

Загрязнение микрочастицами морского мусора песчаных побережий восточной части Финского залива Балтийского моря

А. С. Кузьмина *, А. А. Ершова

*Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург, Россия*

** e-mail: kuzmina_a98@yahoo.com*

Аннотация

Рассмотрены особенности распределения морского мусора (частиц размером менее 5 мм) в 2019–2020 гг. на 13 пляжах Санкт-Петербурга и Ленинградской области, расположенных на побережье российской части Финского залива Балтийского моря. Микромусор обнаружен на всех пляжах, однако его состав и количество значительно варьируют в зависимости от экспозиции пляжа и других факторов. Концентрация микромусора составила от 0.1 до 55.5 частиц/м². Самое большое количество микромусора в зоне заплеска обнаружено на пляже в центре Санкт-Петербурга, меньше всего – в парке Александрия на южном побережье. Преобладающим типом микромусора на большинстве пляжей является пластик. С помощью кластерного анализа пляжи охарактеризованы по степени их загрязненности: наиболее загрязненные пляжи расположены в черте города на побережьях Невской губы, наименее загрязненные пляжи – либо за пределами Невской губы, либо на значительном удалении от центра Санкт-Петербурга. В Невской губе и на северном побережье открытой части Финского залива концентрации микромусора выше, чем на южном побережье, что может быть связано с особенностями течений и ветров, обуславливающих вынос и перенос к северу частиц, поступающих со стоком реки Невы. Сравнение полученных данных с результатами других исследований в данном регионе показало, что, по сравнению с побережьями других частей Балтийского моря, в восточной части Финского залива наблюдаются более высокие значения количества микрочастиц на пляжах.

Ключевые слова: морской мусор, микромусор, Невская губа, Финский залив, пляж, микропластик, загрязнение, морские экосистемы

Для цитирования: Кузьмина А. С., Ершова А. А. Загрязнение микрочастицами морского мусора песчаных побережий восточной части Финского залива Балтийского моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 2. С. 86–100. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-86-100

© Кузьмина А. С., Ершова А. А., 2022



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Contamination of Sandy Beaches with Marine Litter Microparticles (the Eastern Part of the Gulf of Finland of the Baltic Sea)

A. S. Kuzmina *, A. A. Ershova

Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

** e-mail: kuzmina_a98@yahoo.com*

Abstract

This article discusses the features of the distribution of marine microlitter (particles less than 5 mm) in 2019–2020 on 13 beaches of St. Petersburg and the Leningrad Region located on the coast of the Russian part of the Gulf of Finland (the Baltic Sea). Microlitter was found on all beaches, however, its composition and amount varied significantly depending on the beach exposure and other factors. The concentration of microlitter ranged from 0.1 to 55.5 particles/m². The largest amount of microlitter in the wrack zone was found on the beach in the center of St. Petersburg, the least – in Alexandria Park on the south coast; the predominant type of microlitter on most beaches is plastic. Using a cluster analysis, the beaches were classified according to the degree of their contamination: the most contaminated beaches are located within the city on the coasts of the Neva Bay, the least contaminated beaches are either outside the Neva Bay or at a considerable distance from the center of St. Petersburg. In the Neva Bay and on the northern coast of the open part of the Gulf of Finland, the concentrations of microlitter are higher, which may be due to the peculiarities of currents and winds determining the removal of particles coming with the Neva River runoff and their transport to the north. Comparison of the obtained data with the results of other studies in this region showed that, as compared with the beaches of other parts of the Baltic Sea, the Eastern Gulf of Finland has the highest values of the number of microparticles on the beaches.

Keywords: marine litter, microlitter, Neva Bay, Gulf of Finland, beaches, microplastics, contamination, marine ecosystems

For citation: Kuzmina, A.S. and Ershova, A.A., 2022. Contamination of Sandy Beaches with Marine Litter Microparticles (the Eastern Part of the Gulf of Finland of the Baltic Sea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 86–100. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-86-100

Введение

Долгое время отходы считались проблемой для территорий вблизи промышленных площадок и густонаселенных городских районов, но не для морских экосистем, однако после открытия Большого Тихоокеанского мусорного пятна проблема морского мусора стала известна широкой аудитории [1]. В настоящее время морской мусор оказывает негативное воздействие как на экономику и благосостояние людей, живущих у моря, так и на морские экосистемы [2]. Ежегодно в Мировой океан попадает до 20 млн т пластиковых отходов [3]. Морской мусор легко преодолевает границы между странами; он может быть найден рядом с местом его происхождения, а может переноситься течениями и ветрами. Это затрудняет оценку распределения морского мусора и поиск его источников.

Микромусор – это частицы как природных, так и синтетических материалов с наибольшей размерностью до 5 мм. Микропластик бывает первичным (гранулы – мелкие полимерные частицы, используемые при производстве различной продукции) и вторичным (фрагменты, возникающие при разрушении более крупных пластиковых изделий) [4]. Микропластик был обнаружен в организмах-фильтраторах и прочих бентосных организмах [5]. Лабораторные исследования показали, что многие морские беспозвоночные, такие как двустворчатые моллюски, иглокожие, амфиподы и зоопланктон, могут поглощать микропластик [6, 7]. Пластик часто содержит опасные добавки, может адсорбировать гидрофобные стойкие органические загрязнители и переносить эти вещества в морские пищевые цепи [8].

Мониторинговые исследования морского и, в частности, пляжного мусора важны для выявления источников его поступления в морскую среду. В Балтийском регионе исследования пляжного мусора проводятся на протяжении нескольких лет (см. отчет¹⁾ и работы [9–11]). Первые масштабные исследования пляжного мусора были проведены в 2011–2013 гг. в рамках проекта *MARLIN*, в ходе которых на побережьях Швеции, Финляндии, Эстонии и Латвии было обнаружено от 75 до 236 фрагментов макромусора на 100 м пляжа¹⁾. Было установлено, что основными источниками морского мусора в Балтийском море являются морской транспорт, рыболовство, бытовые стоки, а также рекреационная деятельность на побережье [9].

Широкомасштабные исследования микропластика в 2014–2016 гг. на немецких пляжах показали, что в верхнем слое песка на пляжах балтийского побережья Германии содержится в среднем 2–11 частиц микропластика на килограмм сухой массы [12], а на пляжах Кильского фьорда от 2 до 30 частиц на килограмм сухой массы [13]. При этом на пляжах немецкого о-ва Рюген количество микропластика составило уже 80–100 частиц на килограмм сухой массы в слое песка [14]. Пляжи на территории Польши также загрязнены микропластиком, его концентрации на поверхности песка составили от 25 до 43 частиц на килограмм сухого веса в 2014 г. [15].

Пляжи могут быть загрязнены микромусором разного размерного ряда: от десятков микрон до 5 мм. В 2014–2016 гг. на пляжах Германии и Литвы были проведены мониторинговые исследования [10] загрязненности визуально различимым микромусором (2–5 мм) с помощью методик, которые в дальнейшем были использованы в настоящей работе. Были получены следующие результаты: встречаемость частиц микромусора составила от 0.02 до 3.9 частиц/м². Исследования разных авторов показывают, что микромусор обнаруживается на всех пляжах. Однако очень сложно сравнивать результаты оценки загрязнения из-за различий в используемых методиках. К тому же авторы могут как описывать загрязнение всеми типами микромусора, так и акцентировать внимание только на микропластике.

На российском побережье Балтийского моря исследования микропластика в пляжевых песках ведутся с 2016 г. Установлено, что на пляжах Калининградской области микропластик присутствует и на поверхности песка,

¹⁾ Final report of Baltic marine litter project MARLIN – litter monitoring and raising awareness 2011–2013. URL: https://www.pidasaaristosiistina.fi/files/1994/Marlin_Final_Report_2014.pdf (дата обращения: 06.03.2022).

и на глубине больше 1 м, а концентрации варьируются от 2 до 572 частиц на килограмм сухой массы [16]. На побережьях восточной части Финского залива изучение морского мусора было начато РГГМУ в 2018 г. [17]; было обнаружено, что все побережья Финского залива и Невской губы загрязнены пластиковым мусором всех фракций – от макро- до микромусора. Параллельное исследование на станциях РГГМУ 2019 г. [18] показало разброс концентраций микропластика в пляжевых отложениях от 15 до 210 частиц на килограмм сухой массы в Невской губе. Модельные исследования 2019 г. выявили тенденции распространения микропластика в Невской губе [19]. В целом исследования в Невской губе и Финском заливе указывают на гораздо более высокие концентрации микропластика на российском побережье по сравнению с прибрежной зоной других стран Балтийского моря.

В данном регионе только РГГМУ ежегодно исследует загрязнение пляжей микромусором, что позволяет анализировать динамические характеристики и производить статистическую обработку данных. Поэтому целью данного исследования является анализ загрязненности микрочастицами морского мусора пляжей Невской губы и восточной части Финского залива на основе сезонных съемок РГГМУ 2019–2020 гг. Для этого выполнены следующие задачи: рассмотрены особенности распределения морского микромусора на пляжах российской части Финского залива, проведена классификация пляжей по степени их загрязненности в 2019–2020 гг., а также произведено сравнение полученных данных с результатами других исследований в данном регионе.

Выборочные материалы, использованные в подготовке настоящей работы, ранее были представлены на конференции ²⁾.

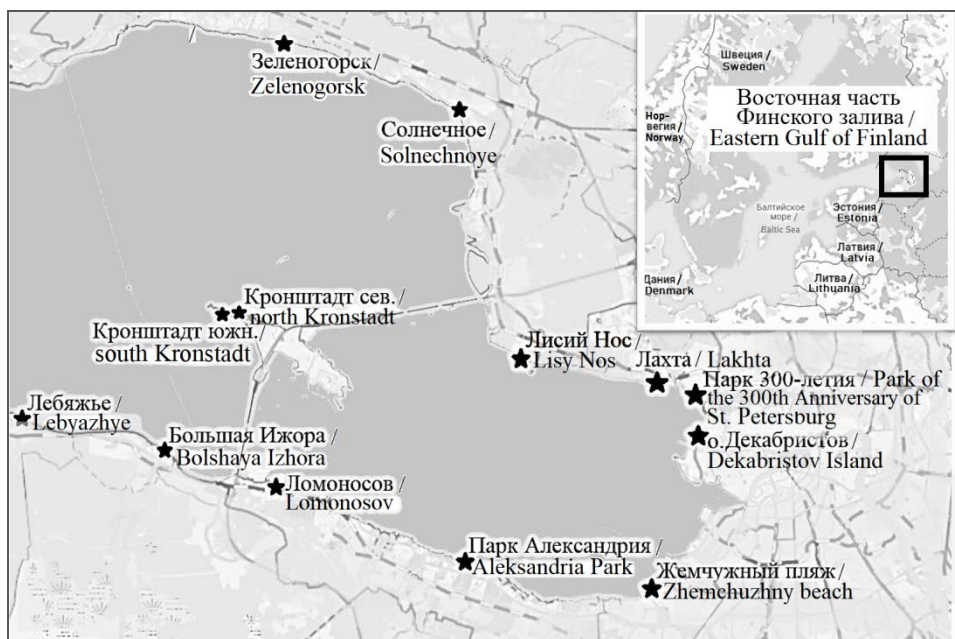
Материалы и методы

Восточная (русская) часть Финского залива является конечным бассейном аккумуляции веществ из Ладожского озера и р. Невы. В этой части залива особого внимания заслуживает Невская губа – техногенная лагуна, ограниченная Западным скоростным диаметром, комплексом защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнения и Морским фасадом, что способствует накоплению материала, поступающего с водами Невы. Восточная часть Финского залива испытывает сильное антропогенное воздействие, так как на берегах этого водного объекта проживает более 5 млн человек.

Практически повсеместно в пределах восточной части Финского залива и его береговой зоны верхняя часть геологического разреза представлена поздне- и послеледниковыми четвертичными отложениями. На пляжах эти отложения представлены среднезернистыми, а в границах Невской губы – крупнозернистыми речными песками [20].

Исследования проводились на 13 пляжах Санкт-Петербурга и Ленинградской области (рис. 1) в летние месяцы 2019–2020 гг.

²⁾ Кузьмина А. С., Еришова А. А. Сравнительная характеристика методик мониторинга морского микромусора для песчаных пляжей Финского залива Балтийского моря // Понт Эвксинский – 2021 : материалы XII Всероссийской научно-практической конференции для молодых ученых по проблемам водных экосистем, посвященной 150-летию Севастопольской биологической станции – ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», г. Севастополь, 20–24 сентября 2021 г. Севастополь, 2021. С. 78–80. doi:10.21072/978-5-6044865-8-0



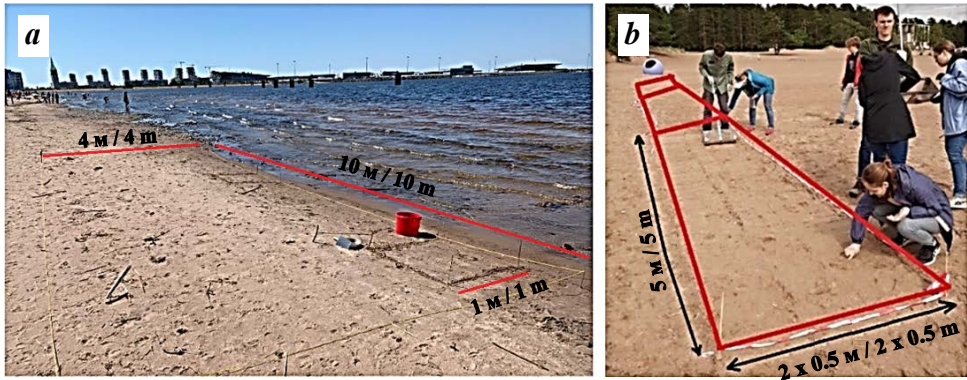
Р и с . 1 . Места отбора проб микромусора на побережьях восточной части Финского залива

Fig . 1 . Microlitter sampling locations on the coasts of the Eastern Gulf of Finland

При отборе проб микромусора использовались две международные методики обследования пляжей [10, 21], разработанные для балтийских побережий на основе опыта мониторинга проекта *OSPAR*. Первая методика – фрейм-метод, который предполагает изучение зоны заплеска с полигоном 40 m^2 для отбора крупного мусора (более 5 mm) и двумя квадратами площадью 1 m^2 для отбора микромусора размером $2\text{--}5 \text{ mm}$ (с помощью сита с ячейкой 2 mm). Вторая – рейк-метод, который предусматривает изучение всего побережья от уреза воды до линии растительности с полигоном минимум 50 m^2 ; песок при этом просеивается с помощью специальных граблей с ячейкой 2 mm (рис. 2). Оба метода направлены на отбор визуально-различимой фракции микромусора ($2\text{--}5 \text{ mm}$), но при этом исследуются две функционально различные зоны пляжа.

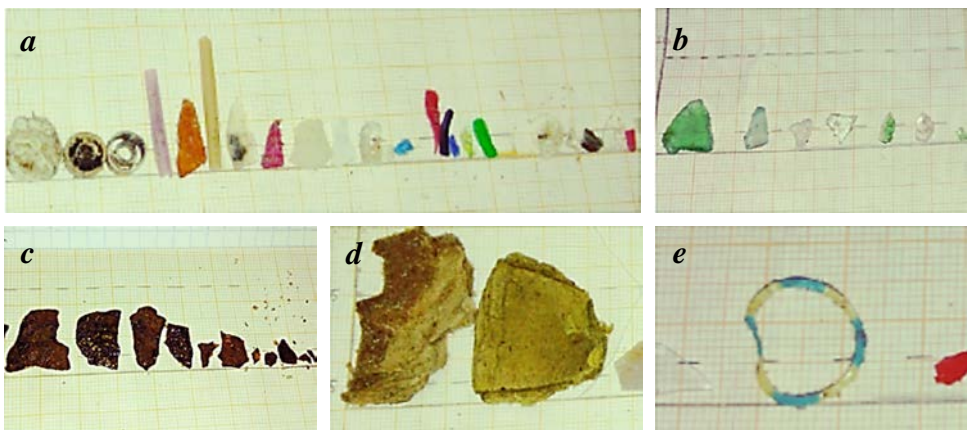
Отобранные частицы микромусора подсчитывались и классифицировались по типу материала: пластик, стекло, бумага, металл и прочие материалы (рис. 3).

Полученные данные вносились в протоколы (по пляжам) и обрабатывались с помощью программного обеспечения *Microsoft Excel* и *PAST4* (кластеризация методом Уорда). Данный алгоритм использует методы дисперсионного анализа для оценки расстояний между кластерами. Он минимизирует сумму квадратов расстояния для двух кластеров, формирование которых происходит на каждом шаге. Метод Уорда приводит к образованию кластеров примерно равных размеров с минимальной внутриклассовой дисперсией. В целом метод Уорда эффективен, но он стремится создавать кластеры малого размера, что практически не сказывается на качестве



Р и с. 2. Методы отбора проб микромусора на побережьях: *a* – фрейм-метод, *b* – рейк-метод

Fig. 2. Microlitter sampling methods: *a* – frame method, *b* – rake method



Р и с. 3. Типы микромусора на пляжах восточной части Финского залива: пластик (*a*), стекло (*b*), металл (*c*), бумага (*d*), прочее (*e*)

Fig. 3. Types of microlitter particles on the beaches of the Eastern Gulf of Finland: plastic (*a*), glass (*b*), metal (*c*), paper (*d*), others (*e*)

классификации при сравнительно небольших размерах исходной выборки³⁾. Данный метод был применен потому, что в 2019–2020 гг. съемка проводилась раз в год и ряд данных насчитывал не более 20 значений концентраций микромусора в зоне заплеска.

Результаты

Исследования проводились на двух функционально различных участках пляжей. На всех побережьях изучалось загрязнение зоны заплеска, то есть наличие микромусора непосредственно рядом с урезом воды. Источником микромусора, наиболее вероятно, являются морские волны, выплескивающие материал на берег. Вся ширина пляжа (в том числе сухой части) обследовалась

³⁾ Многомерный статистический анализ в экономике / Л. А. Сошникова [и др.]. М. : ЮНИТИ, 1999. 598 с.

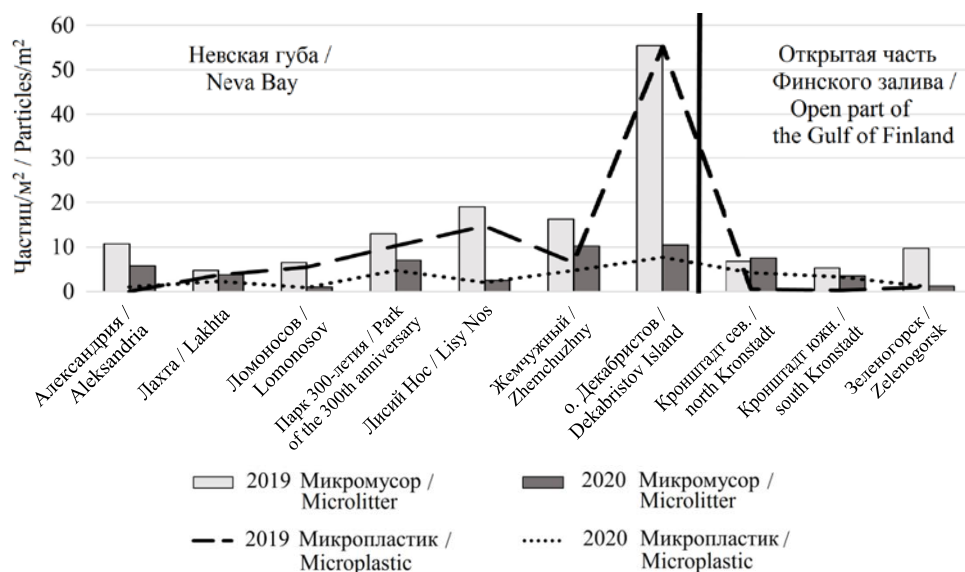
рейк-методом только на выборочных репрезентативных пляжах, чтобы установить значимость других источников загрязнения пляжей (отходы от туристов, ветровой перенос и др.).

Зона заплеска

В летний период 2019 и 2020 гг. среди всех исследованных пляжей больше всего частиц микромусора на квадратный метр в зоне заплеска обнаружено на пляже в самом центре Санкт-Петербурга на о-ве Декабристов в Невской губе. Наименьшее количество частиц микромусора было обнаружено в эти годы на отдаленных от центра пляжах – на Ласковом пляже в пос. Солнечное в открытой части Финского залива в 2019 г. и на пляже в Ломоносове в 2020 г. (рис. 4). При этом в целом в 2020 г. на пляжах в зоне заплеска обнаружено меньше микромусора, чем в 2019 г.

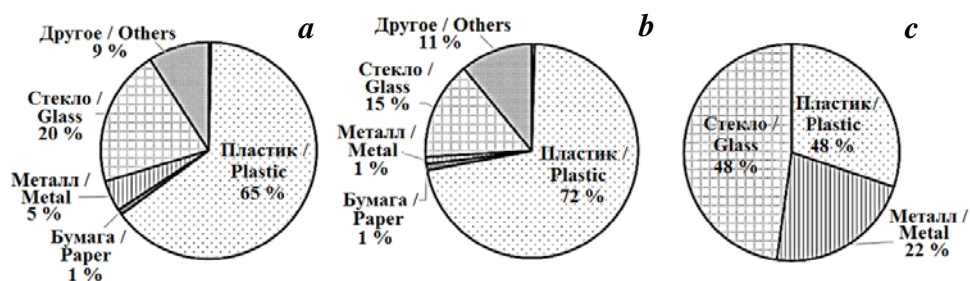
На пляжах Невской губы микромусор представлен преимущественно пластиком, за исключением пляжа в парке Александрия, где он полностью представлен стеклом. За пределами Невской губы картина иная – на пляжах Кронштадта микромусор в основном состоит из металла, а на северном побережье открытой части залива – из стекла (рис. 5). Больше всего частиц микропластика обнаружено на о-ве Декабристов, при этом он отсутствует в пробах в пос. Солнечное и в парке Александрия. В целом на пляжах Невской губы в зоне заплеска микропластика больше, чем в открытой части залива за комплексом защитных сооружений от наводнений.

В ходе исследования было определено количество частиц микромусора и, в частности, микропластика на пляжах Невской губы и открытой части Финского залива. Полученные данные проанализированы с использованием



Р и с . 4 . Количество частиц микромусора и микропластика в зоне заплеска, 2019–2020 гг.

F i g . 4 . The number of particles of microlitter and microplastics in the wrack zone, 2019–2020



Р и с . 5. Доля микромусора каждого типа на всех исследованных пляжах в 2019–2020 гг. (а), отдельно в Невской губе (b) и в открытой части Финского залива (с)

F i g . 5. The percentage of microlitter of each type on all the studied beaches in 2019–2020 (a), in the Neva Bay (b), in the open part of the Gulf of Finland (c)

статистических методов обработки. Получены среднестатистические характеристики для данных участков береговой зоны восточной части Финского залива: среднее арифметическое значение ряда (\bar{x}), медиана (M_e) ряда, стандартное отклонение (σ), максимальное и минимальное значения (табл. 1). Так, в Невской губе среднее количество частиц (\bar{x}) выше, чем в открытой части залива, при этом стандартное отклонение σ превышает среднее значение, что говорит о больших различиях между пляжами Невской губы. Действительно, на пляже на о-ве Декабристов в 2019 г. найдено 55.5 частиц/м², а в парке Александрия – 1 частица/м². При этом в открытой части Финского залива стандартное отклонение не превышает среднего значения, а медиана намного ближе к среднему, чем у данных из Невской губы, что говорит о большей однородности данных.

Т а б л и ц а 1. Количество обнаруженных частиц микромусора (микропластика) на пляжах восточной части Финского залива в 2019–2020 гг., частиц/м²

T a b l e 1. The number of detected particles of microlitter on the beaches of the eastern part of the Gulf of Finland in 2019–2020, particles/m²

Место нахождения пляжа / Beach location	\bar{x}	M_e	σ	max	min
<i>Микромусор / Microlitter</i>					
Невская губа / Neva Bay	11.9	8.6	13.6	55.5	1.0
Открытая часть Финского залива / Open part of the Gulf of Finland	5.7	6.0	3.0	9.8	1.3
<i>В том числе микропластик / Including microplastic</i>					
Невская губа / Neva Bay	8.5	4.8	14.4	55.3	0.0
Открытая часть Финского залива / Open part of the Gulf of Finland	1.7	1.0	1.6	4.3	0.3

Была проведена классификация данных по загрязнению микромусором за 2019–2020 гг. методом Уорда с метрикой Евклида. Было выбрано разделение на три класса: наиболее загрязненные пляжи, среднезагрязненные пляжи и наименее загрязненные пляжи. Были рассчитаны средние значения в каждом классе (табл. 2) и проведено сравнение 2-го и 3-го классов по критерию Стьюдента. В итоге получено, что t^* (2.64) > $t_{кр}$ (2.12) (рассчитанного при уровне значимости $\alpha = 0.05$), из чего следует, что классы не следует объединять между собой. Целесообразно рассматривать их как отдельные группы.

Наиболее загрязненным является пляж на о-ве Декабристов, расположенный в центре города (рис. 6) прямо у места впадения одного из крупнейших рукавов р. Невы в Невскую губу, что, видимо, и обуславливает большое количество обнаруженного микромусора. При этом пляж – один из самых загрязненных макро- и мезомусором, по нашим наблюдениям [22], и не убирается муниципальными службами. Среднезагрязненные пляжи также расположены в черте города на побережьях Невской губы. Наименее загрязненные пляжи находятся либо за пределами Невской губы, либо на значительном отдалении от центра Санкт-Петербурга. Исключением является пляж в пос. Лахта, оказавшийся наименее загрязненным по приведенной классификации, что, возможно, обусловлено наличием плотных тростниковых зарослей, частично задерживающих частицы.

Т а б л и ц а 2. Классификация пляжей восточной части Финского залива по концентрациям микромусора в 2019–2020 гг.

Table 2. Beach classification by microlitter concentrations in the Eastern part of the Gulf of Finland in 2019–2020

Класс / Class	\bar{x} , частиц/м ² / \bar{x} , particles/m ²	Место нахождения пляжа / Beach location
1 (наиболее загрязненные) / 1 (most contaminated)	33	О-в Декабристов / Dekabristov Island
2 (среднезагрязненные) / 2 (moderately contaminated)	10.6	Александрия / Alexandria Парк 300-летия / Park of the 300th Anniversary Лисий Нос / Lisy Nos Жемчужный / Zhemchuzhny
3 (наименее загрязненные) / 3 (least contaminated)	5	Лахта / Lakhta Ломоносов / Lomonosov Кронштадт северный / North Kronstadt Кронштадт южный / South Kronstadt Зеленогорск / Zelenogorsk

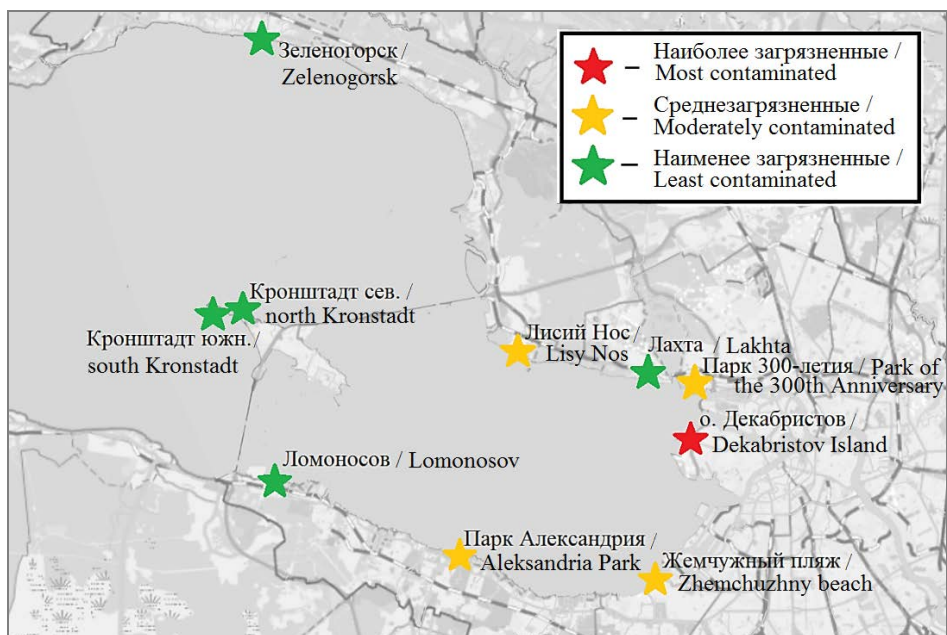


Рис. 6. Классификация пляжей Финского залива по степени загрязненности микромусором

Fig. 6. Classification of the Gulf of Finland beaches according to the degree of microplastic contamination

Выборочное исследование пляжей по всей ширине

Помимо зоны заплеска, в 2019 и 2020 гг. выборочно исследовались пляжи на северном и южном побережьях открытой части Финского залива рейк-методом для оценки загрязненности пляжа по всей ширине от линии воды до линии растительности (см. рис. 1), включая всю его сухую часть. При этом, в отличие от 2019 г., в 2020 г. для изучения выбрано только два пляжа, характеризующих ситуацию на южном и северном побережьях восточной части Финского залива. Выбранные пляжи различаются не только гидродинамическими условиями, но и уровнем рекреационной нагрузки, а также периодичностью уборок пляжей.

В 2019–2020 гг. количество микрочастиц варьировало в очень широких пределах: в 2019 г. больше всего частиц микромусора на квадратный метр обнаружено на северном пляже о-ва Котлин, меньше всего – на пляже в пос. Большая Ижора, тогда как в 2020 г. больше всего частиц обнаружено на пляже в Большой Ижоре, а меньше всего – на пляже в Зеленогорске. Микромусор с пляжей Кронштадта (о. Котлин) представлен большей частью металлом, тогда как на остальных пляжах открытой части Финского залива микромусор в основном пластиковый. В целом больше микропластика наблюдается на северном берегу открытой части залива, также относительно много микрочастиц пластика (более 1 частицы/м²) обнаружено на южном пляже о-ва Котлин в 2019 г.

Количество микромусора от уреза воды к линии растительности изменяется по-разному на каждом пляже (рис. 7). Так, в 2019 г. на пляжах Кронштадта

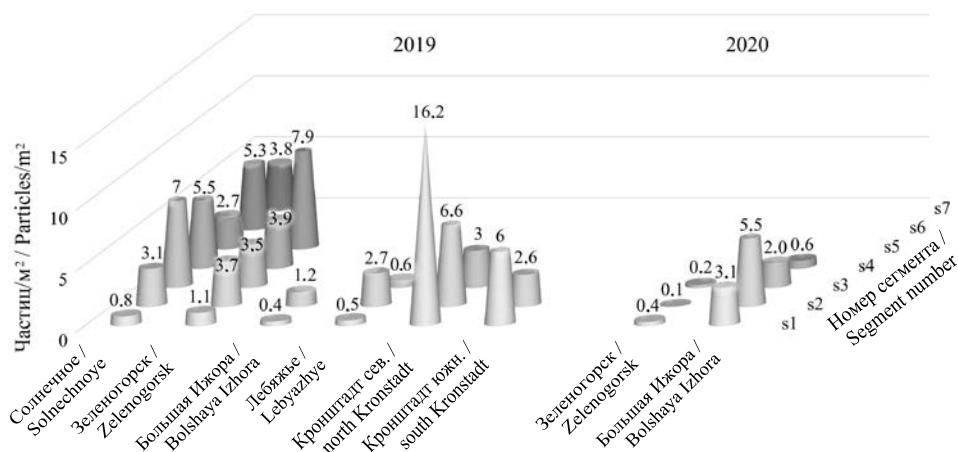


Рис. 7. Распределение микромусора по сегментам пляжа от уреза воды (S1) к линии растительности (S7) в 2019 и 2020 гг.

Fig. 7. Distribution of microlitter by beach segments from water line (S1) to vegetation line (S7) in 2019 and 2020

(о. Котлин) количество микромусора снижается с удалением от уреза воды, то есть скорее всего здесь микромусор на пляже морского происхождения и поступает с волнами; об этом также косвенно говорит его состав – в основном ржавый металл. Нужно отметить, что здесь, на территории заказника «Западный Котлин», проводятся регулярные уборки крупного мусора и посещается данный заказник нечасто в связи с удаленностью от города – количество туристов здесь на порядки меньше, чем на побережьях материковой части Финского залива. На пляжах Зеленогорска и пос. Солнечное на северном побережье Финского залива ситуация обратная – микромусора становится больше в отдалении от воды, хотя Зеленогорск и Солнечное – это ежедневно убираемые популярные среди туристов пляжи Курортного района Санкт-Петербурга. Большое количество микромусора в песках этих пляжей, вероятно, говорит о недостаточности механических средств уборки, которые пропускают мелкие фракции мусора (например, остатки сигаретных окурков), собирая только крупный мусор. Однако нельзя исключать и другую причину скопления микрочастиц (преимущественно пластика) в сухой части данных пляжей – весенние и осенние штормы, забрасывающие взвешенный материал далеко вглубь пляжа. Об этом говорит большое количество пеллет (гранул) в составе микромусора, источником которых является смыв в море со строительных площадок.

Пляжи южного побережья – Большая Ижора и Лебяжье – это так называемые дикие пляжи, на которых убирают только местные волонтеры. Оба пляжа имеют высокую рекреационную нагрузку в летний период, однако в 2019 г. там обнаружено самое низкое количество микромусора по всей ширине пляжа. На примере этих пляжей подтверждается теория влияния доминирующих течений в Финском заливе, согласно которой взвешенный материал, поступающий со стороны города и р. Невы, выносится на северное побережье [23].

Исследование 2020 г. показало другую картину распределения мусора на пляжах северного и южного побережий: больше мусора обнаружено в Большой Ижоре при максимальном накоплении в середине пляжа, а наименьшее количество микрочастиц наблюдалось на пляже Зеленогорска, что, возможно, связано с таким фактором, как искусственное возобновление пляжа чистым привезенным песком.

Обсуждение

Проведенные исследования показали, что микромусор в том или ином виде обнаружен на всех пляжах восточной части Финского залива и Невской губы. Пляжи, наиболее загрязненные частицами размером менее 5 мм, находятся в черте Санкт-Петербурга, ближе к его центру, в районе одного из главных рукавов р. Невы. Похожая ситуация наблюдается и в других частях Балтийского моря: в Калининградской области больше всего микропластика обнаружено в зоне заплеска на наиболее посещаемых пляжах, а также на Вислинской косе [17], для пляжей Финляндии также характерна более высокая загрязненность городских пляжей [9]. Таким образом, наиболее загрязненными микромусором в Балтийском регионе оказываются пляжи урбанизированных территорий.

Исследования, проведенные в рамках проекта *MARLIN*, показали, что наиболее загрязненными на Балтике являются пляжи Финляндии, расположенные на северном побережье Финского залива [9], а более половины всех обнаруженных там предметов были пластиковыми. В данной работе выявлено, что северное побережье Финского залива и Невской губы загрязнено микромусором сильнее, чем южное, а преобладающим видом микромусора здесь является микропластик – приблизительно 65 % от общего объема. В целом разнообразие видов материалов, из которых состоит микромусор Финского залива, велико; помимо микропластика здесь присутствуют микрочастицы металла, стекла, строительной штукатурки и других материалов, тогда как, например, на побережье Калининградской области в Юго-Восточной Балтике антропогенный морской мусор состоит в основном из пластика – в общей сложности около 90 % от всех собранных образцов [17].

Сравнение концентраций микромусора и микропластика, найденного на балтийских побережьях Германии, Литвы [11] и России с помощью методов, использующихся в настоящем исследовании, показало, что, в отличие от пляжей Германии и Литвы, в Невской губе Финского залива обнаружено максимальное количество микрочастиц в Балтийском регионе. На пляжах российской части Финского залива обнаружено в среднем 11.5 частиц/м² в зоне заплеска и 3 частицы/м² по всей ширине пляжа, тогда как в Германии и Литве эти значения составляют в среднем 0.1 и 3.9 частиц/м² соответственно для зоны заплеска и 0.2 и 0.02 частиц/м² для всей ширины пляжа. Для пляжей Невской губы и Германии характерно преобладание пластиковых частиц в зоне заплеска.

В отличие от балтийских побережий других стран, где основным источником морского мусора является туризм, в Невской губе и открытой части российского побережья Финского залива источники микромусора варьируют от пляжа к пляжу и, вероятно, могут зависеть от вида промышленной деятельности поблизости. Так, например, преобладание металлических частиц

в структуре микромусора пляжей Кронштадта (о. Котлин) можно объяснить активным судоходством и судами, стоящими на причале в непосредственной близости от мест отбора проб, а источником стекла на пляже в парке Александрия (регулярно убираемом) может являться Петровская стекольная мануфактура, расположенная на берегу неподалеку от парка. Большое количество остатков штукатурки на некоторых пляжах (категория «другое») также указывает на близость строительных площадок и мест, где утилизируются строительные отходы. Нельзя исключать также роль не полностью очищенных муниципальных и промышленных сточных вод как источника микропластика на исследованных побережьях: образцы микропластика часто были представлены гранулами или пеллетами, а также нередко являлись фрагментами бытовых предметов гигиены. По причине преобладания юго-западных ветров, а также сложной схемы течений, северное побережье открытой части Финского залива загрязнено микромусором сильнее, чем южное, так как частицы, поступающие со стоком р. Невы, переносятся в северном направлении [23].

Заключение

В целом проведенные исследования подтвердили главную закономерность распределения микрочастиц в водах Невской губы и на ее побережьях: более высокие концентрации микромусора характерны для Невской губы и северного побережья открытой части Финского залива, что объясняется особенностями течений и преобладающих ветров. Вполне закономерно пляжи, находящиеся ближе к центру города, являются более загрязненными. Однако проведенные исследования также показывают значительную изменчивость концентраций и условий формирования микропластиковой нагрузки на пляжи, для более детального изучения которой, очевидно, необходимы более частые исследования с учетом сезонов года и гидрометеорологических явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Moore C. J.* Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat // *Environmental Research*. 2008. Vol. 108, iss. 2. P. 131–139. doi:10.1016/j.envres.2008.07.025
2. Citizen scientists reveal: Marine litter pollutes Arctic beaches and affects wild life / *M. Bergmann [et al.]* // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. Vol. 125, iss. 1–2. P. 535–540. doi:10.1016/j.marpolbul.2017.09.055
3. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution / *S. B. Borrelle [et al.]* // *Science*. 2020. Vol. 369, no. 6510. P. 1515–1518. doi:10.1126/science.aba3656
4. *Andrady A. L.* Microplastics in the marine environment // *Marine Pollution Bulletin*. 2011. Vol. 62, iss. 8. P. 1596–1605. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.05.030
5. *Van Cauwenberghe L., Janssen C. R.* Microplastics in bivalves cultured for human consumption // *Environmental Pollution*. 2014. Vol. 193. P. 65–70. doi:10.1016/j.envpol.2014.06.010
6. *Setälä O., Norkko J., Lehtiniemi M.* Feeding type affects microplastic ingestion in a coastal invertebrate community // *Marine Pollution Bulletin*. 2016. Vol. 102, iss. 1. P. 95–101. doi:10.1016/j.marpolbul.2015.11.053

7. Microplastic ingestion by zooplankton / M. Cole [et al.] // *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47, iss. 12. P. 6646–6655. doi:10.1021/es400663f
8. *Derraik J. G. B.* The pollution of the marine environment by plastic debris: a review // *Marine Pollution Bulletin*. 2002. Vol. 44, iss. 9. P. 842–852. doi:10.1016/S0025-326X(02)00220-5
9. Marine litter / O. Setälä [et al.] // *The Gulf of Finland assessment* / Eds. M. Raateoja, O. Setälä. Helsinki : SYKE, 2016. С. 276–289. (Reports of the Finnish environment institute ; vol. 27). URL: <https://pame.is/document-library/desktop-study-on-marine-litter-library/additional-documents/493-setala-2016-marine-litter/file> (date of access: 06.05.2022).
10. Monitoring methods for large micro- and meso-litter and applications at Baltic beaches / M. Haseler [et al.] // *Journal of Coastal Conservation*. 2017. Vol. 22, iss. 1. P. 27–50. doi:10.1007/s11852-017-0497-5
11. Микропластик в морской среде / И. П. Чубаренко [и др.]. М. : Научный мир, 2021. 520 с.
12. Microplastic concentrations in beach sediments along the German Baltic coast / A. Stolte [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2015. Vol. 99, iss. 1–2. P. 216–229. doi:10.1016/j.marpolbul.2015.07.022
13. *Schröder K., Kossel E., Lenz M.* Microplastic abundance in beach sediments of the Kiel Fjord, Western Baltic Sea // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28, iss. 21. P. 26515–26528. doi:10.1007/s11356-020-12220-x
14. Microplastic in beach sediments of the Isle of Rügen (Baltic Sea) – Implementing a novel glass elutriation column / E. Hengstmann [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2018. Vol. 126. P. 263–274. doi:10.1016/j.marpolbul.2017.11.010
15. Sources and fate of microplastics in marine and beach sediments of the Southern Baltic Sea – a preliminary study / B. Graca [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24, iss. 8. P. 7650–7661. doi:10.1007/s11356-017-8419-5
16. *Есюкова Е. Е., Чубаренко И. П.* Особенности распределения микропластика на песчаных пляжах Калининградской области (Балтийское море) // *Региональная экология*. 2018. № 1 (51). С. 108–121. doi:10.30694/1026-5600-2018-1-108-121
17. Marine litter monitoring: review for the Gulf of Finland coast / T. Eremina [et al.] // 2018 IEEE/OES Baltic International Symposium (BALTIC). IEEE, 2018. P. 1–8. doi:10.1109/BALTIC.2018.8634860
18. Studying the Concentration of Microplastic Particles in Water, Bottom Sediments and Subsoils in the Coastal Area of the Neva Bay, the Gulf of Finland / Sh. R. Pozdnyakov [et al.] // *Water Resources*. 2020. Vol. 47, iss. 4. P. 599–607. doi:10.1134/S0097807820040132
19. К оценке распространения микропластика в восточной части Финского залива / С. Д. Мартыанов [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 4. С. 32–41. doi:10.7868/S207366731904004X
20. Изменение береговой зоны восточной части Финского залива под воздействием природных и антропогенных факторов / М. А. Спиридонов [и др.] // *Региональная геология и металлогения*. 2010. № 41. С. 107–118. URL: <http://evgengusev.narod.ru/laptev/spiridonov-2010.pdf> (дата обращения: 21.05.2022).
21. Marine litter pollution in Baltic Sea beaches – application of the Sand rake method / M. Haseler [et al.] // *Frontiers in Environmental Science*. 2020. Vol. 8. 599978. doi:10.3389/fenvs.2020.599978

22. Marine Litter in the Russian Gulf of Finland and South-East Baltic: Application of Different Methods of Beach Sand Sampling / A. A. Ershova [et al.] // *Plastics in the Aquatic Environment – Part I* / Eds. F. Stock [et al.]. Cham : Springer, 2021. P. 461–485. (The Handbook of Environmental Chemistry ; vol. 111). doi:10.1007/698_2021_746
23. *Martyanov S. D., Isaev A. V., Ryabchenko V. A.* Model estimates of microplastic potential contamination pattern of the eastern Gulf of Finland in 2018 // *Oceanologia*. 2021. doi:10.1016/j.oceano.2021.11.006

Поступила 02.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 14.04.2022 г.; принята к публикации 27.04.2022 г.; опубликована 25.06.2022 г.

Об авторах:

Кузьмина Анастасия Сергеевна, магистрант, Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Россия, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79), *kuzmina_a98@yahoo.com*

Ershova Aleksandra Aleksandrovna, доцент, Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Россия, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3634-7009**, **ResearcherID: E-4198-2014**, **Scopus Author ID: 57196234834**, *amberx19@gmail.com*

About the authors:

Anastasia S. Kuzmina, master student, Russian State Hydrometeorological University (79 Voronezhskaya St., St. Petersburg, 192007, Russian Federation), *kuzmina_a98@yahoo.com*

Aleksandra A. Ershova, Associate Professor, Russian State Hydrometeorological University (79 Voronezhskaya St., St. Petersburg, 192007, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0003-3634-7009**, **ResearcherID: E-4198-2014**, **Scopus Author ID: 57196234834**, *amberx19@gmail.com*

Заявленный вклад авторов:

Кузьмина Анастасия Сергеевна – проведение полевых исследований, обработка исходных данных, представление графического материала, анализ литературных данных, написание текста статьи, формулирование выводов

Ershova Aleksandra Aleksandrovna – постановка цели исследования, общее научное руководство, редактирование текста статьи, формулирование выводов

Contribution of the authors:

Anastasia S. Kuzmina – conducting field research, processing initial data, presenting graphic material, analyzing literature data, writing the text of the article, formulating conclusions

Aleksandra A. Ershova – setting the goal of the study, general scientific guidance, editing the text of the article, formulating conclusions

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.