

Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 699—717.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(81):699—717.

Научная статья

УДК 502.51:504.5(985)«2023»

doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-699-717

Сравнительный анализ результатов учета морского мусора наземными и дистанционными (БПЛА) методами на побережье архипелага Новая Земля в 2023 г.

*Александра Александровна Ершова¹, Екатерина Андреевна Голубева¹,
Евгений Викторович Антонов², Елизавета Александровна Сердюкова³*

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, ПластикЛаб,
С.-Петербург, Россия, ershova@rshu.ru

² Институт географии РАН, Москва, Россия

³ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, С.-Петербург,
Россия

Аннотация. Представлены результаты полевых исследований 2023 г. по оценке загрязнения морским макромусором побережий архипелага Новая Земля и сравнение результатов учета двумя методами мониторинга: традиционного наземного (ручной сбор по протоколам OSPAR/AMAP) и дистанционного (аэрофотосъемка с БПЛА). На основе анализа данных с четырех ключевых участков побережья выявлены преимущества и ограничения каждого метода в арктических условиях. Установлено, что наземные методы обеспечивают точную оценку качественного состава макромусора, а дистанционные эффективны для картографирования крупных объектов и обследования обширных территорий. Результаты показывают целесообразность совместного применения методов для разработки протоколов экологического мониторинга в Арктике.

Ключевые слова: морской мусор, методы мониторинга побережья, БПЛА, протокол ОСПАР, Баренцево море, Арктика.

Благодарности: работа выполнена в рамках проекта Госзадания Минобрнауки РФ № FSZU-2023-0002 и программы «Арктический плавучий университет».

Для цитирования: Ершова А. А., Голубева Е. А., Антонов В. А. и др. Сравнительный анализ результатов учета морского мусора наземными и дистанционными (БПЛА) методами на побережье архипелага Новая Земля в 2023 г. // Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 699—717. doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-699-717.

Comparison of results of ground-based and remote (UAV) methods of marine debris monitoring on the coast of the Novaya Zemlya archipelago in 2023

*Alexandra A. Ershova¹, Ekaterina A. Golubeva¹,
Evgeniy V. Antonov², Elizaveta A. Serdyukova³*

¹ Russian State Hydrometeorological University, PlasticLab, St. Petersburg, Russia

² Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

Summary. The results of a comparison of methods for monitoring marine macrolitter pollution along the coasts of the Novaya Zemlya archipelago (Barents Sea) in 2023 are presented. These methods utilize ground-based methods (manual collection and classification according to OSPAR/AMAP protocols) and remote sensing methods — drone aerial photography followed by photogrammetric processing and visual interpretation of orthophotomaps. As in previous years of research, the highest marine litter density was observed along the coast of Cape Zhelaniya (on the Barents Sea side), with plastic waste from fishing and shipping dominating. The findings are consistent with the results of previous studies in this area. The most common litter categories were fishing nets, plastic buoys, and fragments of synthetic ropes. A comparative analysis of the methods demonstrated high representativeness of ground-based surveys for assessing the qualitative composition and sources of pollution, while the remote sensing method is effective for mapping large objects and surveying hard-to-reach coastlines and large areas in a short period of time. Thus, the methods demonstrate complementarity, covering different aspects of the monitoring task. In Arctic conditions, the use of UAVs significantly expands the monitoring timeframe, allowing surveys to be conducted during periods inaccessible for fieldwork. Operational limitations of UAV surveys related to flight altitude and resolution were identified. To increase data detail, it is advisable to combine general aerial views with targeted surveys of key areas at lower altitudes. These data can be used to create litter density maps and predict its distribution. This approach opens the possibility of prompt decision-making regarding the cleanup of the most polluted coastal areas.

Keywords: marine litter, monitoring, coastlines, UAVs, Barents Sea, Arctic.

Acknowledgments: This work was completed as part of the Russian Ministry of Education and Science's State Assignment Project No. «FSZU-2023-0002» and the Arctic Floating University program.

For citation: Ershova A. A., Golubeva E. A., Antonov E. V. et al. Comparison of results of ground-based and remote (UAV) methods of marine debris monitoring on the coast of the Novaya Zemlya archipelago in 2023. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(81):(699—717). doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-699-717. (In Russ.).

Введение

Загрязнение Мирового океана отходами человеческой деятельности стало одним из глобальных экологических вызовов современности. Пластик представляет значительную угрозу для морских организмов: животные, птицы и рыбы страдают от употребления в пищу крупных пластиковых частиц и запутывания в брошенных рыболовных снастях. Пластиковые предметы (макромусор) — предметы более 2,5 см [1] на побережьях под воздействием УФ-излучения и вследствие ветровой и волновой эрозии разрушаются и превращаются в микропластик (частицы менее 5 мм), который по своим морфологическим и физико-химическим

характеристикам является потенциально высокоопасным токсикантом для живых организмов при попадании в пищевую цепь [2, 3, 4].

Мировые исследования подчеркивают важность океанских побережий как резервуаров морского пластикового мусора [5] и пляжей как очагов накопления мусора [6], которые, согласно модельным оценкам, хранят около четверти всего океанского пластика [7]. Очевидно, отдаленные районы и острова также будут являться накопителями некоторого количества морского мусора [8]. Исследования полярных регионов показали, что морская вода и побережья, несмотря на значительную удаленность от густонаселенных частей планеты, тем не менее значительно загрязнены пластиковым мусором и микропластиком [9], а Баренцево море названо местом формирования потенциального «шестого мусорного пятна» в Мировом океане [10, 11]. Сообщается также о поедании пластика арктической фауной в арктических экосистемах [12, 13].

Данных о количественном и качественном составе морского мусора на арктических побережьях России до сих пор сравнительно мало, что связано, в первую очередь, с их труднодоступностью и дороговизной береговых исследований. Пластиковый мусор стал основным компонентом морского макромусора на побережьях баренцевоморских архипелагов (Новая Земля и Земля Франца-Иосифа) в 2018 г. [14], значительное количество плавающего пластикового мусора зарегистрировано на поверхности Баренцева моря в районах интенсивного движения судов [15]. Показано накопление мусора на дне Баренцева моря в районе Шпицбергена [16], а также на побережьях архипелагов Шпицберген [17] и Новая Земля [18]. При этом уровень загрязнения побережий этих двух удаленных арктических архипелагов остается одним из самых высоких в мире. Исследования подтвердили высокую вероятность нелегального сброса пластиковых отходов с рыболовецких и грузовых судов в этой части Баренцева региона.

Имеющихся данных прибрежных исследований в Арктике недостаточно для понимания тенденций накопления морского мусора в этой части земного шара, что связано, в первую очередь, со скучностью данных мониторинга в целом и несогласованностью методов, используемых различными исследовательскими группами. Традиционно учет морского макромусора ведется вручную с помощью наблюдателя, который фиксирует предметы мусора на поверхности моря или на побережье. И хотя методы с участием наблюдателя имеют множество преимуществ (например, точная идентификация предметов мусора, отсутствие проблем с зарядом батареи камеры или объемом памяти), альтернативные методы дистанционного зондирования способствуют получению более объективных и воспроизводимых результатов, а также возможности повторного использования и анализа записанных изображений в других исследованиях [19, 20].

Применение дистанционных методов особенно актуально для труднодоступных арктических районов. Основной задачей в таких регионах является не уборка мусора, а выявление источников его поступления с помощью БПЛА-съемки и других методов для разработки мер предотвращения загрязнения. В связи с этим целью данного исследования являлось сравнение данных, полученных методами наземного обследования (ручной сбор и идентификация) и дистанционной

съемки с БПЛА, для выработки оптимального подхода к оценке загрязненности арктических побережий морским макромусором и планированию мероприятий по его ликвидации, а также для разработки адаптированных арктических протоколов мониторинга.

Данные для исследования получены в результате проведения научно-образовательной экспедиции Арктического плавучего университета (АПУ) на научно-исследовательском судне «Профессор Молчанов» в период с 23 июня по 15 июля 2023 г.

Материалы и методы исследования

1. Ручной сбор и классификация морского мусора

Побережья архипелага Новая Земля являются местом регулярного мониторинга морского макромусора в регионе Баренцева моря в рамках экспедиций Арктического плавучего университета. В экспедиции АПУ 2023 г. группа мониторинга морского мусора осуществила три высадки на острове Северный архипелага Новая Земля: в Русской Гавани, на Мысе Желания и в Бухте Витней (Ледяной Гавани). Выбор исследуемых участков береговой линии осуществлен с учетом доступности пляжа, геоморфологических особенностей берега и сопоставимости с предыдущими годами мониторинга (2021 г. и 2022 г. [18]). На всех побережьях последовательно обследованы два или три полигона, что позволило провести ручной сбор и учет макромусора в общей сложности на семи участках длиной 100 м каждый, расположенных на пляжах с различной экспозицией и на разных сторонах острова Северный архипелага Новая Земля, т. е. со стороны Баренцева и Карского морей.

Исследования пляжей проводились в соответствии с международной методикой и рекомендациями для Северо-Атлантического региона ОСПАР и Арктической программы по мониторингу и оценке АМАП [21], которые предусматривают учет макромусора на полосе длиной 100 метров от уреза воды до линии штормового выброса (до 70 метров). Рекомендации АМАП разработаны для арктического региона для условий отсутствия растительности. Береговая линия должна быть доступна с суши или с лодки; крупные предметы мусора (более 50 см) могут быть перемещены вглубь суши, если транспортировка невозможна; исследования должны проводиться не реже одного раза в течение безледного сезона. Соблюдение единого протокола обеспечивает сопоставимость полученных результатов с данными других регионов и предыдущими результатами мониторинга.

Для получения качественной и количественной информации о загрязнении побережья предметы подсчитаны и взвешены согласно категориям (пластик, резина, текстиль, бумага, обработанное дерево, металл, стекло и неидентифицированные материалы) классификатора «Master List of Categories of Litter Items» [22], данные занесены в протоколы с координатами участка и параметрами, необходимыми для дальнейшего расчета плотности распределения морского мусора, а также метеоусловиями. Собранные предметы отсортированы по основным морфологическим признакам: по видам полимерной продукции (бутылки (PET), рыболовные сети и леска (PA, PE), пенопласт (PS), упаковка и емкости (HDPE,

PP) и другим материалам (металл, стекло, резина, обработанное дерево, текстиль, бумага/картон, прочее) согласно международному классификатору программы Рамочной директивы по морской стратегии (MSFD) [22], а также по размерности фракций и цвету. Кроме того, на данном этапе определены основные признаки происхождения собранных предметов по видам этикеток и другим признакам (форма предметов): рыболовство/судоходство и бытовые отходы.

2. Аэрофотосъёмка морских побережий с применением беспилотного летательного аппарата

В рамках экспедиции 2023 г. впервые проведено комплексное обследование береговой зоны с использованием беспилотного летательного аппарата. Получены снимки высокого разрешения всех обследованных побережий для дальнейшего дешифрирования и учета морского мусора, а также для сравнения с результатами ручного сбора, что создает принципиально новые возможности количественной оценки загрязнения береговой зоны. Ручной сбор производился после проведения полетов, в результате чего весь собранный мусор на стометровых участках был учтен на снимках. При этом за время проведения ручного сбора одного или двух участков по 100 м облет производился для всего пляжа, длина которого составляла до 1 км.

Съемка береговой части пляжей выполнена с использованием квадрокоптера DJI Mavic Air 2 (параметры кадра 4000 x 3000 пикселей) в надир, в один ряд вдоль берега, в ручном и автоматическом режиме (по заранее сформированному полетному плану) с формированием перекрытия кадров более 70 %.

В ходе первой аэрофотосъемки в бухте Русская Гавань сформировано полётное задание с использованием приложения «Litchi», предусматривающее автоматическую съемку с частотой 1 кадр в секунду при скорости полета 2 м/с. Анализ результатов съемки показал, что для морских пляжей, где положение уреза воды зависит от фазы прилива, предварительное планирование полёта оказывается сложным и малоэффективным. При однорядном методе съемки существует риск получения либо чрезмерно узкой полосы охвата с избыточным количеством снимков водной поверхности в fazu прилива, либо образованием слепых зон в fazu отлива. Этот риск особенно возрастает при съемке с небольших высот, где эффективная ширина полосы съемки составляет примерно 15—20 метров.

В связи с этим, автоматический режим полёта по предварительно заданному маршруту целесообразен только для мелкомасштабной съемки с широкой полосой охвата и значительным запасом по расположению береговой линии с учетом возможных изменений, вызванных приливно-отливными процессами. Для минимизации вышеуказанных рисков при съемке с относительно низких высот рекомендуется применять многорядный метод съемки.

Повторная аэрофотосъемка в бухте Русская Гавань проведена на высоте 20 м в ручном режиме с визуальным контролем положения береговой линии для обеспечения максимальной эффективной ширины полосы охвата при однорядном полёте. Все последующие съемки также выполнены в ручном режиме для достижения

оптимального качества и точности данных (табл. 1). На рис. 1 представлена схема расположения полигонов ручного сбора на территории Русской Гавани.

Таблица 1.

Параметры аэрофотосъёмки морских побережий архипелага Новая Земля с использованием БПЛА

Parameters of aerial photography of Novaya Zemlya archipelago coastline using UAVs

Место съёмки	Высота от места взлета, м	Количество снимков	Эффективная ширина съёмки, м	Протяженность участка, м
Русская Гавань	20	145	37—40	770
	40	269		
Бухта Витней (Ледяная гавань)	20	87	27	337
	50	133	61	
Мыс Желания, Баренцевоморская сторона	20	231	22	718
Мыс Желания, Карская сторона	15,5	217	16—24	720

Для последующего анализа пространственного распределения антропогенных объектов по материалам аэрофотосъемки проведена фотограмметрическая обработка изображений с использование пакета Agisoft Metashape Professional. Высокая степень перекрытия снимков позволяет получить цифровую модель местности, построить ортофотомозаику и проводить дешифрирование на предмет выявления морского мусора. Для этого на первом этапе выполнено выравнивание снимков по точкам перекрытия и определены параметры внутреннего и внешнего ориентирования для каждого кадра.

На основе плотного облака точек построена цифровая модель местности (ЦММ), представляющая собой регулярную сетку (растр), каждая ячейка которой содержит значение высоты исследуемой территории. Пример полученной ЦММ для побережья Мыса Желания со стороны Баренцева моря представлен на рис. 1.

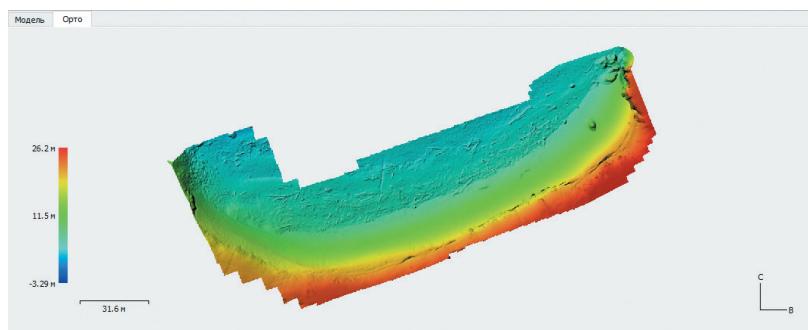


Рис. 1. Цифровая модель местности побережья Мыса Желания со стороны Баренцева моря (фрагмент).

Fig. 1. Digital model of the Cape Zhelaniya coastline area from the Barents Sea (fragment).

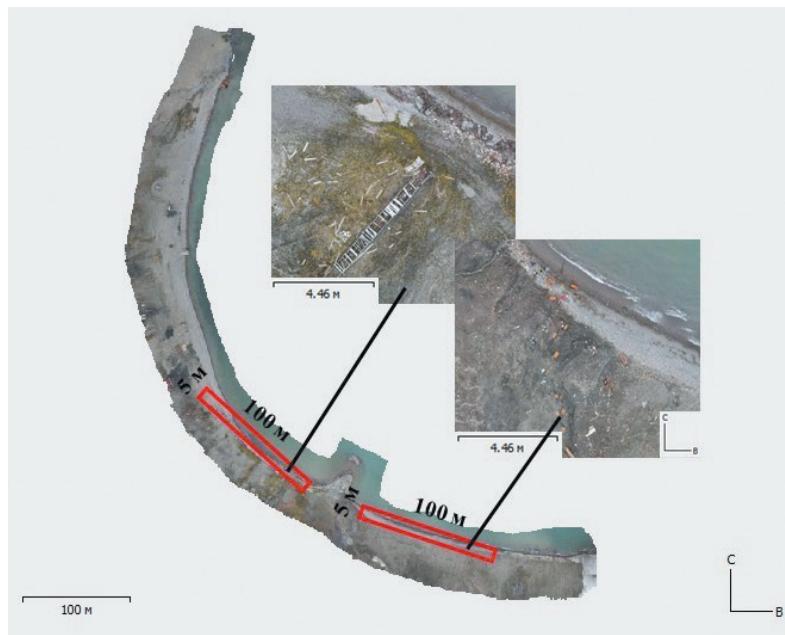


Рис. 2. Ортофотоплан побережья в Русской Гавани, построенный по снимкам с БПЛА (высота полета: 25—40 м) — граница полигона ручного сбора.

Fig. 2. Orthophotomap of the Russkaya Harbour coastline from UAV images (flight altitude is 25—40 m).

Заключительным этапом фотограмметрической обработки снимков является построение ортофотоплана — высокоточного планового изображения, полученного путем ортогонального проецирования исходных снимков на поверхность ЦММ. Пример итогового ортофотоплана для Русской Гавани и полигоны ручного сбора представлены на рис. 2.

3. Дешифрирование ортофотопланов

Дешифрирование ортофотопланов представляет собой процесс визуального анализа изображения с целью идентификации расположенных на нем объектов. В рамках данного исследования необходимо отличить морской мусор от объектов природного происхождения, таких как гравий, водоросли, вода и др. Для этого оператор проводит оценку по следующим признакам:

1. Спектральные характеристики: цвет и яркость объекта, позволяющие отличать материалы (например, зеленые полимерные сети, белые пенопластовые фрагменты, прозрачные пластиковые бутылки).

2. Морфологические признаки: форма, размер и пропорции объекта (линейные структуры — канаты и сети, изометричные — буи и емкости, фрагментированные — обломки).

3. Расположение объектов: взаимное расположение объектов, их приуроченность к элементам береговой линии (линии выброса).

Важным фактором достоверного определения предметов морского мусора является опыт работы с предметами пластикового мусора в реальных условиях Арктики, т. к. часто предметы белого и серого цвета могут быть при первом рассмотрении похожими на крупные камни и гравий.

Далее каждый объект относится к определенному классу в соответствии с классификатором морского мусора с присвоением атрибутов: тип материала (пластик, металл, дерево, стекло и др.), тип изделия (бутылка, сеть, веревка, упаковка, фрагмент и др.), размерная фракция (> 50 см, < 50 см). Для обеспечения сопоставимости данных при анализе снимков, полученных с разных высот, был установлен единый порог обнаружения в 50 см. Однако фактическое разрешение и минимальный размер обнаруживаемых объектов варьировались в зависимости от высоты съемки: с высоты 20 м идентифицировались объекты размером от 10 см, тогда как при съемке с 40—50 м надежно распознавались лишь объекты крупнее 40—50 см.

Примеры объектов, идентифицированных посредством визуального дешифрирования, представлены на рисунках 3 и 4.

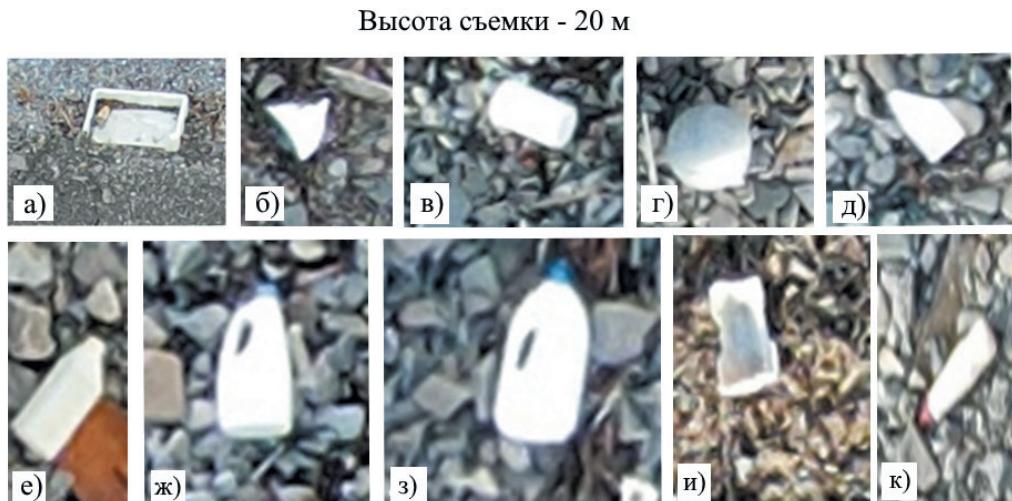


Рис. 3. Типы белого морского мусора, идентифицированного по снимкам с БПЛА:

- a) G57 Пластиковые ящики для рыбы или G79x Куски ящиков; б) и д) G79 Кусочки пластика 2,5 см — 50 см; в) G65 Ведро; г) G63 Буи; е), ж), з), и) и к) G9 Бутылки и контейнеры от чистящих средств. G — код классификатора морского мусора [22].

Fig. 3. Types of white marine debris identified from UAV images:

- a) G57 Fish boxes—plastic or G79x pieces of boxes; b) and d) G79 Plastic pieces 2.5 cm — 50 cm pieces; c) G65 Buckets; d) G63 Buoys; f), g), h), i) and j) G9 Cleaner bottles & containers.
G — marine litter classifier code [22].

Высота съемки - 20 м



Рис. 4. Типы цветного морского мусора, идентифицированного по снимкам с БПЛА:

- a) G57 Пластиковые ящики для рыбы или G79x Куски ящиков б) G63 Буи;
- б) G54 Сети, их части > 50 см; г), д) и л) G79 Кусочки пластика 2,5 см — 50 см;
- е) G9 Бутылки и контейнеры от чистящих средств; ж) и з) G8 Питьевые бутылки > 0,5 л;
- з) и) G65 Ведро; к) G49 Канат (диаметр больше 1 см). G — код классификатора морского мусора [22].

Fig. 4. Types of colored marine debris identified from UAV images:

- a) G57 Fish boxes-plastic or G79x pieces of boxes; b) G63 Buoys;
- c) G54 Nets and pieces of net > 50 cm; d), e) and k) G79 Plastic pieces 2.5 cm — 50 cm;
- f) G9 Cleaner bottles & containers; g) and h) G8 Drink bottles > 0.5 l; h) i) G65 Buckets;
- j) G49 Rope (diameter greater than 1 cm). G — marine litter classifier code [22].

Результаты исследований

1. Результаты ручного сбора морского мусора

По результатам полевого сбора морского мусора проведена количественная и качественная оценка морского мусора для каждого исследуемого побережья. В Русской Гавани в 2023 г. собрано в среднем 743 предмета морского мусора на 100 м. В составе мусора пластик составил 48 %. Данный участок характеризуется узкой полосой берега, где весь макромусор был сосредоточен в полосе шириной 5 м, что являлось исключением из общей закономерности распределения мусора на арктических побережьях. В Ледяной Гавани в бухте Витней собрано в среднем 178 предметов морского мусора на 100 м (полное отсутствие мусора на пятиметровой полосе у уреза воды), пластика — 40 % от общего количества мусора; преобладает обработанное дерево. На Мысе Желания, как и в предыдущие два года, исследовались два побережья: со стороны Карского моря собрано 659 предметов морского мусора, пластика — 33 %; со стороны Баренцева моря было собрано 608 предметов морского мусора, пластика — 64 %. На пятиметровой полосе у уреза воды не найдено ни одного предмета мусора. Подробные

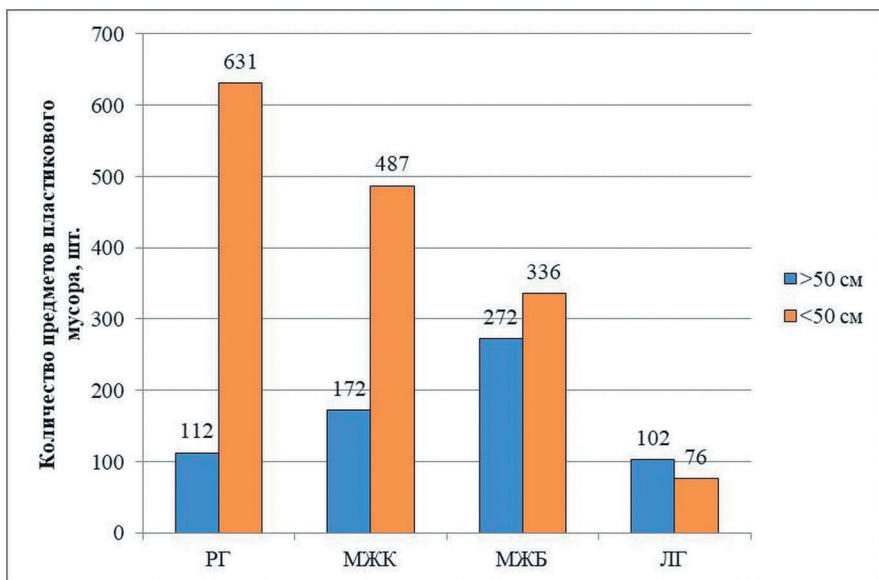


Рис. 5. Количество предметов пластикового мусора (шт. на 100 м пляжа), идентифицированных посредством ручного сбора в 2023 году на побережьях архипелага Новая Земля:

РГ — Русская гавань, МЖК — Мыс Желания Карское, МЖБ — Мыс Желания Баренцево,
ЛГ — Ледяная гавань.

Fig. 5. The number of plastic debris items (pcs) identified through manual collection in 2023 on the coasts of the Novaya Zemlya archipelago:

RG — Russkaya Harbour, MZH — Cape Zhelaniya (Barents Sea), MZK — Cape Zhelaniya (Kara Sea),
LG — Ledyanaya Harbour.

количественные и качественные характеристики собранных отходов в 2023 г. опубликованы в сборнике материалов конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU—2023)» [23].

Общее количество предметов пластикового макромусора (шт. на 100 м), идентифицированных посредством ручного сбора в 2023 г. и распределенных по категориям больше и меньше 50 см, приводится на рис. 5.

Во всех локациях, за исключением Ледяной Гавани, количество идентифицированных объектов мелкой фракции (< 50 см) превышает количество крупных объектов (> 50 см). Соотношение количества предметов (в %), идентифицированных посредством ручного сбора на всех исследуемых территориях, представлено на рис. 6.

В 2023 г. на пляжах Новой Земли были обнаружены различные виды пластиковых предметов, аналогичные тем, что фиксировались и в предыдущие годы исследований [18]. Среди наиболее распространенных находок выделяются фрагменты и обрезки рыболовных сетей, части ящиков для рыбы, крепежные ленты, куски канатов и веревок, а также разнообразные пластиковые емкости (ведра, корзины, бутылки от чистящих средств и контейнеры для пищевых продуктов),

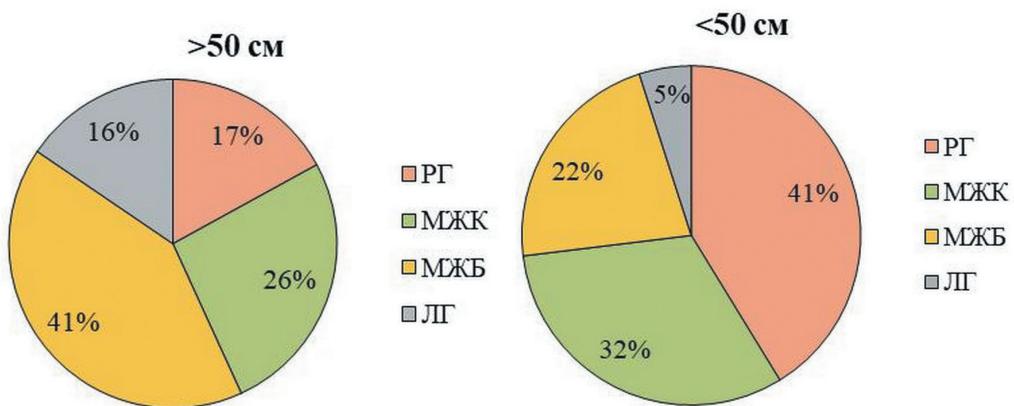


Рис. 6. Соотношение количества предметов морского мусора (%), идентифицированных посредством ручного сбора:

РГ — Русская гавань, МЖК — Мыс Желания Карское, МЖБ — Мыс Желания Баренцево,
ЛГ — Ледяная гавань.

Fig. 6. The ratio of the amount of marine litter items (%) identified manually:

RG — Russkaya Harbour, MZH — Cape Zhelaniya (Barents Sea), MZK — Cape Zhelaniya (Kara Sea),
LG — Ledyanaya Harbour.

крышки, патроны и мелкие фрагменты пластика. Для ряда предметов определено происхождение по внешним признакам (наклейки, вид продукции): Россия, Норвегия, Великобритания, Польша, Германия, Швеция.

Характерной особенностью распределения морского мусора на арктических побережьях является его аккумуляция в зонах штормовых выбросов, на значительном удалении от линии уреза воды (до 70 м). Это подтверждает несостоительность подхода некоторых исследователей, ограничивающих сбором мусора исключительно в 5 м от уреза воды: в активной приливно-отливной зоне, которая, как правило, остается свободной от значительного количества отходов, что также было отмечено в ходе съемок 2023 г. Следует отметить, что в отдельных случаях, как в Русской Гавани, особенности морфологии пляжа могут приводить к концентрированию макромусора в непосредственной близости от уреза воды. Однако такие случаи являются исключениями из выявленной общей закономерности аккумуляции мусора в зоне штормовых выбросов на арктических архипелагах [18].

2. Результаты дешифрирования снимков

Дешифрирование аэрофотоснимков, полученных с БПЛА, позволило провести количественную и качественную оценку загрязнения побережий архипелага Новая Земля дистанционным методом. Анализ зависимости возможностей дешифрирования от высоты съемки показал, что порог обнаружения объектов существенно отличается. При аэрофотосъемке с высоты 20 м обеспечивалось наилучшее разрешение, позволявшее уверенно идентифицировать контрастные и белые

объекты размером 10 см и менее, такие как пластиковые бутылки и их фрагменты. Съемка с высот 40—50 м позволяла распознавать только более крупные объекты (от 40—50 см), к которым относились рыболовные сети, ящики и буи.

Цветовая гамма хорошо различимых предметов мусора с БПЛА в порядке убывания — белый, синий, зеленый, желтый, оранжевый, красный, размер различных предметов от 25—20 см, при этом значительная часть неидентифицируемых типов предметов мусора является кусочками пластика менее 40—50 см.

Для оценки распределения морского макромусора на побережьях рассчитывалась также его плотность (шт./м^2) по данным ручного сбора и дешифрирования аэрофотоснимков. В целом, как и в предыдущие годы исследований [18], плотность морского макромусора выше на баренцевоморской стороне архипелага (рис. 7). По результатам визуального анализа ортофотопланов наибольшее

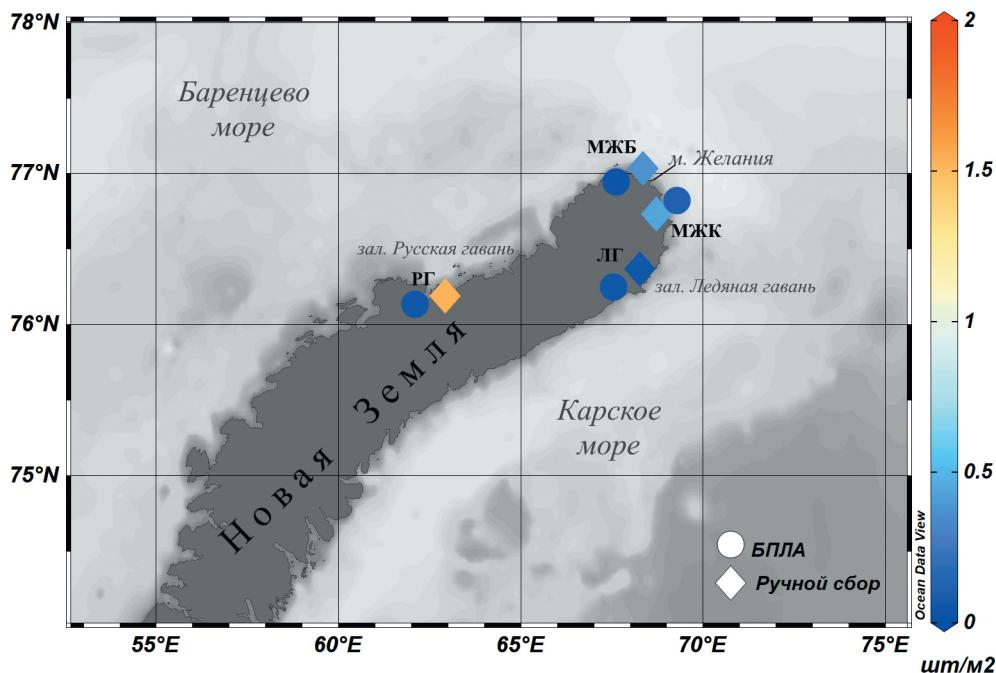


Рис. 7. Количественная оценка плотности распределения морского макромусора (шт./м^2), выполненная путем сравнения данных наземного ручного сбора и автоматизированного дешифрирования аэрофотоснимков с беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

РГ — Русская гавань, МЖК — Мыс Желания Карское, МЖБ — Мыс Желания Баренцево, ЛГ — Ледяная гавань.

Fig. 7. Quantitative assessment of the distribution density of marine debris (pcs/m^2), carried out by comparing data from ground-based manual collection and automated interpretation of aerial photographs from an unmanned aerial vehicle (UAV).

RG — Russkaya Harbour, MZH — Cape Zhelaniya (Barents Sea), MZK — Cape Zhelaniya (Kara Sea), LG — Ledyanaya Harbour.

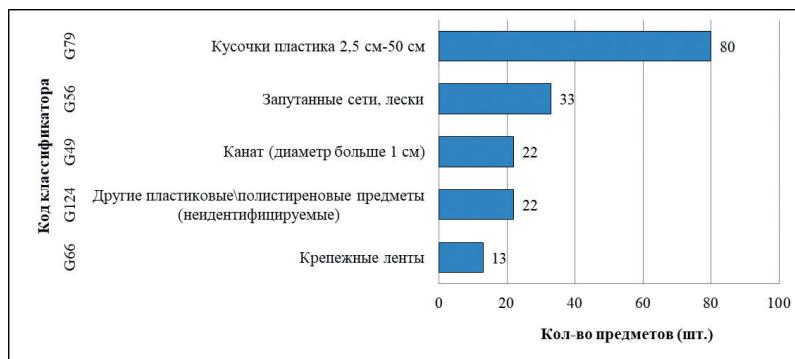


Рис. 8. Наиболее распространенные типы морского макромусора, идентифицированного по результатам аэрофотосъемки с БПЛА.

Fig. 8. The most common types of marine debris identified by aerial photography from UAVs.

количество морского макромусора зафиксировано на участке Мыса Желания со стороны Баренцева моря — 130 шт. Для данного участка характерно приблизительное равенство крупной (> 50 см) и мелкой (< 50 см) фракций, т. е. 63 шт. и 67 шт. соответственно, в то время как на участках Русской Гавани и Ледянной Гавани преобладали объекты меньшего размера. Расчет плотности загрязнения также подтвердил, что наиболее высокая нагрузка характерна для Мыса Желания со стороны Баренцева моря — $0,008$ шт./ m^2 , а наименьшие значения отмечены в Ледянной Гавани — $0,0001$ шт./ m^2 .

Качественный анализ демонстрирует преобладание отходов, связанных с морской хозяйственной деятельностью (судоходство, рыболовство): синтетические канаты, сети, пластиковые бутылки и емкости, а также деревянные и металлические обломки (рис. 8).

Обсуждение результатов

На основании представленной количественной оценки морского макромусора исследуемых побережий установлено общее количество пластиковых предметов, идентифицированных по снимкам с БПЛА и посредством ручного сбора (табл. 2).

Таблица 2

Общее количество предметов, идентифицированных по снимкам с БПЛА
и посредством ручного сбора

The total amount of waste identified from UAV images and manually

Размер	БПЛА, шт.				Ручной сбор, шт.			
	РГ	МЖК	МЖБ	ЛГ	РГ	МЖК	МЖБ	ЛГ
> 50 см	16	16	63	2	112	172	272	102
< 50 см	30	50	67	8	631	487	336	76

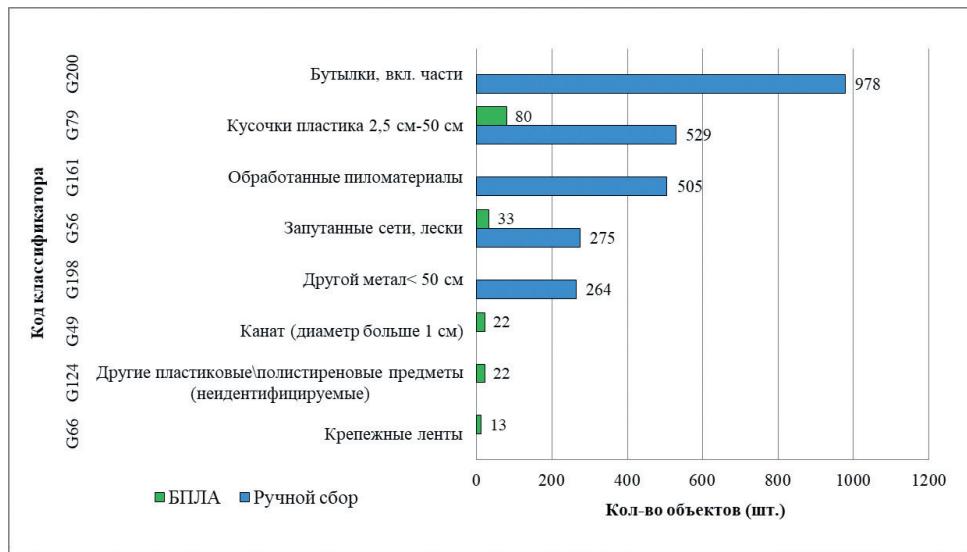


Рис. 9. Типы морского мусора, идентифицированного посредством ручного сбора и методом дешифрирования.

Fig. 9. Types of marine debris identified manually and by photo interpretation.

Посредством качественной оценки определены основные типы предметов, идентифицированных посредством ручного сбора и методом дешифрирования (рис. 9). Согласно результатам дешифрирования снимков БПЛА количество мусора на пляжах Новой Земли значительно отличается от результатов ручного сбора. Для корректного сравнения данных, полученных разными методами, все значения приведены к показателю плотности загрязнения ($\text{шт}/\text{м}^2$). По данным БПЛА-съемки, на побережье Русской гавани выявлена плотность загрязнения $0,002 \text{ шт}/\text{м}^2$ (46 предметов на участке длиной 770 м), при этом 91 % объектов возможно идентифицировать и классифицировать. На пляжах Мыса Желания со стороны Баренцева моря плотность составила $0,008 \text{ шт}/\text{м}^2$ (130 предметов на 718 м, идентификация 93 % предметов), со стороны Карского моря — $0,005 \text{ шт}/\text{м}^2$ (66 предметов на 720 м, идентификация 94 % предметов). В бухте Витней (Ледяная гавань) зафиксирована минимальная плотность $0,0001 \text{ шт}/\text{м}^2$ (10 предметов на 1339 м, идентификация 50 % предметов).

Таким образом, метод ручного сбора и классификации морского мусора позволяет более детально изучить морфологию объектов, их происхождение и материал, поэтому данным способом идентифицировано значительно большее количество объектов в сравнении с дешифрированием по снимкам с БПЛА, где хорошо различимы только крупные объекты: металлические бочки, цветные пластиковые бутылки, рыбные ящики, рыболовные сети и буи. В то же время именно эти категории предметов являются наиболее крупными и преобладают в количественных массовых характеристиках морского макромусора на побережьях в целом.

Очевидно, в условиях суровых климатических условий и труднодоступности арктических территорий, дистанционный метод дает преимущество с точки зрения понимания общей массы выброшенных морем на берег и накопленных пластиковых отходов, а значит — возможностей его уборки.

Проведенный анализ позволил установить ряд ограничений при дешифрировании ортофотопланов, полученных в результате аэрофотосъемки с БПЛА с целью обнаружения морского мусора. Ключевым фактором стала зависимость чувствительности метода от высоты съемки. Так, с высоты 25—40 м возможна детализация до уровня распознавания форм отдельных бутылок и средних фрагментов, в то время как с высоты 100 м идентификация возможна лишь для крупных, ярко окрашенных объектов сложной формы (ящики, канаты, сети).

Кроме того, можно установить ограничение по минимальному размеру распознаваемых объектов: для четко очерченных предметов (например, бутылок) он составляет около 30 см, для прочих фрагментов — не менее 50 см. При этом существует высокая вероятность ошибок интерпретации, когда белые фрагменты сложно отличить от камней, а пена от волн может быть ложно опознана как мусор, что требует обязательной верификации по серии соседних снимков, а также требует высокой практической квалификации оператора. В этой связи можно говорить о том, что существенным фактором, влияющим на достоверность распознавания, помимо размера, являются спектральные характеристики объектов, такие как цвет и яркость. С высокой долей вероятности идентифицируются предметы с четким геометрическим контуром (бутылки, ведра, ящики) и высокой цветовой контрастностью (ярко-цветные или белые).

Важным ограничением является узкая полоса обзора при низких высотах для достижения требуемой детализации. Например, съемка с высоты 25 м позволяет охватить полосу шириной не более 50 м, что обуславливает необходимость выполнения дополнительных параллельных маршрутов для обследования протяженных участков побережья. Высота 40 м представляет собой оптимальное значение за счет возможности сохранить приемлемую детализацию при одновременном охвате всей береговой полосы в одном пролете.

На основании проведенной серии съемок с использованием БПЛА можно привести следующие практические рекомендации:

— автоматическая съемка с использованием полетных планов затруднена в силу динамики береговой линии вследствие приливно-отливных явлений, особенно для низких высот;

— автоматическая съемка целесообразна при многорядной съемке на низких высотах и на протяженных участках;

— для съемки небольших по протяженности пляжей (до 1 км) рекомендуется применять БПЛА в ручном режиме пилотирования с полетом на минимальной высоте (15—20 м). Такой подход позволяет оперативно адаптироваться к конфигурации береговой линии и обеспечивает оптимальное качество аэрофотоснимков для последующей идентификации морского мусора;

— съемка на высоте 40—50 м и более не позволяет достоверно дешифрировать объекты менее 40—50 см.

Заключение

В рамках проведенных в 2023 г. исследований выполнен количественный и качественный учет морского мусора на ключевых участках побережья архипелага Новая Земля: Русской Гавани, Мысе Желания (включая Карское и Баренцево море) и Ледяной Гавани. Оценка накопления отходов на береговых территориях проведена посредством ручного сбора по международной методике ОСПАР и с помощью аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата дрона DJI Mavic Air 2, которая выполнена на данной территории впервые.

Наибольшее количество морского макромусора обнаружено на Мысе Желания со стороны Баренцева моря, при этом преобладающий тип отходов — пластик, преимущественно рыбохозяйственного происхождения. Проведенное сравнение с данными наземных исследований подтверждает, что визуальный анализ БПЛА-снимков позволяет эффективно распознавать крупные объекты (> 50 см), имеющие наибольшую массу (рыболовные сети, ящики, буи, бочки), но является недостаточно чувствительным методом для учета общего количества предметов, основная часть которого приходится на мелкоразмерные фракции (10—30 см). В то же время съемка с БПЛА позволяет охватить труднодоступные территории, где невозможно провести ручной сбор морского мусора, который является крайне трудо- и времязатратным методом учета макромусора.

Настоящее исследование выявило качественную зависимость эффективности дистанционного обнаружения от размера объекта и протяженности маршрута съемки. Вместе с тем, для количественной оценки «слепых зон» метода БПЛА необходимы дальнейшие исследования, включающие детальный анализ всего массива данных. Такой анализ должен быть направлен на определение доли объектов, остающихся «невидимыми» для аэрофотосъемки из-за малых размеров (менее 10—30 см), низкой цветовой контрастности (полупрозрачные, темные, сливающиеся с природными объектами) или сложной для автоматического распознавания формы.

Таким образом, оба метода являются взаимодополняемыми и их совместное применение целесообразно в качестве инструмента комплексной системы экологического мониторинга для условий Арктики, характеризующихся открытыми побережьями. Напротив, для береговых зон в более южных регионах, где макромусор аккумулируется в верхней полосе растительности, эффективность дистанционных методов существенно ограничена, что повышает значимость традиционных наземных обследований.

Разработка алгоритмов для автоматического обнаружения морского макромусора на аэрофотоснимках и упрощения аналитического процесса имеет решающее значение для успешного внедрения этих методов. В ходе дальнейших исследований с целью минимизации субъективности распознавания объектов на снимках дешифрирование будет проведено автоматизированным методом с применением алгоритмов машинного обучения.

Список литературы

1. Marine Litter, an analytical overview. United Nations Environment Programme. Nairobi. 2005. 47 p.
2. Frias J. P., Nash R. Microplastics: Finding a consensus on the definition // Marine Pollution Bulletin. 2019. Vol. 138. P. 145—147. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.11.022.

3. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. Reports and Studies. No. 90. 2015. 96 p.
4. Чубаренко И. П., Есюкова Е. Е., Хатмуллина Л. И. и др. Микропластик в морской среде. М.: Научный мир. 2021. 520 с.
5. Onink V., Jongedijk C. E., Hoffman M. J., et al. Global simulations of marine plastic transport show plastic trapping in coastal zones // Environmental Research Letters. 2021. Vol. 16 (Iss 6). P. 064053. DOI: 10.1088/1748-9326/abecbd.
6. Haarr M. L., Falk-Andersson J., Fabres J. Global marine litter research 2015—2020: Geographical and methodological trends // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 820. P. 153162. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153162.
7. Isobe A. and Iwasaki S. The fate of missing ocean plastics: Are they just a marine environmental problem? // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 825. P. 153935. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153935.
8. Lavers J. L., Bond A. L. Exceptional and rapid accumulation of anthropogenic debris on one of the world's most remote and pristine islands // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2017. Vol. 114. No. 23. P. 6052—6055. DOI: 10.1073/pnas.1619818114.
9. Bergmann M., Collard F., Fabres J. et al. Plastic pollution in the Arctic // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. Vol. 3. P. 323—337. DOI: 10.1038/s43017-022-00279-8.
10. van Sebille E., England M. H., Froyland G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters // Environmental Research Letters. 2012. Vol. 7. P. 044040. DOI: 10.1088/1748-9326/7/4/044040.
11. Ершова А. А., Ерёмина Т. Р., Макеева И. Н. и др. 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.
12. Gavrilov M. Plastic Pollution and Seabirds in the Russian Arctic, Workshop Report. 2019. Arctic Migratory Birds Initiative. Conservation of Arctic Flora and Fauna. Akureyri, Iceland. 2019. 23 p.
13. Collard F., Ask A. Plastic ingestion by Arctic fauna: A review // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 786. P. 147462. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147462.
14. Vesman A., Moulin E., Egorova A. et al. Marine litter pollution on the Northern Island of the Novaya Zemlya archipelago // Marine Pollution Bulletin. 2020. Vol. 150. P. 110671. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110671.
15. Pogojeva M., Zhdanov I., Berezina A. et al. Distribution of floating marine macro-litter in relation to oceanographic characteristics in the Russian Arctic Seas // Marine Pollution Bulletin. 2021. Vol. 166. P. 112201. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112201.
16. Parga Martínez K. B., Tekman M. B., Bergmann M. Temporal Trends in Marine Litter at Three Stations of the HAUSGARTEN Observatory in the Arctic Deep Sea // Frontiers in Marine Science. 2020. Vol. 7. P. 00321. DOI: 10.3389/fmars.2020.00321
17. Bergmann M., B. Lutz M. B. Tekman et al. Citizen scientists reveal: Marine litter pollutes Arctic beaches and affects wild life // Marine Pollution Bulletin. 2017. Vol. 125(1—2). P. 535—540. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.09.055.
18. Ershova A., Vorotnichenko E., Gordeeva S. et al. Beach litter composition, distribution patterns and annual budgets on Novaya Zemlya archipelago, Russian Arctic // Marine Pollution Bulletin. 2024. Vol. 204. P. 116517. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116517.
19. Garcia-Garin O., Monleón-Getino T., López-Brosa P. et al. Automatic detection and quantification of floating marine macro-litter in aerial images: Introducing a novel deep learning approach connected to a web application in R // Environmental Pollution. 2021. Vol. 273. P. 116490. DOI: 10.1016/j.enpol.2021.116490.
20. Лучников А. И. Современные тенденции применения БПЛА в исследовании природных сред. Анализ зарубежных публикаций // Гидрометеорология и экология. 2025. № 80. С. 530—546. doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-530-546.
21. Litter and Microplastics Monitoring Guidelines. Version 1.0. Arctic Monitoring and Assessment Programme. 2021. 257 p.
22. Technical Subgroup on Marine Litter. Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas. European Union. 2013. 128 p.

23. Ершова А. А., Антонов Е. В., Голубева Е. А. Применение БПЛА для мониторинга морского мусора на побережье архипелага Новая Земля в 2023 г / Морские исследования и образование (MARESEDU-2023): Труды XII Международной научно-практической конференции, Москва, 23—27 октября 2023 года. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2024. С. 562—566.

References

1. Marine Litter, an analytical overview. United Nations Environment Programme. Nairobi, 2005: 47 p.
2. Frias J. P., Nash R. Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*. 2019; (138): (145—147). DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.11.022.
3. 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. et al. *Mikroplastik v morskoy srede = Microplastics in the Marine Environment*. Moscow: Nauchny Mir. 2021: 520: p. (In Russ.).
5. Onink V., Jongedijk C. E., Hoffman M. J. et al. Global simulations of marine plastic transport show plastic trapping in coastal zones. *Environmental Research Letters*. 2021; 16 (6): 064053. DOI: 10.1088/1748-9326/abecbd.
6. Haarr M. L., Falk-Andersson J., Fabres J. Global marine litter research 2015–2020: Geographical and methodological trends. *Science of The Total Environment*. 2022; 820: 153162. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153162.
7. Isobe A., Iwasaki S. The fate of missing ocean plastics: Are they just a marine environmental problem? *Science of The Total Environment*. 2022; 825: 153935. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153935.
8. Lavers J. L., Bond A. L. Exceptional and rapid accumulation of anthropogenic debris on one of the world's most remote and pristine islands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017; 114 (23): 6052—6055. DOI: 10.1073/pnas.1619818114.
9. Bergmann M., Collard F., Fabres J. et al. Plastic pollution in the Arctic. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2022; 3: 323—337. DOI: 10.1038/s43017-022-00279-8.
10. van Sebille E., England M. H., Froyland G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environmental Research Letters*. 2012; 7: 044040. DOI: 10.1088/1748-9326/7/4/044040.
11. Ershova A. A., Eremina T. R., Makeeva I. N., et al. 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.).
12. Gavrilov M. Plastic Pollution and Seabirds in the Russian Arctic, Workshop Report. 2019. Arctic Migratory Birds Initiative. Conservation of Arctic Flora and Fauna. Akureyri, Iceland. 2019: 23 p.
13. Collard F., Ask A. Plastic ingestion by Arctic fauna: A review. *Science of The Total Environment*. 2021; 786: 147462. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147462.
14. Vesman A., Moulin E., Egorova A. et al. Marine litter pollution on the Northern Island of the Novaya Zemlya archipelago. *Marine Pollution Bulletin*. 2020; 150: 110671. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110671.
15. Pogojeva M., Zhdanov, I., Berezina, A. et al. Distribution of floating marine macro-litter in relation to oceanographic characteristics in the Russian Arctic Seas. *Marine Pollution Bulletin*. 2021; 166: 112201. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112201.
16. Parga Martínez K.B., Tekman M.B., Bergmann M. Temporal Trends in Marine Litter at Three Stations of the HAUSGARTEN Observatory in the Arctic Deep Sea. *Frontiers in Marine Science*. 2020; 7: 00321. DOI: 10.3389/fmars.2020.00321
17. Bergmann M., Lutz B., Tekman M.B. et al. Citizen scientists reveal: Marine litter pollutes Arctic beaches and affects wild life. *Marine Pollution Bulletin*. 2017; 125 (1—2): 535—540. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.09.055.
18. Ershova A., Vorotnichenko E., Gordeeva S. et al. Beach litter composition, distribution patterns and annual budgets on Novaya Zemlya archipelago, Russian Arctic. *Marine Pollution Bulletin*. 2024; 204: 116517. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116517.
19. Garcia-Garin O., Monleón-Getino T., López-Brosa P. et al. Automatic detection and quantification of floating marine macro-litter in aerial images: Introducing a novel deep learning approach

- connected to a web application in R. *Environmental Pollution*. 2021; 273: 116490. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116490.
- 20. Luchnikov A. I. Current trends in the use of UAVs in the study of natural environments. Analysis of foreign publications. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(80):(530—546). DOI: 10.33933/2713-3001-2025-80-530-546. (In Russ.).
 - 21. Litter and Microplastics Monitoring Guidelines. Version 1.0. Arctic Monitoring and Assessment Programme. 2021: 257.
 - 22. Technical Subgroup on Marine Litter. Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas. European Union. 2013: 128 p.
 - 23. Ershova A. A., Antonov E. V., Golubeva E. A. Application of UAVs for monitoring marine debris on the coast of the Novaya Zemlya archipelago in 2023. *Marine Research and Education (MARE-SEDU-2023): Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference*, Moscow, October 23—27, 2023. Tver: PoliPRESS LLC, 2024. (562—566). (In Russ.).

Информация об авторах

Ершова Александра Александровна, кандидат географических наук, доцент кафедры геоэкологии, природопользования и экологической безопасности, заведующий Лабораторией исследования пластикового загрязнения природной среды ПластикЛаб, Российский государственный гидрометеорологический университет, ershova@rshu.ru.

Голубева Екатерина Андреевна, аспирант кафедры геоэкологии, природопользования и экологической безопасности Российского государственного гидрометеорологического университета, katygolubev@gmail.com.

Антонов Евгений Викторович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник отдела социально-экономической географии, Институт географии РАН, antonov@igras.ru.

Сердюкова Елизавета Александровна, аспирант кафедры геоэкологии Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, serdukovaelizaveta489@gmail.com

Information about authors

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

Golubeva Ekaterina A., postgraduate student at the Department of Geoecology, Nature Management and Environmental Safety at the Russian State Hydrometeorological University.

Antonov Evgeniy V., PhD (Geogr. Sci.), Senior Research Fellow, Department of Social and Economic Geography, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences.

Serdyukova Elizaveta A., postgraduate student at the Department of Geoecology at the St. Petersburg Mining University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 04.11.2025
Принята в печать 20.11.2025*

*The article was received on 04.11.2025
The article was accepted on 20.11.2025*