратегии развития арктического региона до 2035 года,³ особое внимание следует обратить на следующие ключевые моменты:

- Возможное накопление пластика в Арктике в результате его переноса тёплыми течениями от Европейского побережья и северной части Тихого океана;
- Увеличение антропогенной нагрузки на морские экосистемы, в том числе пластикового загрязнения, в результате сохранения тенденции потепления, развития транспортных перевозок и судоходства, открытия новых и расширения районов промышленного рыболовства в Арктическом регионе;
- Поглощение частиц микропластика морскими организмами различного трофического уровня может оказывать как физиологическое (связанное, например, с закупоркой путей у фильтратов или кишечных трактов у рыб), так и потенциальное токсикологическое воздействие, обусловленное выделением вредных добавок, химических соединений и/или токсинов, сорбированных на поверхности частиц пластика;
- Накопление отходов пластикового мусора в донных отложениях.

³ Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года <http://www.scrf.gov.ru/media/files/file/hcTiEHnCdн6TqRm5A677n5iE3yXLi93E.pdf>

Разработка мер сдерживания антропогенной нагрузки обосновывает актуальность реализации новых направлений исследований загрязнения микропластиком вод Арктических морей и решения следующих задач в рамках Программы:

- Расширение временного и пространственного мониторинга загрязнения пластиком Арктических морей с целью выявления источников загрязнения, особенностей переноса и условий накопления синтетических фрагментов и волокон;
- Переход к количественным методам оценки загрязнения вод пластиком для повышения их точности и возможности сравнения результатов выполняемых исследований;
- Согласование межведомственных научных программ исследований загрязнения вод пластиком для обеспечения перехода к масштабному и комплексному мониторингу, улучшению дизайна исследований, отчётности и совершенствованию методов оценок;
- Проведение комплексных исследований загрязнения микропластиком водных биологических ресурсов для получения актуальных оценок его влияния на промысловые гидробионты и кормовые организмы в целях обеспечения пищевой безопасности;
- Оценка возможных рисков от воздействия микропластика и пластикового мусора на экосистему Арктики с экологической, экономической и социальной точек зрения.

Авторы поддерживают мнение экспертов [Symposium Summary, 2021⁴], что для достижения положи-

⁴ Symposium Summary 2021. International Symposium on Plastics in the Arctic and the Sub-Arctic Region. The Government of Iceland and the Nordic Council of Ministers. ONLINE EVENT Reykjavik. Iceland MARCH 2–4 and March 8–9, 2021.36 p. https://oaarchive.arctic-council.org/bitstream/handle/11374/2732/Symposiumsummary_lores.pdf?sequence=1&isAllowed=y

тельных результатов по уменьшению загрязнения пластиком пресноводных и морских экосистем необходима реализация следующих мероприятий:

- Повышение контроля за выбросами пластикового мусора, потерями промысловых снастей, сбросами льяльных вод;
- Организация приёма и утилизации промысловых снастей, не пригодных для дальнейшего использования, стимулирование рыболовных предприятий, осуществляющих эти операции;
- Производство продуктов и упаковок, которые имеют меньше пластиковых отходов и могут подвергаться биологическому разложению в окружающей среде;
- Внедрение дополнительной очистки бытовых сточных вод от синтетических волокон и частиц пластика;
- Разработка руководящих принципов и внедрение в практику маркировки орудий лова;
- Доработка документов, регламентирующих обращение с отходами в Арктическом регионе.

При реализации Программы предусматривается продолжение международного сотрудничества в области рыболовства, а также научно-технического сотрудничества с научными учреждениями РАН и ВУЗами России.

Ежегодно выполняются совместные съёмки по оценке загрязнения микропластиком Баренцева моря и сопредельных вод в ходе российско-норвежской экосистемной съёмки (BESS), начатые в 2021 году в соответствии с решением 50-й Смешанной Российско-Норвежской комиссии по рыболовству (СРНК).⁵

Продолжается многолетнее сотрудничество ФГБНУ «ВНИРО» и ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет» («ДВФУ») в рамках действующего соглашения от 20 февраля 2021 г. по обработке и идентификации частиц микропластика, собранных в ходе научных экспедиций методами ИК-микроскопии и спектрометрии.

Намечены совместные работы с ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания и биотехнологии» в рамках Соглашения с ФГБНУ «ВНИРО» от 03.03.2021 г., направленные на обеспечение пищевой безопасности, и предусматривающие исследования содержания первичных и вторичных микропластиков в воде и отдельных видах пищевой продукции для оценки экспозиции и риска воздействия микропластиков на здоровье человека.

Представленные материалы и исследования, запланированные в Программе по данной тематике, обосновывают актуальность реализации следующей важной задачи – оценка возможных рисков от воздействия микропластика на экосистемы морей Арктики, Северо-Восточной Атлантики, северной части Тихого океана. Биодоступность микропластиков для морских организмов обосновывает необходимость исследований загрязнения вод и биологических ресурсов для получения актуальных данных о влиянии этого вида загрязнения на промысловые гидробионты.

Методической части научных исследований по Программе уделено особое внимание. Отмечено [UNEP, 2016; GESAMP, 2019], что результаты применения различных орудий и методов сбора проб микропластика не сравнивались между собой, а также различия в методических подходах при их обработке приводят к значительной вариации оценок степени загрязнения вод пластиком в научных публикациях. Авторы поддерживают эту точку зрения и неоднократно отмечали необходимость методической унификации количественных сборов и анализа проб микропластика [Педченко, Беляев, 2021; Педченко и др., 2021]. Для получения объективных и сопоставимых оценок загрязнения биоресурсов и среды их обитания подготовлены рекомендации по сбору, пробоподготовке, экстракции и идентификации частиц микропластика и волокон на основе опубликованных методик и полученных навыков экспедиционных и лабораторных работ, которые будут использоваться в последующих исследованиях института.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные количественные оценки содержания микропластика в морях российской части Арктики, полученные по единой методике в экспедициях ФГБНУ «ВНИРО» в 2019–2022 гг., свидетельствуют о незначительном содержании микропластика в поверхностном слое по сравнению с другими морями Мирового океана.

Одним из важных результатов проведённых исследований является подтверждение отсутствия локализаций микропластика и шестого мусорного пятна в границах обследованных морей Северного Ледовитого океана. Исследования показали, что потоки атлантических и тихоокеанских течений выносят значительную часть фрагментов микропластика и волокон в Арктический бассейн и осуществляют их перенос в его пределах. По нашему мнению, помимо исследований распределения и степени загрязнения акваторий морей микропластиком, не менее важно изучать пути и объёмы их поступления в Арктический регион.

⁵ Протокол пятидесятой сессии Смешанной Российско-Норвежской комиссии по рыболовству <https://www.jointfish.com/rus/content/download/525/6904/file/50-russisk.pdf>

Проведение обследования части уловов на загрязнение рыб микропластиком в 2021–2022 гг. подтвердили наличие фрагментов микропластика и волокон в ЖКТ отдельных видов промысловых рыб дальневосточных морей (горбуша, терпуг, сельдь, морской окунь).

Проведённые исследования указывают на необходимость перехода от научных работ поискового характера к регулярному детальному многодисциплинарному изучению загрязнения пластиком биотопов экосистем морей Арктики, северной части Тихого океана и Атлантики.

Представлены ключевые моменты и задачи научной Программы по оценке загрязнения вод и биологических ресурсов микропластиком в районах национального рыболовства в целях обеспечения пищевой безопасности и предотвращения возможных рисков антропогенного воздействия на экосистемы морей.

Подготовлены рекомендации по сбору, пробоподготовке, экстракции и идентификации частиц микропластика и волокон на основе опубликованных методик и полученных навыков экспедиционных и лабораторных исследований для получения объективных и сопоставимых оценок загрязнения биологических ресурсов и среды их обитания.

Сделано предположение о том, что отчасти пластиковое загрязнение морских экосистем может способствовать увеличению температуры поверхностного слоя отдельных участков морей Мирового океана, аккумулируя тепловую энергию в слоях их распространения.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность специалистам научных групп и членам экипажей НИС «Профессор Леванидов», барка «Седов», НИС «Вильнюс» за помощь в сборе образцов микропластика, ректору КГТУ В.А. Волкогону за помощь в организации научных наблюдений в период уникального арктического перехода барка «Седов» по Северному Морскому пути в 2020 г., генеральному директору НПО «ДЭКО» Г.А. Кантакову за техническую поддержку в обеспечении оборудованием при подготовке экспедиций в 2019–2021 гг. Мы также благодарим профессора, д. т. н. Я.Ю. Блиновскую (ДВФУ) за организацию и проведение идентификации образцов микропластика, а также анонимных рецензентов, сделавших много ценных замечаний.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «ВНИРО» по теме 8.2.8 «Прикладные научные исследования».

ЛИТЕРАТУРА

- Гордеев И.И., Шевляков В.А., Курносов Д.С., Пономарев С.С., Кожевников А.В., Чистякова Т.А., Безверхняя А.О., Жильцов А.Е., Свидерский В.А., Шейбак А.Ю. 2019. Траловая учётная съёмка тихоокеанских лососей на НИС «Профессор Кагановский» в Беринговом и Охотском морях (сентябрь–октябрь 2019 г.) // Труды ВНИРО. Т. 178. С. 200–205. DOI: 10.36038/2307–3497–2019–178–200–205.
- Зобков М.Б., Есюкова Е.Е. 2018. Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов // Океанология. Т. 58, № 1. С. 149–157. DOI: 10.7868/S0030157418010148.
- Казмирук В.Д. 2015. Микропластик в водных объектах: опасности и мониторинг // Проблемы управления водными и земельными ресурсами. Мат. межд. науч. форума. М.: РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2015. С. 247–256.
- Масленников С.И., Шукина Г.Ф., Назарец Ю.П. 2017. Микропластик в океане – новые проблемы морского природопользования // Рыбное хозяйство. № 3. С. 33–37.
- Никитин О.В., Латыпова В.З., Ашихмина Т.Я., Кузьмин Р.С., Насырова Е.И., Харипов И.И. 2020. Микроскопические частицы синтетических полимеров в пресноводных экосистемах: изученность и современное состояние // Теоретическая и прикладная экология. № 4. С. 216–222. DOI: 10.25750/1995–4301–2020–4–216–222
- Патин С.А. 2015. Антропогенное воздействие на морские экосистемы и биоресурсы: источники, последствия, проблемы // Труды ВНИРО. 2015. Т. 154. С. 85–104.
- Педченко А.П., Блиновская Я.Ю. 2020. Трансарктическая экспедиция ВНИРО: Результаты исследований микропластика в Арктических морях в 2019 г. // Инновационные научные исследования: теория, методология, практика. Мат. межд. науч.-практ. конф. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». Ч. 1. С. 203–205.
- Педченко А.П., Анциферов М.Ю., Губанищев М.А., Двинин М.Ю. 2021. Международная съёмка микропластика в Баренцевом море в 2021 году: первый опыт крупномасштабной количественной оценки // Тр. X Межд. науч.-практ. конф. «Морские исследования и образование (MARESEDU-2021)» Т. III (III). Тверь: ПолиПРЕСС. С. 336–340.
- Педченко А.П., Беляев В.А. 2021. Особенности загрязнения морским мусором и пластиком морей западной Арктики // Использование и охрана природных ресурсов в России. № 3 (167). С. 65–70.
- Педченко А.П., Блиновская Я.Ю., Гаврило М.В., Кантаков Г.А. 2021. Необходимость организационного развития и методической унификации количественных сборов и ана-

- лиза микропластика // Итоги экспедиционных исследований в 2020 году в Мировом океане и внутренних водах. Тез. док. всерос. науч. конф. Москва, 24–26 февраля 2021 г. Севастополь: ФИЦ МГИ. С. 127–130.
- Педченко А.П., Сомов А.А. 2021. Арктический переход барка «Седов» в августе-октябре 2020 г.: обзор результатов научных наблюдений // Труды ВНИРО. Т. 185. С. 163–171.
- Соколов Ю.И. 2020. Риски тотального пластикового загрязнения планеты // Проблемы анализа риска. Т. 17. № 3. С. 30–43. DOI: 10.32686/1812-5220-2020-17-3-30-43.
- Чубаренко И.П., Есюкова Е.Е., Хатмуллина Л.И., Лобчук О.И., Исаченко И.А., Буканова Т.В. 2021. Микропластик в морской среде. М.: Научный мир. 520 с.
- Bergmann M., Collard F., Fabres J., Gabrielsen W., Provencher J., Rochman C., Sebille E., Tekman M. 2022. Plastic pollution in the Arctic // *Nat. Rev. Earth Environ.* 3: 323–337. DOI: 10.1038/s43017-022-00279-8.
- Bråte I.L.N., Eidsvoll D.P., Steindal C.C., Thomas K.V. 2016. Plastic ingestion by Atlantic cod (*Gadus morhua*) from the Norwegian coast // *Mar. Pollut. Bull.* V. 112. 105–110.
- Burns E., Boxall A. 2018. Microplastics in the aquatic environment: Evidence for against adverse impacts and major knowledge gaps // *Environmental Toxicol. Chemistry* V. 37. 2776–2796. DOI: 10.1002/etc.4268.
- Cozar A., Martí E., Duarte C., García-de-Lomas J., van Sebille E., Ballatore T., Eguíluz V.M., González-Gordillo J.I., Pedrotti M.L., Echevarría F., Troublé R., Irigoien X. 2017. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation // *Sci. Adv.* 3 (4), e1600582. p. 1–8. DOI: 10.1126/sciadv.1600582.
- Egger M., Nijhof R., Quiros L., Leone G., Royer S.-J., McWhirter A.C., Kantakov G.A., Radchenko V.I., Pakhomov E.A., Hunt B.P.V., Lebreton L. 2020. A spatially variable scarcity of floating microplastics in the eastern North Pacific Ocean // *Environmental Research Letters*. 15. 114056 DOI: 10.1088/1748-9326/abbb4f.
- GESAMP. 2019. Guidelines for the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean / Kershaw P.J., Turra A., Galgani F. eds. (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP Vol. 99, 130 p.
- GESAMP. 2020. Proceedings of the GESAMP International Workshop on assessing the risks associated with plastics and microplastics in the marine environment / Kershaw P.J., Carney Almroth B., Villarrubia-Gómez P., Koelmans A.A., Gouin, T., eds. (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. to GESAMP No. 103, 68 pp.
- Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C., Thiel M. 2012. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification // *Environmental Science and Technology* 46,3060–3075. DOI: 10.1021/es2031505.
- ICES. 2022. Working Group on the Integrated Assessments of the Barents Sea (WGIBAR) // *ICES Scientific Reports*. 4:50. 235 pp. DOI: 10.17895/ices.pub.20051438.
- Isobe A., Uchida K., Tokai T., Iwasaki S. 2015. East Asian seas: a hot spot of pelagic microplastics // *Mar. Pollut. Bull.* 101, 618–623.
- Kang J.H., Kwon O.Y., Lee K.-W., Song Y.K., Shim W.J. 2015. Marine neustonic microplastics around the southeastern coast of Korea // *Mar. Pollut. Bull.* 96, 304–312.
- Kenyon K.W., Kridler E. 1969. Laysan Albatrosses swallow indigestible matter // *The Auk*. V. 86. 339–343.
- Lee B., Park M.G. 2022. Drifting marine plastics as new ecological habitats for harmful eukaryotic microbial communities in Jeju Strait, Korea // *Front. Mar. Sci.* 9:985756. DOI: 10.3389/fmars.2022.985756
- Liboiron M., Liboiron F., Wells E., Richárd N., Zahara A., Mather C., Bradshaw H., Murichi J. 2016. Low plastic ingestion rate in Atlantic cod (*Gadus morhua*) from Newfoundland destined for human consumption collected through citizen science methods // *Mar. Pollut. Bull.*, 113 (1–2): 428–437.
- Lusher A.L., Tirelli V., O'Connor I., Officer R., 2015. Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples // *Sci. Rep.* 5, 14947.
- Lusher A.L.; Hollman P.C.H.; Mendoza-Hill J.J. 2017. Microplastics in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No. 615. Rome, Italy. 140 pp.
- Setälä O., Magnusson K., Lehtiniemi M., Norénet F. 2016. Distribution and abundance of surface water microlitter in the Baltic Sea: A comparison of two sampling methods // *Mar. Poll. Bull.* V. 110. Iss. 1. P. 177–183. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.06.065
- Mu J., Zhang S., Qu L., Jin F., Fang C., Ma X., Zhang W., Wang J. 2019. Microplastics abundance and characteristics in surface waters from the Northwest Pacific, the Bering Sea, and the Chukchi Sea // *Mar. Poll. Bull.* V. 143. P. 58–65. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.04.023.
- Strand K.O., Huserbråten M., Dagestad K.-F., Mauritzen C., Grøsvik B.E., Nogueira L.A., Melsom A., Röhrs J. 2021. Potential sources of marine plastic from survey beaches in the Arctic and Northeast Atlantic // *Science of The Total Environment*, V. 790. 148009. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148009.
- UNEP. 2016. Marine plastic debris and microplastics – Global lesson and research to inspire action and guide policy change. United Nations Environment Programme, Nairobi. DOI: 10.13140/RG.2.2.30493.51687
- Van Sebille E., England M.N., Froyland G. 2012. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environmental Research Letter* 7, 044040. DOI: 10.1088/1748-9326/7/4/044040.
- Yakushev E., Gebruk A., Osadchiv A. Pakhomova S., Lusher A., Berezina A., Bavel B., Vorozheikina E., Chernykh D., Kolbasova G., Razgon I., Semiletov I. 2021. Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers // *Commun Earth Environ* 2, 23 (2021). DOI: 10.1038/s43247-021-00091-0.
- Zettler E.R., Mincer T.J., Amaral-Zettler L.A. 2013. Life in «Plastisphere»: Microbial Communities on Plastic Marine Debris // *Environmental Science and Technology* 47,7137–7146. DOI: 10.1021/es401288x.

- Zhao S., Zhu L., Wang T., Li D. 2014. Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze estuary system, China: first observations on occurrence, distribution // *Mar. Pol. Bull.* V. 86. P. 562–568.
- Wright S., Thompson R., Galloway T. 2013. Wright, Stephanie & Thompson, Richard & Galloway, Tamara. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review // *Environmental pollution* (Barking, Essex: 1987). 178. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.02.031.
- ### REFERENCES
- Gordeev I.I., Shevlyakov V.A., Kurnosov D.S., Ponomarev S.S., Kozhevnikov A.V., Chistyakova T.A., Bezverkhnaya A.O., Zhiltsov A.E., Svidersky V.A., Sheybak A. Yu. 2019. Trawl survey of Pacific salmon on the R/V «Professor Kaganovsky» in the Bering Sea and Okhotsk Sea (September–October 2019) // *Trudy VNIRO*. 2019.Vol. 178. DOI: 10.36038/2307–3497–2019–178–200–205. (In Russ.)
- Zobkov M.B., Yesyukova E.E. 2018. Microplastics in the marine environment: a review of methods for sampling, preparation and analysis of water samples, bottom sediments and coastal sediments // *Oceanology*. V. 58. No. 1. pp. 149–157. DOI: 10.7868/S0030157418010148. (In Russ.)
- Kazmiruk V.D. 2015. Microplastics in water bodies: hazards and monitoring // *Problems of water and land resources management. Materials of the International Scientific forum*. Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 2015. pp. 247–256. (In Russ.)
- Maslennikov S.I., Shchukina G.F., Nazaret Yu.P. 2017. Microplastics in the ocean – new problems of marine environmental management // *Fisheries*. No. 3. 2017. pp. 33–37. (In Russ.)
- Nikitin O.V., Latypova V.Z., Ashikhmina T. Ya., Kuzmin R.S., Nasyrova E.I., Kharipov I.I. 2020. Microscopic particles of synthetic polymers in freshwater ecosystems: study and current state// *Theoretical and applied ecology*. No. 4. pp. 216–222. DOI: 10.25750/1995–4301–2020–4–216–222. (In Russ.)
- Patin S.A. 2015. Anthropogenic impact on marine ecosystems and bioresources: sources, consequences, problems // *Proceedings of VNIRO*. 2015. Vol. 154. pp. 85–104. (In Russ.)
- Pedchenko A.P., Blinovskaya Ya. Yu. 2020. VNIRO Transarctic expedition: Results of microplastics research in the Arctic seas in 2019// *Innovative scientific research: theory, methodology, practice. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference*. Penza: ICNS “Science and Education”. 2020. Part 1. – p. 203–205. (In Russ.)
- Pedchenko A.P., Antsiferov M. Yu., Gubanishchev M.A., Dvinin M. Yu. 2021. International survey of microplastics in the Barents Sea in 2021: the first experience of large-scale quantitative assessment // *Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference “Marine Research and Education (MARESEDU-2021)” V. III (III): [collection]*. Tver: LLC “PoliPRESS”, 2021, pp. 336–340. (In Russ.)
- Pedchenko A.P., Belyaev V.A. 2021. Features of marine debris and plastic pollution of the seas of the Western Arctic // *Use and protection of natural resources in Russia*, № 3 (167)/2021. – pp. 65–70. (In Russ.)
- Pedchenko A.P., Blinovskaya Ya. Yu., Gavrilo M.V., Kantakov G.A. 2021. The need for organizational development and methodological unification of quantitative fees and analysis of microplastics // *Results of Field Research in the World Ocean and Internal Waters in 2020: abstracts of the All-Russian Scientific Conference*, Moscow, February 24–26, 2021 Sevastopol: FGBUN FIT MGI, 2021. pp. 127–130. (In Russ.)
- Pedchenko A.P., Somov A.A. 2021. Arctic passage of the Sedov barque in August–October 2020: a review of the results of scientific observations // *Proceedings of VNIRO*. Vol. 185. pp. 163–171. (In Russ.)
- Sokolov Yu.I. 2020. Risks of total plastic pollution of the planet // *Problems of risk analysis*. Vol. 17. 2020. No. 3. pp. 30–43, <https://doi.org/10.32686/1812–5220–2020–17–3–30–43>. (In Russ.)
- Chubarenko I.P., Yesyukova E.E., Khatmullina L.I., Lobchuk O.I., Isachenko I.A., Bukanova T.V. 2021. Microplastics in the marine environment. Moscow: Scientific World. 520 p.
- Bergmann M., Collard F., Fabres J., Gabrielsen W., Provencher J., Rochman C., Sebille E., Tekman M. 2022. Plastic pollution in the Arctic // *Nat. Rev. Earth Environ*. 3: 323–337. DOI: 10.1038/s43017–022–00279–8
- Bråte I.L.N., Eidsvoll D.P., Steindal C.C., Thomas K.V. 2016. Plastic ingestion by Atlantic cod (*Gadus morhua*) from the Norwegian coast // *Mar. Pollut. Bull.* V. 112. 105–110.
- Burns E., Boxall A. 2018. Microplastics in the aquatic environment: Evidence for against adverse impacts and major knowledge gaps // *Environmental Toxicol. Chemistry* V. 37. 2776–2796. DOI: 10.1002/etc.4268.
- Cozar A., Martí E., Duarte C., García-de-Lomas J., van Sebille E., Ballatore T., Eguíluz V.M., González-Gordillo J.I., Pedrotti M.L., Echevarría F., Troublè R., Irigoien X. 2017. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation // *Sci Adv* 3 (4), e1600582. p. 1–8. DOI: 10.1126/sciadv.1600582.
- Egger M., Nijhof R., Quiros L., Leone G., Royer S.-J., McWhirter A.C., Kantakov G.A., Radchenko V.I., Pakhomov E.A., Hunt B.P.V., Lebreton L. 2020. A spatially variable scarcity of floating microplastics in the eastern North Pacific Ocean // *Environmental Research Letters*. 15. 114056 DOI 10.1088/1748–9326/abbb4f.
- GESAMP. 2019. Guidelines for the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean / Kershaw P.J., Turra A., Galgani F. eds. (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP Vol. 99, 130 p.
- GESAMP. 2020. Proceedings of the GESAMP International Workshop on assessing the risks associated with plastics and microplastics in the marine environment / Kershaw P.J., Carney Almroth B., Villarrubia-Gómez P., Koelmans A.A., Gouin, T., eds. (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. to GESAMP No. 103, 68 pp.

- Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C., Thiel M. 2012. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification // *Environmental Science and Technology* 46,3060–3075. DOI: 10.1021/es2031505.
- ICES. 2022. Working Group on the Integrated Assessments of the Barents Sea (WGIBAR) // *ICES Scientific Reports*. 4:50. 235 pp. DOI: 10.17895/ices.pub.20051438.
- Isobe A., Uchida K., Tokai T., Iwasaki S. 2015. East Asian seas: a hot spot of pelagic microplastics // *Mar. Pollut. Bull.* 101, 618–623.
- Kang J.H., Kwon O.Y., Lee K.-W., Song Y.K., Shim W.J. 2015. Marine neustonic microplastics around the southeastern coast of Korea // *Mar. Pollut. Bull.* 96, 304–312.
- Kenyon K.W., Kridler E. 1969. Laysan Albatrosses swallow indigestible matter // *The Auk*. V. 86. 339–343.
- Lee B., Park M.G. 2022. Drifting marine plastics as new ecological habitats for harmful eukaryotic microbial communities in Jeju Strait, Korea // *Front. Mar. Sci.* 9:985756. DOI: 10.3389/fmars.2022.985756
- Liboiron M., Liboiron F., Wells E., Richárd N., Zahara A., Mather C., Bradshaw H., Murichi J. 2016. Low plastic ingestion rate in Atlantic cod (*Gadus morhua*) from Newfoundland destined for human consumption collected through citizen science methods // *Mar. Pollut. Bull.*, 113 (1–2): 428–437.
- Lusher A.L., Tirelli V., O'Connor I., Officer R., 2015. Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples // *Sci. Rep.* 5, 14947.
- Lusher A.L.; Hollman P.C.H.; Mendoza-Hill J.J. 2017. Microplastics in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*. No. 615. Rome, Italy. 140 pp.
- Setälä O., Magnusson K., Lehtiniemi M., Norénet F. 2016. Distribution and abundance of surface water microlitter in the Baltic Sea: A comparison of two sampling methods // *Mar. Poll. Bull.* V. 110. Iss. 1. P. 177–183. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.06.065
- Mu J., Zhang S., Qu L., Jin F., Fang C., Ma X., Zhang W., Wang J. 2019. Microplastics abundance and characteristics in surface waters from the Northwest Pacific, the Bering Sea, and the Chukchi Sea // *Mar. Poll. Bull.* V. 143. P. 58–65. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.04.023.
- Strand K.O., Huserbråten M., Dagestad K.-F., Mauritzen C., Grøsvik B.E., Nogueira L.A., Melsom A., Röhrs J. 2021. Potential sources of marine plastic from survey beaches in the Arctic and Northeast Atlantic // *Science of The Total Environment*, V. 790. 148009. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148009.
- UNEP. 2016. Marine plastic debris and microplastics – Global lesson and research to inspire action and guide policy change. United Nations Environment Programme, Nairobi. DOI: 10.13140/RG.2.2.30493.51687
- Van Sebille E., England M.N., Froyland G. 2012. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environmental Research Letter* 7, 044040. DOI: 10.1088/1748–9326/7/4/044040.
- Yakushev E., Gebruk A., Osadchiv A. Pakhomova S., Lusher A., Berezina A., Bavel B., Vorozheikina E., Chernykh D., Kolbasova G., Razgon I., Semiletov I. 2021. Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers // *Commun Earth Environ* 2, 23 (2021). DOI: 10.1038/s43247–021–00091–0.
- Zettler E.R., Mincer T.J., Amaral-Zettler L.A. 2013. Life in «Plastisphere»: Microbial Communities on Plastic Marine Debris // *Environmental Science and Technology* 47,7137–7146. DOI: 10.1021/es401288x.
- Zhao S., Zhu L., Wang T., Li D. 2014. Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze estuary system, China: first observations on occurrence, distribution // *Mar. Pollut. Bull.* 86, 562–568.
- Wright S., Thompson R., Galloway T. 2013. Wright, Stephanie & Thompson, Richard & Galloway, Tamara. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review // *Environmental pollution* (Barking, Essex: 1987). 178. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.02.031.

Поступила в редакцию 15.06.2023 г.
Принята после рецензии 22.06.2023 г.