

Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 691—711.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(69):691—711.

ЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК [551.46.09:504.42.054](268.252)(268.45)«2019»

doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-691-711

Микропластиковое загрязнение морской среды Баренцева и Карского морей в 2019 г.

***А. А. Ершова¹, Т. Р. Ерёмина¹,
И. Н. Макеева¹, Д. В. Панькин², Ю. А. Татаренко¹,
А. В. Березина³, А. С. Кузьмина¹***

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ),
Санкт-Петербург, Россия, ershova@rshu.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ)

³ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН

Аннотация. Исследование характеристик микропластиковых частиц в «подповерхностном» слое (4,5 м) Баренцева и Карского морей в 2019 г. по данным измерений в рамках программы ТРАНСАРКТИКА-2019 показало, что максимальное содержание антропогенных частиц, в том числе микропластика, характерно для Баренцева моря — до 28 шт/м³. Подтверждена барьерная роль архипелага Новая Земля в распространении частиц далее на северо-восток; минимальные концентрации зафиксированы в Карском море (1 шт/м³), с повышением значений до 4 шт/м³ в районе плюмов сибирских рек. Преобладают микроволокна (более 50 %), а также частицы с идентифицированными пигментами — размером более 500 мкм. Метод спектрометрии комбинационного рассеяния позволил идентифицировать все виды микроволокон и частиц антропогенного происхождения. Показана преобладающая роль местных источников загрязнения в формировании «шестого» мусорного пятна в Западной Арктике — жидкие и твердые отходы с рыболовецких и грузовых судов.

Ключевые слова: микропластик, морской мусор, Баренцево море, Карское море, Северный морской путь, загрязнение, «шестое» мусорное пятно.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSZU-2020-0009, тема «Исследование физических, химических и биологических процессов в атмосфере и гидросфере в условиях изменения климата и антропогенных воздействий». Съёмка спектров комбинационного рассеяния света была произведена в ресурсном центре «Оптические и лазерные методы анализа состава вещества» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета.

Для цитирования: Ершова А. А., Ерёмина Т. Р., Макеева И. Н., Панькин Д. В., Татаренко Ю. А., Березина А. В., Кузьмина А. С. Микропластиковое загрязнение морской среды Баренцева и Карского морей в 2019 г. // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 691—711. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-691-711.

© Ершова А. А., Ерёмина Т. Р., Макеева И. Н., Панькин Д. В., Татаренко Ю. А., Березина А. В., Кузьмина А. С., 2022

Original article

Microplastic contamination of marine environment of the Barents and Kara seas in 2019

*A. A. Ershova¹, T. R. Eremina¹, I. N. Makeeva¹, D. V. Pankin²,
Yu. A. Tatarenko¹, A. V. Berezina³, A. S. Kuzmina¹*

¹ Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg, Russia, ershova@rshu.ru

² St. Petersburg State University (SPbSU)

³ P. P. Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences

Summary. The content, morphological and chemical characteristics of microplastic particles in the “sub-surface” layer (4,5 m) of the Barents and Kara Seas in 2019 were studied according to field measurements within the framework of the TRANSARCTICA-2019 cruise. The maximum content of anthropogenic microparticles is typical for the Barents Sea, especially for its southern part — up to 28 items/m³, the barrier role of the Novaya Zemlya archipelago in the distribution of particles further to the northeast has been confirmed. The minimum concentrations were recorded in the Kara Sea (1 items/m³), while increased concentrations (up to 4 items/m³) were observed in the plume area of Siberian rivers. The composition of samples is dominated by microfibers (more than 50 %), as well as particles with identified pigments. The most numerous are particles larger than 500 microns. The use of the Raman spectrometry method made it possible to identify not only fragments, but also a significant amount of pigments inherent in particles of anthropogenic origin, thus, in all types of microfibers and anthropogenic particles were taken into account in the microplastics analysis. The most likely sources of plastic waste and microplastics entering the central and northern part of the Barents Sea and the reason for the formation of the so-called “sixth” garbage patch in the Western Arctic is various types of shipping activities (liquid and solid waste from fishing and cargo vessels) in the southern part of the Barents Sea, as well as the neighboring Norwegian Sea, and not the long-range transport of particles from remote densely populated regions of Europe in the North Atlantic, as previously thought.

Keywords: microplastics, marine litter, Barents Sea, Kara Sea, Northern Sea Route, pollution, “sixth” garbage patch.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FSZU-2020-0009, topic “Research of physical, chemical and biological processes in the atmosphere and hydrosphere under conditions of climate change and anthropogenic impacts”. The Raman spectra were recorded at the Optical and Laser Methods for Analyzing the Composition of Matter Resource Center of the Science Park of St. Petersburg State University.

For citation: Ershova A. A., Eremina T. R., Makeeva I. N., Pankin D. V., Tatarenko Yu. A., Berezina A. V., Kuzmina A. S. Microplastic contamination of marine environment of the Barents and Kara seas in 2019. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69):691—711. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-691-711. (In Russ.).

Введение

Загрязнение гидросферы пластиковым мусором и формирование «мусорных пятен» в океане стали одной из главных экологических проблем XXI века в связи с экспоненциальным ростом производства синтетических полимеров, используемых во всех отраслях промышленности [1]. Факторами попадания полимерных

отходов в моря и океаны являются судоходство и рыболовство, а также неправильное обращение с отходами на суше, что приводит к выносу реками значительного количества пластиковых отходов в океан. Пластиковые предметы и сети представляют значительную угрозу для морских организмов, а на морских открытых побережьях под воздействием УФ-излучения они быстро разрушаются и превращаются в микропластик (частицы менее 5 мм), который благодаря своим морфологическим и физико-химическим особенностям является потенциально высокоопасным токсикантом для живых организмов при попадании в пищевые цепи [2—4]. Ученые еще исследуют вопрос негативного влияния микропластика на здоровье человека, однако, уже достоверно установлено, что частицы микропластика попадают и в легкие, и в кровь человека, и даже в плаценту [5—8].

Исследования полярных регионов показали, что морская вода и побережья Арктики, несмотря на их значительную удаленность от густонаселенных районов планеты, в целом значительно загрязнены пластиковыми отходами и микропластиком [9], а Баренцево море названо местом формирования потенциального шестого мусорного пятна в Мировом океане [10]. Пластиковые отходы рыболовной отрасли (сети, ящики и др.) и бытовой мусор стали основным компонентом морского мусора в разные годы на побережьях архипелагов Баренцева моря (Новая Земля и Земля Франца Иосифа) [11—13]. Значительное количество плавающего пластикового мусора встречается на поверхности Баренцева моря в районах высокой транспортной нагрузки [13, 14], в частности была отмечена высокая вероятность нелегального сброса пластикового мусора с судов.

Значительное внимание исследователей в регионе Российской Арктики в последние годы уделяется частицам микропластика, в первую очередь в поверхностном и «подповерхностном» слое моря (0—5 м): в ходе нескольких арктических экспедиций установлен количественный и качественный состав микропластика, выявлены некоторые особенности его распространения, показана общая неравномерность в уровне загрязнения арктических морей [15—19]. Эти первые исследования показывают актуальность более детального исследования экосистемы Баренцева моря, где в целом отмечается значительно более высокое содержание микропластика в воде, чем в остальных районах Северного Ледовитого океана [15, 20].

Исследование загрязнения микропластиком граничащего с Баренцевым Карского моря также представляет большой интерес. Наблюдаемое в последние годы значительное увеличение морских перевозок по Северному морскому пути (СМП) становится причиной повышенной антропогенной нагрузки в этом регионе: объем грузоперевозок с 2011 по 2019 г. увеличился на 913 % [21], общее количество рейсов грузовых судов за 2019 г. составило 2694. В 2020—2021 гг. продолжалось увеличение грузоперевозок по СМП.

Вместе с тем, данные о содержании микропластика в водах Карского моря крайне скудны, а сведения об источниках поступления — противоречивы. В работе [16] на основе данных 2019 г. выявлено, что основными источниками загрязнения Карского моря являются атлантические воды и сибирские реки, причем влияние первых наиболее значительно. Показано наибольшее разнообразие

микроволокон в пределах речных плумов в Карском море, а микропластиковые частицы категории «фрагменты» характерны только для соленых морских вод. Также в работе [14] сделан вывод об отсутствии влияния речных плумов сибирских рек, как источников пластикового мусора в Карском море, что, по предположениям авторов, связано с осенним периодом наблюдений (маловодный период).

Целью данного исследования является анализ уровня загрязнения Баренцева и Карского морей микропластиком в 2019 г. по данным натурных измерений в рамках экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019, определение морфологических и физико-химических характеристик частиц микропластика и исследование пространственной картины их распространения.

Материалы и методы исследования

Основой настоящего исследования стали полевые данные, собранные авторами в рамках 4-го этапа экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019 (на НИС «Профессор Мультиановский») в летне-осенний период 2019 г. В ходе экспедиции в течение двух этапов (Владивосток—Мурманск и Мурманск—Владивосток) всего было отобрано 120 проб морской воды из подповерхностного горизонта (4,5 м) для определения содержания микропластика на всем протяжении СМП (рис. 1), первичный и выборочный анализ которых представлен в [17]. В настоящем исследовании проведен полный анализ всех образцов, отобранных в морях Западной Арктики — в Карском и Баренцевом морях в 2019 г.

Отбор проб воды для определения содержания микропластиковых частиц проводился с помощью разработанного коллективом авторов протокола отбора проб HydroPuMP. Он встроен в проточную систему судна и подробно описан в работах [17, 22]: морская вода фильтруется через металлический фильтр размером 100 мкм, объем профильтрованной морской воды — в среднем 1500 л на пробу. Лабораторный анализ проб проводился согласно принятым в международной практике подходам к обработке проб [23—25] в условиях «чистой лаборатории» (clean lab) — в лаборатории ПластикЛаб (РГГМУ), с обязательным контролем загрязнения на каждом этапе пробообработки и анализа. Он включал следующие этапы: мокрое просеивание, термохимическая обработка (реактив Фентона и др.) для растворения органического вещества (рис. 2), фильтрация и высушивание (этапы подробно описаны в [17]). С помощью стереомикроскопа Bresser (увеличение 40х) осуществлялась первичная визуальная идентификация, подсчет и категоризация микрочастиц (определение формы, размеров, цвета и типа частицы), а также отбор потенциальных частиц для полимерного анализа.

Исследование химического состава микрочастиц было проведено неразрушающим и бесконтактным оптическим методом — методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), Raman spectroscopy (англ.). Съемка спектров осуществлялась в геометрии обратного рассеяния (рассеяние назад) на спектрометре КРС Senterra (Bruker) в ресурсном центре «Оптические и лазерные методы исследования вещества» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета. Для возбуждения комбинационного рассеяния использовался

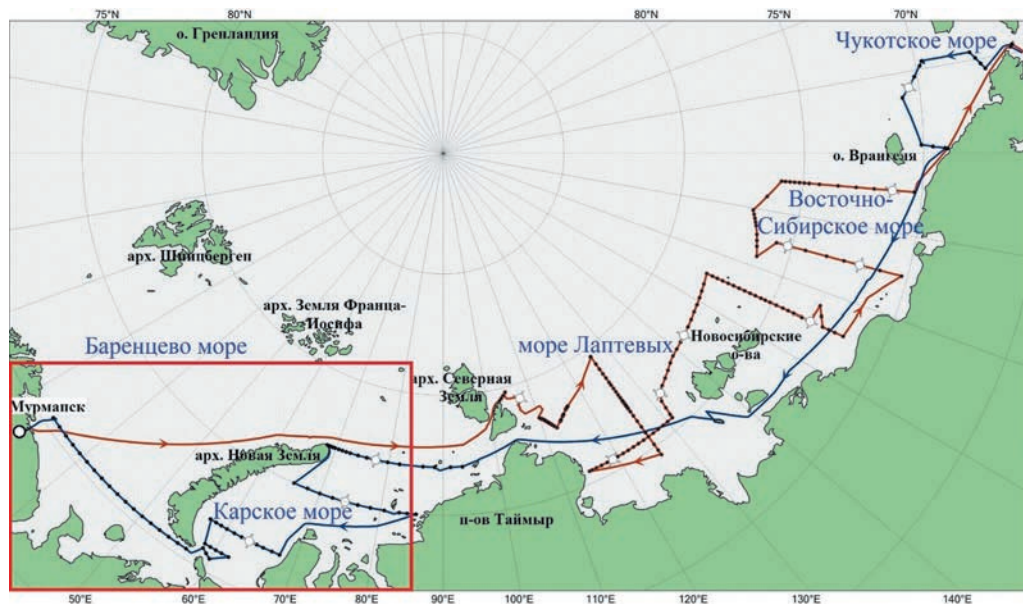


Рис. 1. Маршрут экспедиции в Северном Ледовитом океане в рамках 4-го этапа программы «ТРАНСАРКТИКА-2019» на НИС «Профессор Мультановский» в июле—октябре 2019 г.

Синий — путь из Владивостока в Мурманск 25.07.2019 г. — 07.09.2019 г.;
красный — путь из Мурманска в Владивосток — 08.09.2019 г. — 23.10.2019 г.
Выделенный красным — район настоящего исследования.

Fig. 1. The route of the expedition in the Arctic Ocean as part of the 4th stage of the TRANSARCTICA-2019 program on the R/V Professor Multanovsky in July—October 2019.

Blue — the route from Vladivostok to Murmansk 25.07.2019 — 07.09.2019 the route from Murmansk to Vladivostok — 08.09.2019 — 23.10.2019. The area of this study highlighted in red.

твердотельный лазер с длиной волны 785 нм. Фактическая мощность под 50х объективом с числовой апертурой 0,75 составляла от 0,06 до 1 мВт и для каждого образца подбиралась индивидуально в целях избежания возможной деструкции образца. Кроме того, в подавляющем большинстве случаев использование данного лазера, с длиной волны, принадлежащей ближнему ИК диапазону, позволяло существенно уменьшить люминесценцию в области полезного КРС сигнала по сравнению с использованием лазеров, с длиной волны, принадлежащей видимому диапазону. Время накопления составляло от 100 до 200 с, число повторов — 2. Для минимизации люминесценции от предметного стекла использовался конфокальный режим съемки с диаметром ирисовой конфокальной апертуры 50 мкм. Дополнительно для большей наглядности и возможности сравнения со спектрами из баз данных осуществлялось кусочно-линейное вычитание базовой линии. Идентификация веществ осуществлялась путем сравнения частот пиков полученных спектров с пиками в спектрах КРС веществ из баз данных.

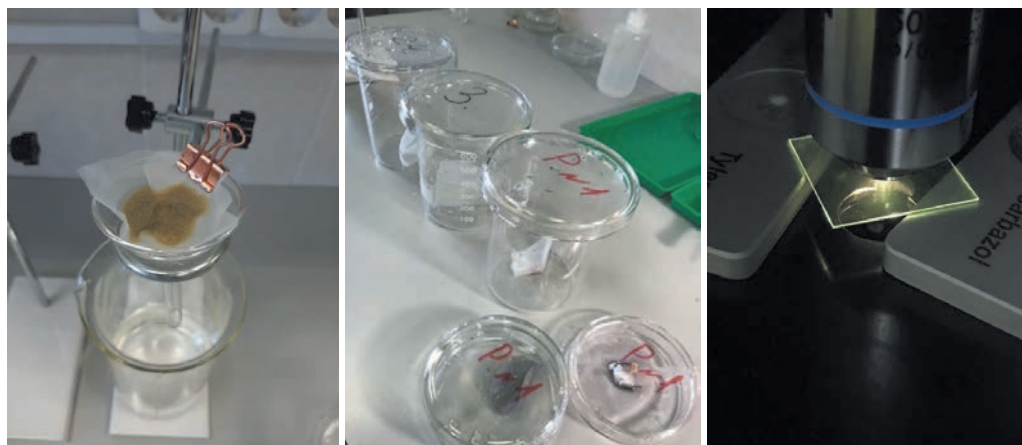


Рис. 2. Процесс лабораторной обработки проб в лаборатории ПластикЛаб РГГМУ и РЦ «Оптические и лазерные методы исследования вещества» СПбГУ (Петергоф, Рамановский спектрометр Senterra (Bruker)).

Fig. 2. The process of sample processing in the PlasticLab laboratory of the Russian State Hydrometeorological University and the Resource Center for Optical and Laser Methods for the Study of Matter, St. Petersburg State University (Peterhof, Raman spectrometer Senterra (Bruker)).

На рис. 2 справа демонстрируется образец под объективом, установленный на предметном столике спектрометра. Оптическая прозрачность покровных стекол, а также достаточное рабочее расстояние объектива позволяли сфокусироваться на образце, отсекая с помощью конфокальной апертуры существенную часть люминесценции покровных стекол, и получить на основании спектра КРС информацию о составе образца. На рис. 3 в качестве примера приводятся спектр КРС и фотография с микрочастицы волокна такого часто встречающегося вида пластика как полиэтилентерефталат (ПЕТ).

Исследовалось до 50 % частиц (образцов) из каждой пробы. Все частицы с идентифицируемыми промышленными пигментами рассматривались как вещества искусственного (антропогенного) происхождения и входили в общее число антропогенных полимерных частиц.

Результаты исследований

Для получения оценки содержания микропластика в воде Баренцева и Карского морей в 2019 г. были обработаны пробы с 16 станций — результаты представлены на рис. 4. Содержание антропогенных, в том числе микропластиковых частиц в поверхностном слое (4,5 м) в Баренцевом море варьирует от 0,7 до 28 шт./м³, среднее значение — 8 шт./м³. Концентрации частиц в Карском море варьируют от 1 до 4 шт./м³, среднее значение — 2,5 шт./м³.

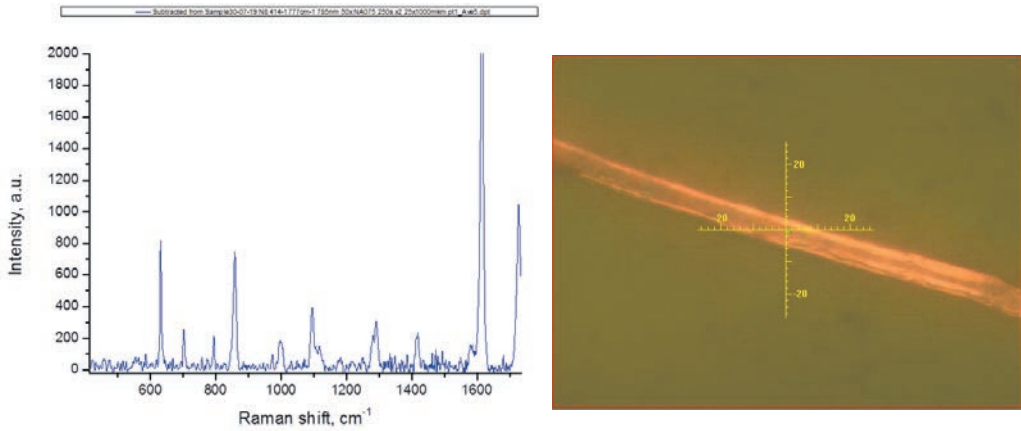


Рис. 3. Слева — пример спектра КРС частицы микропластика: полиэтилентерефталат (PET). Справа — соответствующая фотография частицы. Масштабная шкала приведена в микронах, перекрестью соответствует место съемки.

Fig. 3. Left — examples of Raman spectra of microplastic particles: polyethylene terephthalate PET, right — microparticle photo. Scale bar is shown in microns.

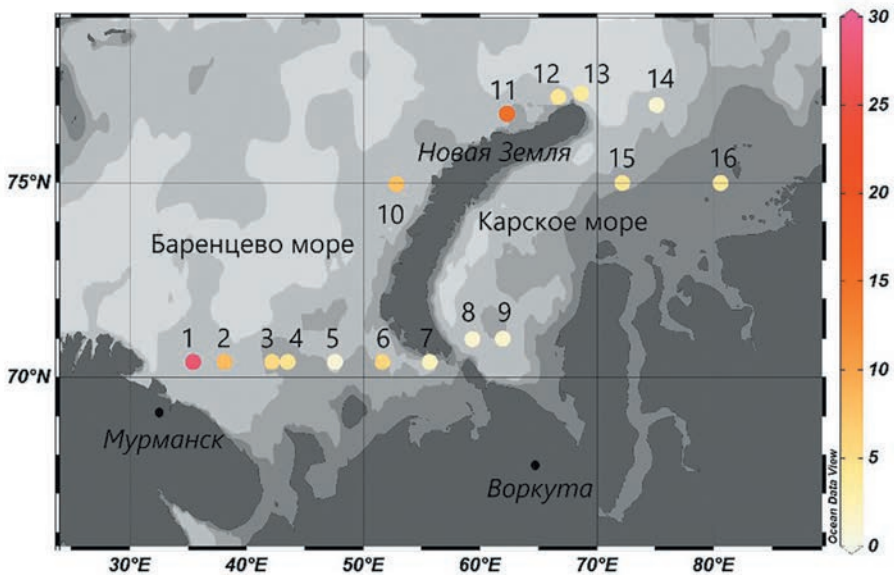


Рис. 4. Содержание антропогенных, в том числе микропластиковых частиц, шт./м³ в «подповерхностном» слое (4,5 м) в 2019 г. в Баренцевом и Карском морях.

Fig. 4. Abundance of anthropogenic, including microplastic particles, items/m³ in the “subsurface” layer (4,5 m) in 2019 in the Barents and Kara Seas.

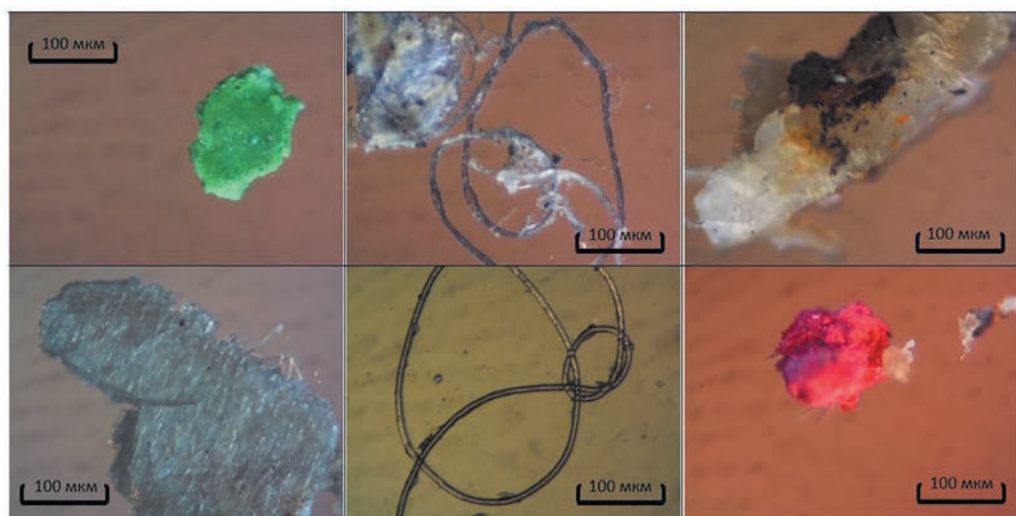


Рис. 5. Примеры частиц микропластика в поверхностных водах Баренцева и Карского морей в 2019 г.: фрагменты и волокна.

Fig. 5. Examples of microplastic particles in the surface waters of the Barents and Kara Seas in 2019: fragments and fibers.

Самая высокая концентрация микрочастиц — 28 шт./м³ была обнаружена на станции 1 вблизи порта Мурманск в южной части Баренцева моря. Самые низкие значения наблюдаются в Карском море (ст. 8, 9 и 14) — 1 шт./м³ (см. рис. 4). Измерения в Баренцевом море выполнялись на океанографическом разрезе (ст. 1—7), характерно уменьшение содержания микропластика с запада на восток в сторону Карских ворот.

Найдены микрочастицы разных форм, размеров и цветов (см. рис. 5), среди которых можно выделить наиболее часто встречающиеся нитевидные прозрачные волокна, присутствовавшие в каждой из проб, а также частицы белого, красного и черного цвета (рис. 6). Наибольшее разнообразие цветов и форм частиц характерно для Баренцева моря. Размер частиц варьировал от 100 до 2000 мкм, при этом наиболее многочисленными являются частицы размером более 500 мкм (см. рис. 6). Распределение микрочастиц по форме для двух морей различается незначительно (рис. 7): примерно половина всех найденных частиц составляют полимерные (или целлюлозные с пигментом) волокна, другая половина — фрагменты разнообразной неправильной формы (отсутствие микрогранул).

Идентификация частиц с помощью спектроскопии КРС позволила определить типы полимера, а также пигментов, которые позволяют идентифицировать частицу как синтетическую (антропогенного происхождения): более половины всех частиц содержат пигмент (рис. 8). Значительный вклад в общее содержание антропогенных частиц вносят микроволокна с определенным пигментом, что позволило отнести их к категории «антропогенные волокна» (например, вискоза).

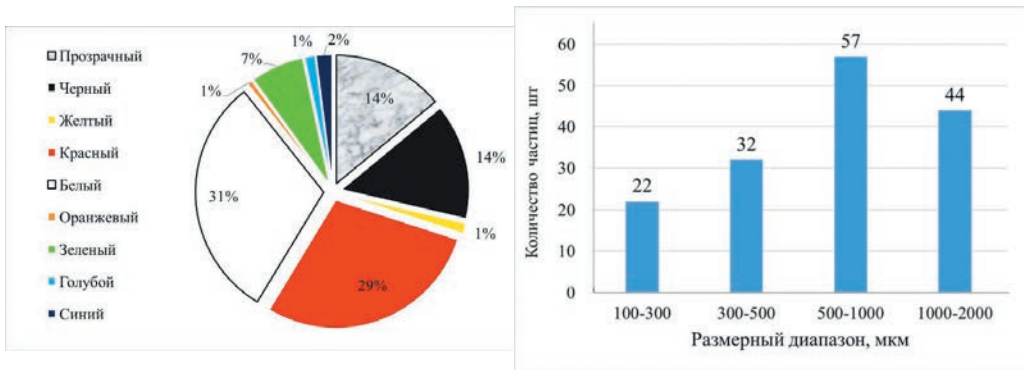


Рис. 6. Категоризация частиц микропластика, идентифицированных в пробах воды Баренцева и Карского морей в 2019 г.: слева — по цвету, справа — по размерному диапазону частиц.

Fig. 6. Categorization of microplastic particles identified in water samples of the Barents and Kara Seas in 2019: on the left — by color, on the right — by particle size range.

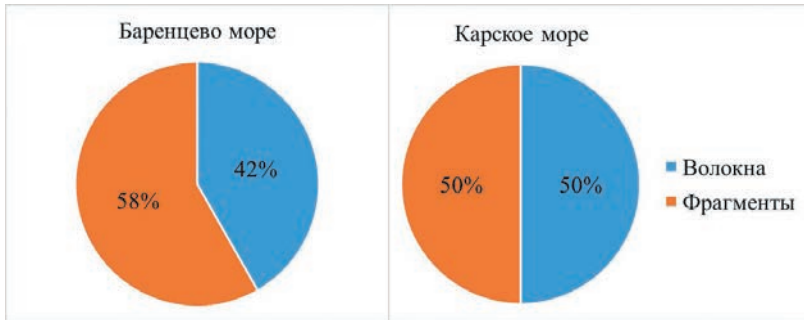


Рис. 7. Морфологический состав антропогенных частиц: волокна и фрагменты.

Fig. 7. Morphological composition of anthropogenic particles: fibers and fragments.

Около трети микрочастиц, найденных в пробах Баренцева моря, и 17 % — в Карском, — это полимеры типа полиэтилентерефталат (PET). Остальные типы полимеров представлены в небольших количествах, однако вызывает интерес значительное количество полимеров типа полилактид (PLA) в водах Карского моря, который является биоразлагаемым (экологичным) полимером, используемым как альтернатива традиционным синтетическим полимерам в быту, а также полиакрилонитрила (PAN) в Баренцевом море — компонента нитроновых волокон (заменитель шерсти). Среди прочих полимеров в обоих морях найдены полипропилен PP и полиэтилен PE.

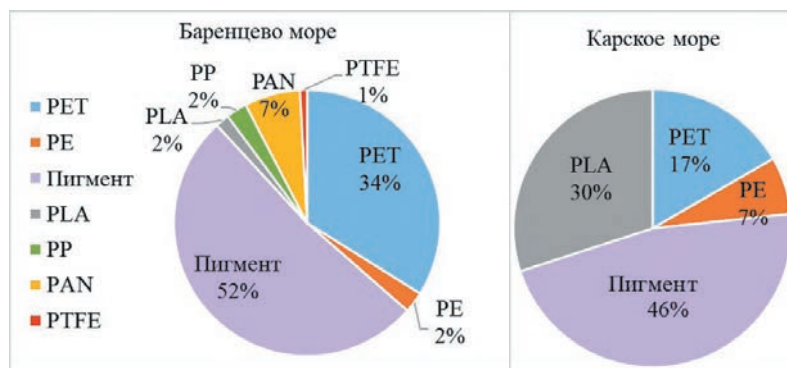


Рис. 8. Химический состав найденных синтетических микрочастиц в «подповерхностном» слое (4,5 м) Баренцева и Карского морей в 2019 г.

Fig. 8. Chemical composition of the found synthetic microparticles in the “subsurface” layer (4,5 m) of the Barents and Kara Seas in 2019.

Обсуждение результатов

Баренцево море занимает самое западное положение среди морей России и отличается от остальных морей Северного Ледовитого океана своим температурным режимом, так как круглый год происходит заток теплых Атлантических вод (годовой приток составляет примерно 74 тыс. км³ [26]), которые распространяются на северо- и юго-восток [27]. В период наблюдений в 2019 г. атлантические воды высокой солености 34 ‰ распространялись на юго-восток до Карских ворот, где соленость заметно снижалась до 32 ‰ в результате смешения с более пресными водами Карского моря, что соответствует типичному распределению солености поверхностных вод в этой акватории в позднелетний период (рис. 9).

Результаты исследования показали, что в 2019 г. в морях Западной Арктики максимальные концентрации антропогенных частиц наблюдаются в Баренцевом море — до 28 шт./м³, а минимальные — в Карском — 1 шт./м³, с многократной разницей максимальных и минимальных значений в данной акватории (см. рис. 4). Отмечено постепенное уменьшение содержания микропластиков на разрезе в южной части Баренцева моря с запада на восток (рис. 9 б): у Карских ворот концентрация немного возрастает, а потом снова падает при переходе в Карское море до минимальных значений (1 шт./м³).

В районе архипелага Новая Земля вдоль западной границы острова содержание микропластиков составляло от 7 до 15 шт./м³, однако на северной оконечности архипелага у мыса Желания микропластики в «подповерхностном» слое воды обнаруживались лишь в незначительном количестве (3—4 шт./м³).

Концентрация микропластиковых частиц в акватории Карского моря была минимальной в период наблюдений и менялась от 1 до 4 шт./м³, что, вероятно, свидетельствует об отсутствии влияния атлантических вод в этой части Арктики и в очередной раз подтверждает барьерную роль архипелага Новая Земля в распространении загрязнителей с поверхностными течениями из Северной Атлантики (см. рис. 10).

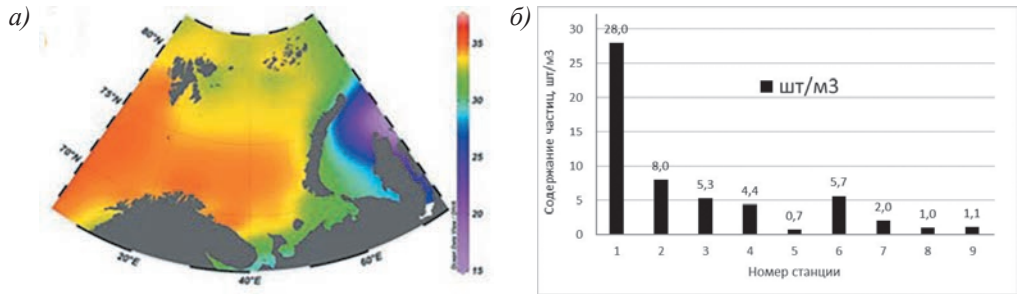


Рис. 9. Соленость воды Баренцева моря на горизонте 0 м в летний период по среднеголетним значениям (июль—сентябрь (а) [27] и содержание антропогенных микрочастиц, шт./м³ в подповерхностном слое (4,5 м) на океанографическом разрезе в южной части Баренцева моря в августе 2019 г. по данным экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019 (б).

Fig. 9. Salinity of surface layer in the Barents Sea in summer according to the long-term average values (July—September (a) [27] and the content of anthropogenic microparticles, items/m³ in the subsurface layer (4,5 m) on the oceanographic section in the southern part of the Barents Sea in August 2019 in TRANSARCTICA-2019 cruise (b).

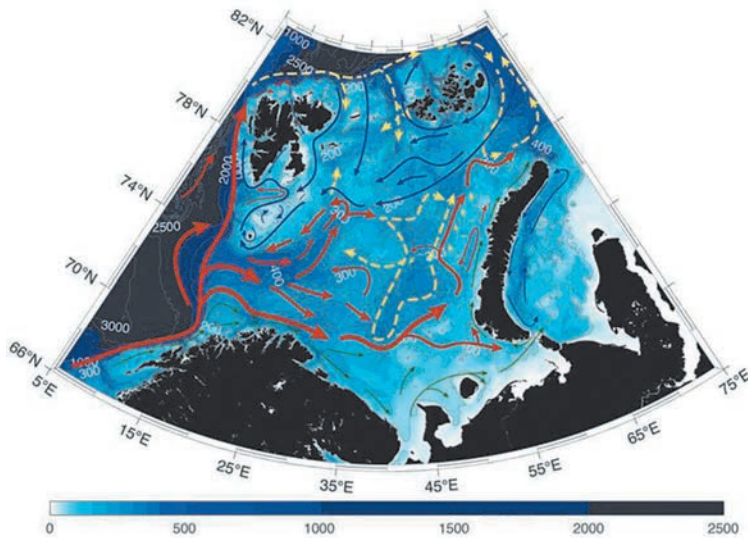


Рис. 10. Схема крупномасштабной циркуляции Баренцева моря в соответствии с [27].
Теплые течения — красные стрелки, холодные течения — синие стрелки, подповерхностные течения — пунктирные стрелки.

Fig. 10. Scheme of the large-scale circulation of the Barents Sea according to [27].
Warm currents — red arrows, cold currents — blue arrows, subsurface currents — dotted arrows.

Однако, повышение концентраций микрочастиц в районе плюмов сибирских рек — с 1 до 4 шт./м³ (станции 15 и 16) может быть связано с выносом частиц (в частности, волокон) с речным стоком. Данная теория впервые была высказана в работе [16] и находит подтверждение в настоящей работе.

Пространственное распределение микрочастиц, связанных с антропогенной деятельностью, идентифицированных в настоящем исследовании, в целом, характерно для рассматриваемой акватории. Баренцево и Карское моря отличаются от других морей СМП большим количеством транспортных путей и видов хозяйственной деятельности в связи со сложившимися климатическими благоприятными условиями для арктической навигации и реализации проектов освоения шельфа. Смещение кромки льда к северу и освобождение больших площадей морской акватории [28] предоставляет возможности расширения районов плавания в сторону высокоширотных путей и к северу от архипелага Новая Земля, что может вызвать значительное увеличение количества судов в акватории Баренцева и Карского морей в летние месяцы, а также расширение районов промысла, которые ограничиваются незамерзающей частью Баренцева моря.

При этом значительно отличаются по транспортной нагрузке северная и южная часть Баренцева моря (см. рис. 11). Всего по СМП в 2019 г. совершено 439 рейсов разной продолжительности (177 судов): из них большая часть — это район Карского моря и Обской губы на маршруте СМП до Мурманска и обратно, более половины (55 %) заходов всех судов на СМП в 2019 г. пришлось на порт Сабетта. При этом август является одним из наиболее активных месяцев в связи с благоприятными навигационными условиями. Таким образом, повышенные концентрации антропогенных микрочастиц, обнаруженные в Баренцевом море в 2019 г., могут быть объяснены, в первую очередь, высокой транспортной нагрузкой не только на СМП, но и в прилегающей акватории Норвежского моря: это предположение подтверждают находки частиц разнообразных форм и ярких

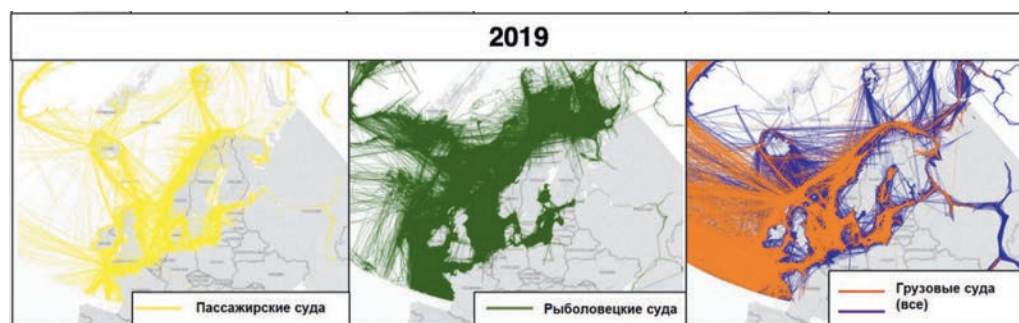


Рис. 11. Морские перевозки в 2019 г. в Баренцевом и Норвежском морях: пассажирские суда, рыболовецкие суда и общее число рейсов грузовых судов разного назначения (источник — база данных havbase.no).

Fig. 11. Marine traffic in 2019 in the Barents and Norwegian Seas: passenger ships, fishing vessels and total number of voyages of cargo ships (according to the havbase.no database).

цветов и наличие в них определяемых пигментов разного типа, присущих лакокрасочным материалам.

Исследования микропластика в рассматриваемой акватории Баренцева и Карского морей начаты всего несколько лет назад, и несмотря на отличие метода отбора проб (манта-трал [15] и нейстонная сеть [20]) и единиц измерения (шт./м²), пространственное распределение микропластика в поверхностных водах Баренцева и Карского морей первых авторов сравнимо с результатами настоящего исследования: наблюдаются схожие тенденции аккумуляции частиц в Баренцевом море напротив центральной части архипелага Новая Земля, а также повышенные концентрации микрочастиц в южной части Баренцева моря. Понижение концентраций наблюдается с продвижением на север, а минимальное содержание микрочастиц антропогенного происхождения зафиксировано в Карском море в 2015 г. [20], 2018 г. [15], а также и в 2019 г. (данное исследование).

Метод использования фильтровальных систем для отбора проб на микропластик применяется в настоящее время во многих международных исследованиях, в том числе как дополнение к другому широко используемому методу — отбор проб нейстонными (буксируемыми) сетями. Однако, результаты отбора проб этими двумя методами сложно сравнивать в связи с разными единицами измерения содержания микропластика в воде (шт. на м² или м³), а также разными размерными фракциями отбираемого микропластика. При отборе проб сетями количество частиц микропластика заведомо ниже (часто на 1—2 порядка), чем количество частиц, отбираемых фильтровальными системами, что было показано различными параллельными исследованиями, в том числе и в Арктической зоне [29—31].

Сравнение полученных разными исследователями в данном регионе концентраций микропластика с помощью метода фильтрации в «подповерхностном» слое воды (глубиной 4—5 м) приведено в табл. 1. В целом, значения, полученные в 2019 г. в рамках экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019, превышают концентрации микропластика, полученные другими исследователями в предыдущие годы. Однако, следует отметить, что в более ранних исследованиях в силу трудоемкости идентификации не учитывались волокна, как, например, в районе архипелага Шпицберген в Баренцевом море [29]. Микроволокна являются важнейшим компонентом микропластикового загрязнения морской среды как результат распада более крупных синтетических материалов (пластиковых сетей и текстильных отходов с судов), а также сбросов жидких бытовых отходов. По причине того, что волокна составляют более половины найденных синтетических микрочастиц в пробах (а иногда — большую часть в поверхностных слоях арктических вод [29]), концентрации микропластика значительно возрастают при их учете. Другой причиной более высоких концентраций антропогенных частиц, полученных в настоящем исследовании, вероятно, является учет всех частиц антропогенного происхождения, включая частицы с идентифицированным пигментом (благодаря методу спектрометрии КРС), что затруднительно при другом более распространенном методе идентификации с помощью ИК-Фурье спектрометрии.

Еще одним немаловажным фактором является выбор маршрута в исследуемой акватории. По сравнению с данными экспедиции ИО РАН [16], в рамках

которой использовались наиболее близкие настоящему исследованию методы отбора (проточной системой судна) в один и тот же период времени (позднелетний период 2019 г.), обнаруженное более высокое среднее содержание микрочастиц в Баренцевом море в рамках экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019 связано с обследованием не только южной, но и северной части Баренцева моря (район аккумуляции микропластика). А участники экспедиции ИО РАН на судне «Академик Мстислав Келдыш» [16] отбирали пробы только в южной части моря, где содержание микропластика значительно ниже.

Таблица 1

Концентрации микропластика (в шт./м³) в регионе Западной Арктики по данным современных исследований (использование только фильтровальных и проточных систем, ячейка менее 200 мкм, «подповерхностный» слой — глубина 4—5 м)

Microplastic concentrations (in items/m³) in the Western Arctic region according to modern research data (using only filtering and flow-through systems, cell size less than 200 microns, “subsurface” layer — 4—5 m)

Год наблюдений	Регион	Концентрация МП, шт./м ³		Авторы, ссылка
		Среднее знач.	Мин.—макс. знач.	
2005	Гренландское море	0,99		Amelineau, F. et al. 2016 [32]
2014		2,38		
2014	Баренцево море (арх. Шпицберген)	2,68	0—11,5	Lusher A. L. et al., 2015 [29]
2017	Центр. часть СЛО	0,7		Kanhai La Daana et al., 2018 [33]
2017	Гренландское море	2,4		Morgana S. et al., 2018 [34]
2019	Баренцево море	0,8		Yakushev E. et al., 2021 [16]
	Карское море	1,0		
2019—2020	Баренцево море	0,85	0—1,8	Pakhomova S. et al., 2022 [35]
2019	Баренцево море	8	0,7—28	Данное исследование (ТРАНСАРКТИКА-2019)
	Карское море (все антропогенные микрочастицы)	2,5	1—4	

Значительное количество определенных в ходе анализа пигментов говорит о загрязнении морской воды частицами отслаивающейся краски с судов. Данный вид полимерных частиц, в целом, характерен для морей с высокой транспортной нагрузкой. Однако загрязнение проб воды судном, с которого проводились измерения, маловероятно, в связи с проводимым контролем загрязнения: частицы данного типа встречались только в пробах, отобранных в Баренцевом море, и отсутствовали в пробах из других морей на маршруте экспедиции по СМП в 2019 г. (более 100 шт.).

Интересен полимерный состав идентифицированных в 2019 г. частиц: помимо полимеров традиционных типов (PET, PE, PP) найдено значительное количество частиц из полилактида (PLA), который применяется для производства экологически чистой биоразлагаемой упаковки, пакетов, одноразовой посуды. Найденный в пробах полиакрилонитрил (PAN) является компонентом нитроновых волокон,

которые используются главным образом как заменители шерсти при производстве ковров, искусственного меха, а также как теплоизоляционный материал.

Полиэтилентерефталат ПЕТ, доминирующий в составе микропластиковых частиц помимо пигментов, является одним из самых распространенных материалов для производства тары, пленки, упаковки, а также многих других используемых в быту материалов (текстиль, ремни, веревки и т.п.).

Отличительной особенностью полимерного состава найденных частиц является то, что это в основном полимеры высокой плотности – то есть с удельной плотностью больше $1,1 \text{ г/см}^3$ (PAN — $1,17$, PLA — $1,25$, PET — $1,38$). Частиц полимеров низкой плотности (PP и PE) было минимальное количество. Этот факт, скорее всего, говорит о недавнем попадании частиц в данную акваторию (со сточными водами проходящих судов).

Максимальное количество синтетических микрочастиц зафиксировано на подходе к порту Мурманск, что, возможно, связано с интенсивным судоходством в этой зоне, а также влиянием Нордкапского течения, которое переносит пластиковый мусор из Норвежского моря.

Заключение

Результаты исследования показали, что в 2019 г. в морях Западной Арктики максимальные концентрации микрочастиц антропогенного происхождения зафиксированы в Баренцевом море — до 28 шт./м^3 , а минимальные — в Карском, 1 шт./м^3 , с разницей максимальных и минимальных значений в данных морях в несколько раз. В составе проб преобладают микроволокна (более 50 %), а также волокна с идентифицированными пигментами. Наиболее многочисленными являются частицы размером более 500 мкм .

В ходе первых исследований содержания микропластика в морской воде в этой части Западной Арктики в 2018 г. [15] было показано значительное превышение содержания микропластика в поверхностном слое в Баренцевом море по сравнению с Карским, а по абсолютным показателям значения были сравнимы с центрами субтропических круговоротов. Результаты настоящего исследования, проведенного в 2019 г., подтверждают эту тенденцию: действительно наблюдаются значительные концентрации микропластика в поверхностных водах Баренцева моря в сравнении с Карским морем и морями Российской Арктики. У западных побережий архипелага Новая Земля концентрации микрочастиц превышают подобные концентрации, полученные для арктических морей [17], в 10—20 раз.

Исследование 2019 г. в рамках программы ТРАНСАРКТИКА-2019 подтвердило теорию аккумуляции микропластика в центральной части Баренцева моря в районе архипелага Новая Земля и барьерную роль архипелага в переносе загрязнителей в Карское море. Однако, преобладание более «тяжелых» частиц микропластика (с высокой удельной плотностью, более $1,15 \text{ г/см}^3$) говорит о том, что, скорее всего, источниками этих частиц являются стоки с проходящих судов, а не отдаленные источники из густонаселенных регионов Атлантики, как предполагалось ранее некоторыми авторами [10]. Обилие «тяжелых» частиц в поверхностном слое моря говорит, скорее, о том, что данные частицы появились в море совсем

недавно. Таким образом, механизмом поступления микропластика в центральную и северную часть Баренцева моря, в место их аккумуляции, или так называемое «шестое» мусорное пятно, следует считать теплые поверхностные течения, несущие пластиковые отходы из южной части Баренцева моря, а также из соседних акваторий морей (Норвежское и Северное). Не исключены источники на побережье, такие крупные порты как Мурманск, Архангельск, Сабетта, и поступление микропластика со стоком реки Северная Двина [36].

При этом важнейшим источником микропластика в данных акваториях следует рассматривать крупный пластиковый мусор, который аккумулируется на побережьях архипелага Новая Земля в результате выброса отходов с рыболовецких и грузовых судов и под влиянием интенсивного процесса фотоокисления достаточно быстро превращается в частицы микропластика, которые попадают в морскую среду Баренцева моря [13].

Области накопления микропластика в Карском море, поступающего с речным стоком, могут формироваться в маргинальных фильтрах эстуариев Оби и Енисея [37], областях лавинной седиментации, границы расположения которых меняются в зависимости от скорости оседания взвеси, скорости течения, а также режима смешения речной и морской воды (от наклона изогалин) [38]. В связи с этим, именно эти области требуют отдельного дальнейшего исследования путей распространения и накопления микропластика.

Приложение V к Конвенции МАРПОЛ и Лондонская конвенция, в целом, запрещают сброс мусора в море. Кроме того, § 27 Норвежского закона о борьбе с загрязнением запрещает удаление мусора как на суше, так и на море, а Норвежский закон о морских ресурсах запрещает сброс или оставление рыболовных снастей. Закон Шпицбергена об охране окружающей среды также запрещает сброс мусора с судов. Тем не менее, представленные данные подчеркивают, что действующего законодательства недостаточно для борьбы с загрязнением арктических экосистем. Это создает дополнительный стресс для арктической дикой природы, которая и без того испытывает сильное воздействие вследствие интенсивного потепления Северного Ледовитого океана.

Список источников

1. Plastics — the Facts 2021: [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/AF-Plastics-the-facts-2021_250122.pdf (дата обращения: 21.10.2022).
2. Frias J. P. G. L., Nash R. Microplastics: Finding a consensus on the definition // *Marine pollution bulletin*. 2019. Vol. 138. P. 145—147.
3. GESAMP Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment // *Reports and Studies* 90. 2015. 96 p.
4. Чубаренко И. П., Есюкова Е. Е., Хатмуллина Л. И., Лобчук О. И., Исаченко И. А., Буканова Т. В. Микропластик в морской среде. М.: Научный мир, 2021. 520 с.
5. Çobanoğlu H., Belivermiş M., Sıkdokur E., Kılıç Ö., Çayır, A. Genotoxic and cytotoxic effects of polyethylene microplastics on human peripheral blood lymphocytes // *Chemosphere*. 2021. Vol. 272: 129805. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129805.
6. Ragusa A., A. Svelato, C. Santacroce, P., Catalano P., Notarstefano V., Carnevali O., Papa F., Rongioletti M. C. A., Baiocco F., Draghi S., D'Amore E., Rinaldo D., Matta M., Giorgini E. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*. 2021. Vol. 146: 106274. doi: 10.1016/j.envint.2020.106274.

7. Rist S., Almroth B. C., Hartmann N. B., Karlsson T. M. A critical perspective on early communications concerning human health aspects of microplastics, *Science of The Total Environment*. 2018. Vol. 626. P. 720—726. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.092.
8. Wu D., Feng Y., Wang R., Jiang J., Guan Q., Yang X., Wei H., Xia Y., Luo Y. Pigment microparticles and microplastics found in human thrombi based on Raman spectral evidence // *Journal of Advanced Research*. 2022 (in press), doi: 10.1016/j.jare.2022.09.004.
9. Bergmann M., Collard F., Fabres J., Gabrielsen G. W., Provencher J. F., Rochman C. M., Sebille E. van, Tekman M. B. Plastic pollution in the Arctic // *Nat Rev Earth Environ*. 2022. Vol. 3. P. 323—337. doi: 10.1038/s43017-022-00279-8.
10. Sebille E. van, England M. H., Froyland G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters // *Environmental Research Letters*. 2012. Vol. 7: 044040.
11. Gavrilov M. Plastic pollution and seabirds in the Russian Arctic // *Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF)*. 2019. 125 p.
12. Vesman A., Moulin E., Egorova A., Zaikov K. Marine litter pollution on the Northern Island of the Novaya Zemlya archipelago. *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 150: 110671.
13. Ershova A., Vorotnichenko E., Kotelnikov V., Krutikov I. Marine litter accumulation patterns in the Russian part of the Barents Sea // MICRO 2022 conference (14—18 November 2022): [Электронный ресурс]. Режим доступа: sciencesconf.org/micro2022:427312.
14. Pogojeva M., Pogojeva M., Zhdanov I., Berezina A., Lapenkov A., Kosmach D., Osadchiev A., Hanke G., Semiletov I., Yakushev E. Distribution of floating marine macro-litter in relation to oceanographic characteristics in the Russian Arctic Seas // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 166: 112201.
15. Tošić N., Vrugink M., Vesman A. Microplastics quantification in surface waters of the Barents, Kara and White Seas // *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 161 (A): 111745. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111745.
16. Yakushev E., Gebruk A., Osadchiev A., Pakhomova S., Lusher A., Berezina A., van Bavel B., Vorozheikina E., Chernykh D., Kolbasova G., Razgon I., Semiletov I. Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers // *Commun. Earth Environ*. 2021. Vol. 2: 23. doi: 10.1038/s43247-021-00091-0.
17. Ершова А. А., Еремина Т. Р., Дунаев А. Л., Макеева И. Н., Татаренко Ю. А. Исследование загрязнения микропластиком морей российской Арктики и Дальнего Востока // *Арктика: экология и экономика*. 2021. № 11(2). С. 164—177. doi: 10.25283/2223-4594-2021-2-164-177.
18. Ershova A., Makeeva I., Malgina E., Sobolev N., Smolokurov A. Combining citizen and conventional science for microplastics monitoring in the White Sea basin (Russian Arctic) // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 173 (A): 112955. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112955.
19. Pakhomova S., Zhdanov I., van Bavel B. Polymer Type Identification of Marine Plastic Litter Using a Miniature Near-Infrared Spectrometer (MicroNIR) // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10 (23): 8707.
20. Cózar A., Martí E., Duarte C. M., García-de-Lomas J., van Sebille E., Ballatore T., Eguiluz V., González-Gordillo J. I., Pedrotti M., Echevarría F., Troublé R., Irigoien X. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation // *Science advances*. 2017. Vol. 3 (4). P. 1—8. doi: 10.1126/sciadv.1600582.
21. Nord University. Data Visualization. NSR navigation in 2019: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arctic-lio.com/main-results-of-nsr-navigation-2019/> (дата обращения: 21.10.2022).
22. Ершова А. А., Татаренко Ю. А. Протокол для определения содержания микропластика в морской воде (HydroPuMP). Патент на полезную модель 206110 U1, 24.08.2021. Заявка № 2020144043 от 28.12.2020.
23. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R., Thiel M. Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification // *Environmental Science & Technology*. 2012. Vol. 46 (6). P. 3060—3075. doi: 10.1021/es2031505.
24. AMAP Litter and Microplastics Monitoring Guidelines. Version 1.0. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway, 2021. 257 p.
25. Shim W., Hong S., Eo S. Identification methods in microplastic analysis: a review. *Analytical methods*. Royal Society of Chemistry. 2017. Vol. 9: 1384. doi: 10.1039/c6ay02558g.
26. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. *Моря СССР*. М.: МГУ, 1982. 254 с.

27. Писарев С. В. Обзор гидрологических условий Баренцева моря // Система Баренцева моря. М.: ГЕОС, 2021. 672 с. doi: 10.29006/978-5-6045110-0-8.
28. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Когда наступит безледный режим регионов Арктики? // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 56. С. 98—109.
29. 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. *Sci. Rep.* 2015. Vol. 5: 14947. doi: 10.1038/srep14947.
30. Rist S., Vianello A., Sichlau M. H., Winding M. H. S., Nielsen T. G., Almeda R., Torres R. R., Vollertsen J. Quantification of plankton-sized microplastics in a productive coastal Arctic marine ecosystem // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 266 (1): 115248. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115248.
31. Tekman M. B., Wekerle C., Lorenz C., Primpke S., Hasemann C., Gerdt G., Bergmann M. Tying up loose ends of microplastic pollution in the Arctic: distribution from the sea surface through the water column to deep-sea sediments at the HAUSGARTEN observatory // *Env. Sci. & Techn.* 2020. Vol. 54 (7). P. 4079—4090.
32. Amelineau F., Bonnet D., Heitz O., Mortreux V., Harding A. M. A., Karnovsky N., Walkusz W., Fort J., Grémillet D. Microplastic pollution in the Greenland Sea: background levels and selective contamination of planktivorous diving seabirds // *Environ. Pollut.* 2016. Vol. 219. P. 1131—1139. doi: 10.1016/j.envpol.2016.09.017.
33. Kanhai L. D., Gärdfeldt K., Lyashevskaya O., Hassellöv M., Thompson R. C., O'Connor I. Microplastics in sub-surface waters of the Arctic Central Basin // *Mar. Pollut. Bull.* 2018. Vol. 130. P. 8—18.
34. Morgana, S., Ghigliotti, L., Estévez-Calvar N., Stifanese R., Wieczorek A., Doyle T., Christiansen J. S., Faimali M., Garaventa F. Microplastics in the Arctic: a case study with sub-surface water and fish samples off Northeast Greenland // *Environ. Pollut.* 2018. Vol. 242. P. 1078—1086.
35. Pakhomova S., Berezina A., Lusher A. L., Zhdanov I., Silvestrova K., Zavialov P., van Bavel B., Yakushev E. Microplastic variability in subsurface water from the Arctic to Antarctica // *Environmental Pollution*. 2022. Vol. 298: 118808. doi: 10.1016/j.envpol.2022.118808.
36. Zhdanov I., Lohkov A., Belesov A., Kozhevnikov A., Pakhomova S., Berezina A., Frolova N., Kotova E., Leshchev A., Wang X., Zavialov P., Yakushev E. Assessment of seasonal variability of input of microplastics from the Northern Dvina River to the Arctic Ocean // *Marine Pollution Bulletin*. 2022. Vol. 175: 113370. doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113370.
37. Лисицын А. П. Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. № 5. С. 735—748.
38. Ерёмин Т. Р., Шипунова Е. А. Моделирование трансформации растворенного и взвешенного органического вещества в эстуарии реки Енисей // *Ученые записки РГГМУ*. 2019. № 57. С. 46—59. doi: 10.33933/2074-2762-2019-57-46-59.

References

1. Plastics — the Facts 2021. Available at: https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/AF-Plastics-the-facts-2021_250122.pdf (accessed on: 21.10.2022).
2. Frias J. P. G. L., Nash R. Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine pollution bulletin*. 2019;(138):145—147.
3. GESAMP Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. *Reports and Studies* 90. 2015: 96 p.
4. Chubarenko I. P., Esiukova E. E., Khatmullina L. I., Lobchuk O. I., Isachenko I. A., Bukanova T. V. *Mikroplastik v morskoi srede = Microplastics in the marine environment*. Moscow: Nauchny Mir, 2021. 520 p. (In Russ.).
5. Çobanoğlu H., Belivermiş M., Sıkdokur E., Kılıç Ö., Çayır A. Genotoxic and cytotoxic effects of polyethylene microplastics on human peripheral blood lymphocytes. *Chemosphere*. 2021;(272):129805. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129805.
6. Ragusa A., A. Svelato, C. Santacroce, P. Catalano P., Notarstefano V., Carnevali O., Papa F., Rongioletti M. C. A., Baiocco F., Draghi S., D'Amore E., Rinaldo D., Matta M., Giorgini E. Placententa: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*. 2021;(146):106274. doi: 10.1016/j.envint.2020.106274.

7. Rist S., Almroth B. C., Hartmann N. B., Karlsson T. M. A critical perspective on early communications concerning human health aspects of microplastics. *Science of The Total Environment*. 2018;(626):720—726. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.092.
8. Wu D., Feng Y., Wang R., Jiang J., Guan Q., Yang X., Wei H., Xia Y., Luo Y. Pigment microparticles and microplastics found in human thrombi based on Raman spectral evidence. *Journal of Advanced Research*. 2022 (in press). doi: 10.1016/j.jare.2022.09.004.
9. Bergmann M., Collard F., Fabres J., Gabrielsen G. W., Provencher J. F., Rochman C. M., Seville E. van, Tekman M. B. Plastic pollution in the Arctic. *Nat Rev Earth Environ*. 2022;(3):323—337. doi: 10.1038/s43017-022-00279-8.
10. Seville E. van, England M. H., Froyland G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environmental Research Letters* 2012;(7):044040.
11. Gavrilov M. Plastic pollution and seabirds in the Russian Arctic. *Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF)*. 2019: 125 p.
12. Vesman A., Moulin E., Egorova A., Zaikov K. Marine litter pollution on the Northern Island of the Novaya Zemlya archipelago. *Marine Pollution Bulletin*. 2020;(150):110671.
13. Ershova A., Vorotnichenko E., Kotelnikov V., Krutikov I. Marine litter accumulation patterns in the Russian part of the Barents Sea. MICRO 2022 conference (14—18 November 2022). Available at: sciencesconf.org:micro2022:427312.
14. Pogojeva M., Pogojeva M., Zhdanov I., Berezina A., Lapenkov A., Kosmach D., Osadchiev A., Hanke G., Semiletov I., Yakushev E. Distribution of floating marine macro-litter in relation to oceanographic characteristics in the Russian Arctic Seas. *Marine Pollution Bulletin*. 2021;(166):112201.
15. Tošić N., Vrugink M., Vesman A. Microplastics quantification in surface waters of the Barents, Kara and White Seas. *Marine Pollution Bulletin*. 2020;161(A):111745. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111745.
16. Yakushev E., Gebruk A., Osadchiev A., Pakhomova S., Lusher A., Berezina A., van Bavel B., Vorozheikina E., Chernykh D., Kolbasova G., Razgon I., Semiletov I. Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers. *Commun. Earth Environ*. 2021;(2):23. doi: 10.1038/s43247-021-00091-0.
17. Ershova A. A., Eremina T. R., Dunaev A. L., Makeeva I. N., Tatarenko Yu. A. Study of microplastic pollution in the seas of the Russian Arctic and the Far East. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economics*. 2021;11(2):164—177. doi: 10.25283/2223-4594-2021-2-164-177. (In Russ.).
18. Ershova A., Makeeva I., Malgina E., Sobolev N., Smolokurov A. Combining citizen and conventional science for microplastics monitoring in the White Sea basin (Russian Arctic). *Marine Pollution Bulletin*. 2021;173(A):112955. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112955.
19. Pakhomova S., Zhdanov I., Bavel B. van. Polymer Type Identification of Marine Plastic Litter Using a Miniature Near-Infrared Spectrometer (MicroNIR). *Applied Sciences*. 2020;10(23):8707.
20. Cózar A., Martí E., Duarte C. M., García-de-Lomas J., Seville E. van, Ballatore T., Eguiluz V., González-Gordillo J. I., Pedrotti M., Echevarría F., Troublé R., Irigoien X. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation. *Science advances*. 2017;3(4):1—8. doi: 10.1126/sciadv.1600582.
21. Nord University. Data Visualization: NSR navigation in 2019. Available at: <https://arctic-lio.com/main-results-of-nsr-navigation-2019> (accessed at: 21.10.2022).
22. Ershova A. A., Tatarenko Yu. A. *Probootbornik dlia opredeleniia sodержaniia mikroplastika v morskoi vode (HydroPuMP) Patent na poleznuuu model' 206110 U1, 24.08.2021. = Sampler for determining the content of microplastics in sea water (HydroPuMP). Utility model patent 206110 U1, 08/24/2021. Application No. 2020144043 dated 12/28/2020.*
23. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R., Thiel M. Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environmental Science & Technology*. 2012;46(6):3060—3075. doi: 10.1021/es2031505.
24. AMAP Litter and Microplastics Monitoring Guidelines. Version 1.0. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway. 2021: 257 p.
25. Shim W., Hong S., Eo S. Identification methods in microplastic analysis: a review. *Analytical methods. Royal Society of Chemistry*. 2017;(9):1384. doi: 10.1039/c6ay02558g.
26. Dobrovolsky A. D., Zalugin B. S. *Morya SSSR = Seas of the USSR*. Moscow: Moscow State University, 1982: 254 p. (In Russ.).

27. Pisarev S. V. Review of the hydrological conditions of the Barents Sea. *Sistema Barentseva moria = System of the Barents Sea*. Moscow: GEOS, 2021: 672 p. (In Russ.). doi: 10.29006/978-5-6045110-0-8.
28. Malinin V. N., Vainovsky P. A. When will the ice-free regime of the Arctic regions come? *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific papers of RSHU*. 2019;(56):98—109.
29. 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. *Sci. Rep.* 2015;(5):14947. doi: 10.1038/srep14947.
30. Rist S., Vianello A., Sichlau M. H., Winding M. H. S., Nielsen T. G., Almeda R., Torres R. R., Vollertsen J. Quantification of plankton-sized microplastics in a productive coastal Arctic marine ecosystem. *Environmental Pollution*. 2020;266(1):115248. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115248.
31. Tekman M. B., Wekerle C., Lorenz C., Primpke S., Hasemann C., Gerds G., Bergmann M. Tying up loose ends of microplastic pollution in the Arctic: distribution from the sea surface through the water column to deep-sea sediments at the HAUSGARTEN observatory. *Env. Sci. & Techn.* 2020;54(7):4079—4090.
32. Amelineau F., Bonnet D., Heitz O., Mortreux V., Harding A. M. A., Karnovsky N., Walkusz W., Fort J., Grémillet D. Microplastic pollution in the Greenland Sea: background levels and selective contamination of planktivorous diving seabirds. *Environ. Pollut.* 2016;(219):1131—1139. doi: 10.1016/j.envpol.2016.09.017.
33. Kanhai L. D., Gårdfeldt K., Lyashevskaya O., Hassellöv M., Thompson R. C., O'Connor I. Microplastics in sub-surface waters of the Arctic Central Basin. *Mar. Pollut. Bull.* 2018;(130):8—18.
34. Morgana, S., Ghigliotti, L., Estévez-Calvar N., Stifanese R., Wieckzorek A., Doyle T., Christiansen J. S., Faimali M., Garaventa F. Microplastics in the Arctic: a case study with sub-surface water and fish samples off Northeast Greenland. *Environ. Pollut.* 2018;(242):1078—1086.
35. Pakhomova S., Berezina A., Lusher A. L., Zhdanov I., Silvestrova K., Zavialov P., Bavel B. van, Yakushev E. Microplastic variability in subsurface water from the Arctic to Antarctica, *Environmental Pollution*. 2022;(298):118808. doi: 10.1016/j.envpol.2022.118808.
36. Zhdanov I., Lokhov A., Belesov A., Kozhevnikov A., Pakhomova S., Berezina A., Frolova N., Kotova E., Leshchev A., Wang X., Zavialov P., Yakushev E. Assessment of seasonal variability of input of microplastics from the Northern Dvina River to the Arctic Ocean, *Marine Pollution Bulletin*. 2022;(175):113370. doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113370.
37. Lisitsyn A. P. Marginal filter of the oceans. *Okeanologiya = Oceanology*. 1994;(5):735—748.
38. Eremina T. R., Shipunova E. A. Modeling of the transformation of dissolved and suspended organic matter in the estuary of the Yenisei River. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of RSHU*. 2019;(57):46—59. doi: 10.33933/2074-2762-2019-57-46-59.

Информация об авторах

Александра Александровна Ершова, канд. геогр. наук, доцент кафедры геоэкологии, природопользования и экологической безопасности, заведующая Лабораторией исследования пластикового загрязнения природной среды «ПластикЛаб», Российский государственный гидрометеорологический университет, ershova@rshu.ru.

Татьяна Рэмовна Ерёмкина, канд. физ.-мат. наук, доцент, директор Института гидрологии и океанологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, tanya.er@gmail.com.

Ирина Николаевна Макеева, магистрант Российского государственного гидрометеорологического университета, инженер Лаборатории исследования пластикового загрязнения природной среды «ПластикЛаб», zelsl@mail.ru.

Дмитрий Васильевич Панькин, канд. физ.-мат. наук, специалист по спектроскопии комбинационного рассеяния света ресурсного центра «Оптические и лазерные методы исследования вещества» Научного парка, Санкт-Петербургский государственный университет, dmitrii.pankin@spbu.ru.

Юрий Алексеевич Татаренко, ассистент кафедры океанологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, ugueeees@gmail.com.

Анфиса Владимировна Березина, научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, fisa4247@gmail.com.

Анастасия Сергеевна Кузьмина, аспирант Российского государственного гидрометеорологического университета, инженер Лаборатории исследования пластикового загрязнения природной среды «ПластикЛаб», kuzmina_a98@yahoo.com.

Information about authors

Alexandra A. Ershova, PhD (Geogr. Sci.), Associate Professor, Department of Geocology, Nature Management and Environmental Safety, Head of Laboratory for Plastic Pollution Research PlasticLab, Russian State Hydrometeorological University.

Tatyana R. Eremina, PhD (Phys.-Math. Sci.), Associate Professor, Director of the Institute of Hydrology and Oceanology, Russian State Hydrometeorological University.

Irina N. Makeeva, master student of the Russian State Hydrometeorological University; engineer in Laboratory for Plastic Pollution Research PlasticLab.

Dmitry V. Pankin, PhD (Phys.-Math. Sci.), specialist of Resource center “Optical and laser materials research” of Research Park of SPSU, St. Petersburg State University.

Yury A. Tatarenko, Assistant of the Department of Oceanology, Russian State Hydrometeorological University.

Anfisa V. Berezina, researcher, P. P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS.

Anastasia S. Kuzmina, post-graduate student of the Russian State Hydrometeorological University, engineer in Laboratory for Plastic Pollution Research PlasticLab.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 02.10.2022

Принята в печать 27.11.2022

The article was received on 02.10.2022

The article was accepted 27.11.2022