

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПЕСЧАНЫХ ПЛЯЖЕЙ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКИ АНТРОПОГЕННЫМ МОРСКИМ МУСОРОМ: РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЛЕТНЕГО МОНИТОРИНГА ПО ПРОТОКОЛУ OSPAR С ОЦЕНКОЙ МАССЫ И РАЗМЕРОВ

О. И. Лобчук^{1*}, А. В. Килесо^{1,2}, Е. Е. Есюкова¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36;

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Россия, 236016, Калининград, улица Александра Невского, 14,
*e-mail: lobchuk_olga@mail.ru

В результате многолетнего мониторинга (2019–2022 гг.) по расширенному протоколу OSPAR проведена комплексная оценка загрязнения антропогенным морским мусором песчаных пляжей юго-восточной части Балтийского моря. На двух модельных пляжах (Куршская и Балтийская косы) собрано и проанализировано 7927 предметов мусора. Установлено доминирование пластикового загрязнения, составляющего 90 % от общего количества мусора. Плотность загрязнения антропогенным морским мусором составила 0.12 ± 0.08 шт./м² на Куршской косе и 0.08 ± 0.06 шт./м² на Балтийской косе. Впервые для региона получены детальные массо-размерные характеристики пластикового мусора, показавшие преобладание частиц размером 0.1–1 см с массой менее 1 г. Спектральный анализ выявил однородный полимерный состав с преобладанием PET (12 %), CA (11 %), PS (10 %), PE (10 %) и PP (9 %). Статистический анализ не выявил значимых временных трендов и сезонных колебаний загрязнения. Полученные данные имеют важное значение для разработки моделей переноса и трансформации пластикового мусора в морской среде и могут служить основой для совершенствования системы мониторинга антропогенного морского мусора.

Ключевые слова: Балтийское море, антропогенный морской мусор, масса, размер, мониторинг, OSPAR, Калининградская область

Введение

Антропогенный морской мусор представляет глобальную экологическую угрозу для окружающей среды (Galgani et al., 2015; Beaumont et al., 2019). Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде (UNEP, 2011) определяет понятие «морской мусор» как любые искусственные долговечные материалы, включая крупные антропогенные фрагменты органического происхождения (например, обработанная древесина, используемая в строительстве, отделке, производстве мебели и т. д.) (Dominin et al., 2021; Guerrero-Meseguer et al., 2020; Holden et al., 2018; Isachenko et al., 2023), попадающие в морскую среду различными путями. Основную часть отходов составляет пластик, что обусловлено высоким уровнем производства

(более 400 млн тонн ежегодно в 2022 г.) и низким коэффициентом конечной утилизации (European Commission..., 2023). В Мировом океане пластиковый мусор составляет наибольшую долю от всего антропогенного морского мусора, плавая на поверхности моря (Lebreton et al., 2019), оседая на дне (Maes et al., 2018) или на пляжах (Browne et al., 2010). Исследования показывают (Onink et al., 2021; Anastacio et al., 2023; Nguyen, 2025), что около 70 % пластиковых отходов концентрируется в прибрежных зонах. Пластиковый мусор на пляжах подвергается фото- и термоокислению, химико-механической деградации и выветриванию, гидролизу, биодеградации, что влечет за собой изменение физических свойств (Andrady, 2017). Поверхность пластикового материала становится хрупкой и ломкой, что приводит к растрескиванию, дроблению и разрушению. Подавляющее большинство пластикового мусора в морской среде распадается под воздействием внешних факторов на все более и более мелкие фрагменты и частицы, которые представляют потенциальную угрозу для живых организмов и равновесия экосистем. Основными источниками антропогенного морского мусора на побережьях являются: рыболовецкая и туристическая (рекреационная) инфраструктуры (сети, лодки, буйки и т.д.); бытовые хозяйствственные товары (одноразовая посуда, бутылки, контейнеры и т.д.); строительные материалы (утеплители, пены, пеноблоки и т.д.); косметические средства и продукты личной гигиены (ушные палочки, салфетки, упаковка и т.д.) (GESAMP, 2019). Важную роль в загрязнении пляжей играет близость городов и поселений, промышленных предприятий, портов, инженерных берегоукрепительных сооружений, ферм аквакультуры, мест отдыха и сельскохозяйственных угодий, рек и каналов.

Предшествующие научные работы, посвященные изучению антропогенного морского мусора, в основном опираются на стандартизованный подход, включающий подсчет количества объектов и их последующую систематизацию по категориям (Fanini et al., 2021; González-Fernández et al., 2021; Gu et al., 2022; Anfuso et al., 2020; Лобчук, Килесо, 2021; Зобков, Зобкова, 2024; Schulz et al., 2013; Schulz et al., 2017; Álvarez et al., 2020; Zalewska, 2021). Данное исследование базируется на общепринятом рекомендованном протоколе OSPAR (Wenneker, Oosterbaan, 2010), предназначенному для описания и количественной оценки антропогенного морского мусора посредством визуальных наблюдений, отбора и разделения мусора на определенные качественные группы. Вместе с тем действующий протокол мониторинга ограничен отсутствием измерения ключевых физических характеристик, таких как масса и размеры предметов мусора (Grundelhner et al., 2023). Поэтому в представленной работе проведена дополнительная количественная оценка этих наиболее важных показателей.

Данные о массе как антропогенного морского, так и пластикового мусора (Fetisov et al., 2024), крайне важны для расчета потоков и балансов пластика в окружающей среде (Jambeck et al., 2015). Источники пластика (производство пластика на сушке) чаще всего количественно оцениваются по массе (Jambeck et al., 2015), тогда как мониторинг в море или на пляжах обычно основан только на подсчете количества наблюдаемых предметов мусора (Browne et al., 2015). Чтобы иметь возможность

переводить количество найденных образцов в массу и обратно, необходимо знать распределение размеров и массы всех предметов.

Балтийское море служит ярким примером региона, где внутренние источники мусора определяют антропогенную нагрузку на прибрежную морскую среду (Schernewski et al., 2018). Море полуизолировано и соединяется с Северным морем Атлантическим океаном только узким проливом в западной части моря. Поэтому лишь незначительное количество плавающего мусора поступает в Балтику из других морей, в то время как большая часть мусора образуется внутри самого бассейна, вблизи основных судоходных маршрутов коммерческих судов, там, где работают рыболовецкие суда, ведется строительство инженерно-технических и гражданских объектов, существует развитая инфраструктура прибрежных городов, портов, различных видов рекреационных объектов (Lenz et al., 2023).

Выбранные районы исследования представляют пляжи с различным уровнем антропогенной нагрузки и доступности, обеспечивая возможность анализа степени загрязнения мусором российского побережья в юго-восточной части Балтийского моря (Калининградская область).

Цель данного исследования – провести комплексный анализ пространственно-временной динамики загрязнения антропогенным морским и пластиковым мусором песчаных пляжей юго-восточной части Балтийского моря (Калининградская область) на основе многолетнего мониторинга (2019–2022 гг.) по протоколу OSPAR, дополнив существующие данные оценкой распределения массы и размеров предметов из всех категорий собранного пластикового мусора впервые для данного региона.

Материалы и методы

В работе проведен анализ данных о загрязнении пляжей Калининградской области с июля 2019 г. по октябрь 2022 г. (рисунок 1) антропогенным морским мусором Куршской и Балтийской кос. Данные, использованные в представленном исследовании, были получены в соответствии с базой данных, разработанной Комиссией OSPAR в рамках Директивы ЕС по Стратегии охраны морской среды (Wenneker, Oosterbaan, 2010). Информация о пластиковом мусоре на пляжах была собрана в соответствии с протоколом мониторинга пластикового мусора на пляжах OSPAR, который является наиболее подробным и полным из имеющихся протоколов мониторинга мусора на пляжах (Schulz et al., 2017).

Изучаемая территория расположена в юго-восточной части Балтийского моря (рисунок 1). Общая протяженность береговой линии составляет 147 км, она в основном представлена песчаными пляжами (Fetisov et al., 2024). Согласно протоколу OSPAR, возможны два варианта обследований пляжа: 100-метровые и 1000-метровые участки песчаного пляжа (секции), для которых категории объектов мусора имеют отличия. В этом исследовании использовались данные со 100-метровых секций, т. к. данная методика позволяет (1) работать с небольшими объектами размером менее

150 см (в то время как 1000-метровые секции предназначены преимущественно для учета крупного мусора), и (2) данные исследований со 100-метровых участков более широко представлены в печати, что дает возможность сравнивать полученные результаты с уже опубликованными.

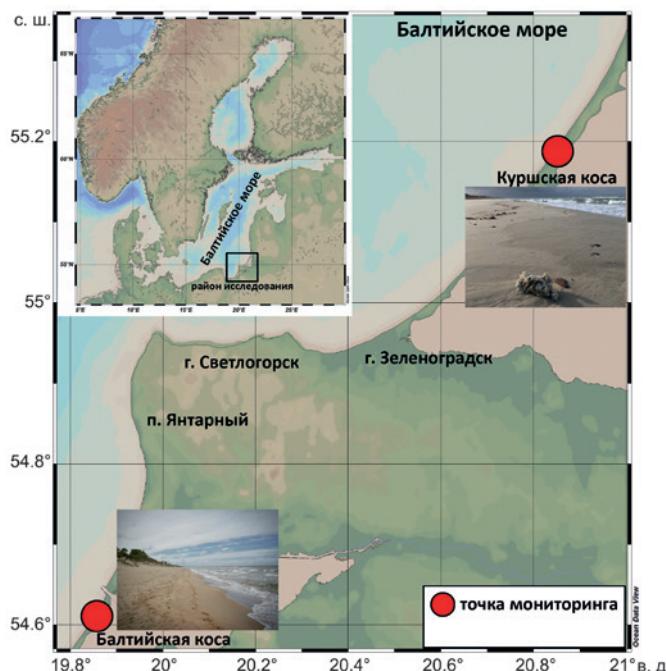


Рис. 1 – Карта Балтийского моря и его юго-восточной части.

Красными точками отмечены пляжи (Куршская ($55^{\circ}13'22.13''$ с. ш. $20^{\circ}53'18.11''$ в. д.) и Балтийская ($54^{\circ}38'5.14''$ с. ш. $19^{\circ}52'36.19''$ в. д.) косы), с фотографиями пляжей, на которых выполнялся мониторинг OSPAR

Экспедиционные выходы производились регулярно четыре раза в год (январь, апрель, июль и октябрь). Протокол OSPAR предписывает классифицировать найденные объекты по 146 отдельным категориям, группируя их по типу материала: пластик, бумага, металлы, стекло, резина и древесина. Важно отметить, что сигареты и сигаретные фильтры в настоящем исследовании включены в категорию «пластик» (Kataržytė et al., 2020; Zalewska et al., 2021), хотя по установленному протоколу они попадают в группу «бумага». Из 146 категорий мусора только 87 вошли в анализ. Под термином «категория OSPAR» понимаются именно эти 87 выбранных категорий, если не указано иное. Все замеры проводились в условиях спокойной погоды, исключая неблагоприятные, такие как шторм, снег или лед на песке. Наряду с крупным мусором фиксировались и мелкие элементы (размером от 0.1 до 2.5 см), такие как сигаретные фильтры и яркие визуально заметные предметы.

Ширина обследуемых участков определялась расстоянием от кромки воды до верхней границы полосы прибоя и составляла от 10 до 35 метров. Соответственно, площадь каждой обследованной площадки колебалась от 10 000 до 40 000 м², а совокупная площадь всех проведенных замеров составила 73 500 м² (для 26 выходов). Найденные образцы на поверхности пляжа собирались, упаковывались

и (для защиты образцов от любого удара, который мог бы привести к фрагментации после отбора) перевозились в лабораторию для последующей сортировки и анализа. Координаты обследованных участков регистрировались с помощью GPS-навигации.

При идентификации полимерного состава мусора использовалась комплексная методика, сочетающая традиционные макроскопические методы с инструментальным анализом. Первичная классификация образцов макропластика (>25 мм) осуществлялась методом визуальной идентификации с использованием маркировки производителя при ее наличии. Для идентификации полимерного состава образцов, не поддающихся визуальной классификации (включая деградировавшие фрагменты и частицы размером менее 5 мм), применяли ИК-Фурье спектроскопию (ИК-Фурье-спектрометр FT-801 с приставкой НПВО, спектральный диапазон 470 – 5700 см⁻¹, ПО, спектральная база данных). Метод позволил точно определить тип полимера по характеристическим спектральным сигналам даже для сильно разрушенных образцов. Спектроскопический анализ обеспечил надежную идентификацию без необходимости сложной пробоподготовки, что особенно важно для гетерогенных образцов морского происхождения.

Измерения размера и массы

В лаборатории каждый пакет вскрывали и оставляли высыхать на открытом воздухе при комнатной температуре. Далее из образцов удаляли весь песок, после чего измеряли «максимальный размер» образца (его самую длинную сторону) (аналогичная методика применена и описывается в работах [Lebreton et al., 2019](#); [Smith and Turrell, 2021](#)). Максимальная длина образца, приведенная в данной работе, – 100 см, объекты с размерами более 100 см также учитывались и заносились в протокол, но в дальнейших расчетах не учитывались.

Масса каждого предмета мусора измерялась с помощью электронных весов (предельная нагрузка 300 г, разрешение 0.005 г) и прецизионных весов (предельная нагрузка 2 кг, разрешение 0.05 г).

Отбор образцов мусора пластикового происхождения проводился в диапазоне от 0.1 см (1 мм) до 300 г. Нижний порог 1 мм, отличающийся от стандарта OSPAR (≥ 2.5 см), позволил включить в анализ мелкие фрагменты, образующиеся при деградации пластика. Верхний предел в 300 г исключил тяжелые крупногабаритные объекты (автомобильные покрышки, рыболовные сети и тралы, массивные фрагменты берегоукрепительных сооружений), что предотвратило статистическое искажение данных и соответствовало техническим возможностям лабораторного оборудования. Такой подход согласуется с практикой исследований, фокусирующихся на основной массе загрязнения ([Smith and Turrell, 2021](#); [Ryan et al., 2020](#)). Частицы <1 мм (микропластик) не рассматривались.

Для антропогенного морского мусора размерный диапазон составлял от 2 см до 100 см по наибольшему линейному измерению. Верхний и нижний весовые пороги

(0.005–300 г) соответствовали установленным для пластикового мусора, что обеспечивало сопоставимость результатов анализа всех категорий загрязнения. Такой подход позволил исключить из анализа как мелкие частицы (<2 см), не регламентированные протоколом OSPAR, так и редкие сверхкрупные объекты (>100 см), способные показать статистические показатели.

Автомобильные покрышки, пластиковые ящики, длинные рыболовецкие канаты и веревки, куски геотекстелей из берегоукрепительных сооружений (Есюкова и др., 2018; Chubarenko et al., 2022), мешки биг-бэги, кирпичи, рыболовный буй не учитывались в данной работе (взвешивание не производилось и размеры не фиксировались), т. к. доставить в лабораторию их не представлялось возможным, и их масса была больше 300 г (условный максимум в данной работе).

Для выявления пространственных закономерностей в распределении мусора все собранные фрагменты были систематизированы: каждый предмет относился к определенной категории и описывался по заранее установленным характеристикам. Для анализа массы и размерных характеристик предметов антропогенного морского мусора данные были объединены по всем участкам и за все четыре периода наблюдений. Объединение данных необходимо для получения статистически значимых результатов. Например, Ryan et al. (2020) объединили аналогичным образом данные о размере и массе объектов, полученных в ходе исследований, проведенных в течение 7 лет на одном участке на побережье Южной Африки, а Martins and Sobral (2011) объединили данные с пяти отдельных участков на побережье Португалии.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты исследований характеристик (размер, масса, распределение предметов) представлены в виде среднего значения \pm стандартное отклонение (медиана).

По результатам ежеквартальных обследований двух пляжей Калининградской области было собрано и взвешено 7927 предметов антропогенного мусора, из которых 4307 единиц приходятся на Куршскую косу и 3620 – на Балтийскую. Их общая масса составила 27.167 кг. При этом на пластиковые отходы пришлось 24 362 г (89.7 % от общей массы), что соответствует 7 379 предметам (90 % от общего количества). Таким образом, пластик являлся абсолютно доминирующим типом загрязнения как по массе, так и по численности. Минимальный размер предметов измеренного антропогенного морского мусора составил 2 см (железная крышка), более мелкие предметы не собирались и не измерялись, а максимальный размер – 150 см (железный ящик), что в среднем составило 2.6 ± 1.2 см.

Для пластикового мусора минимальный размер составил 0.1 см (яркая деталь оранжевого цвета) максимальный размер составил 100 см (тонкая нить от мешка биг-бэга), что в среднем составило 2.2 ± 0.9 см.

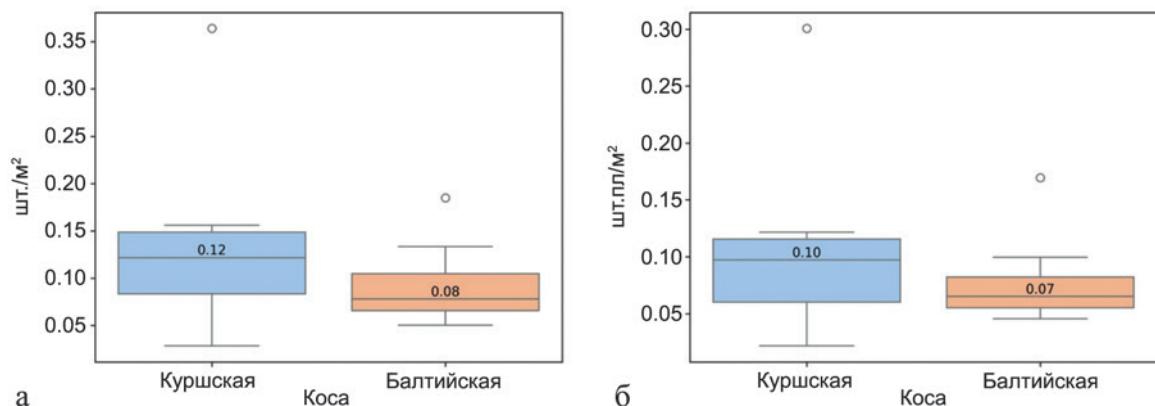


Рис. 2 – Распределение концентраций (шт./м²) антропогенного морского мусора для пляжей Куршской косы (синий цвет) и Балтийской косы (оранжевый цвет) за весь период наблюдений (а); Распределение концентраций (шт./м²) пластикового мусора для пляжей Куршской косы (синий цвет) и Балтийской косы (оранжевый цвет) за весь период наблюдений (б). Точками обозначены выбросы

Распределение антропогенного морского мусора на пляжах Балтийской и Куршской кос показано на рисунке 2а, где среднее значение – 0.12 ± 0.06 шт./м² для Куршской косы и 0.08 ± 0.06 шт./м² для Балтийской косы соответственно. Распределение пластикового мусора (рисунок 2б) практически не отличается и составляет 0.10 ± 0.06 шт./м² и 0.07 ± 0.02 шт./м². Такие невысокие показатели объясняются типом местности. Оба пляжа находятся в отдалении от основных туристических маршрутов. На территории обеих кос нет производств и промышленности. Полученные значения подтверждают ранее опубликованные результаты. Например, в работе (Fetisov et al., 2024), выполненной в этом же районе, показатели среднего значения антропогенного морского мусора составляют 0.11 ± 0.01 шт./м².

Распределение отдельно проанализированного пластикового мусора по сезонам (рисунок 3) за весь период исследования показывает, что максимальное число образцов найдено летом, как на Куршской косе (0.15 ± 0.07 шт./м²; 1454 шт.; 4074 г), так и Балтийской косе (0.11 ± 0.03 шт./м²; 1236 шт.; 6171 г). Это можно объяснить высоким притоком отдыхающих, активизацией туристической деятельности и увеличением количества оставляемого бытового мусора. На пляжах в летний период фиксируется большее количество пластиковых отходов, таких как упаковки продуктов питания, одноразовая посуда, пластиковые бутылки и пакеты. Минимальные количества найденных образцов мусора для пляжей отличаются: на Куршской косе зимой найдено (0.06 ± 0.03 шт./м²; 1210 шт.; 762 г), тогда как на Балтийской косе весной обнаружено (0.05 ± 0.03 шт./м²; 399 шт.; 3398 г). Зимой посещаемость пляжей отдыхающими минимальна, однако в эпизоды сильных зимних штормов фрагменты пластикового мусора, долгое время находившиеся на прибрежном склоне моря, выносятся волнами на пляж. Весной, вместе с весенними штормами, море продолжает поставлять на пляж деформированный и фрагментированный старый пластиковый мусор.

Осенью распределения всего антропогенного морского мусора на обоих пляжах оставалось примерно одинаковым: для Куршской косы (0.07 ± 0.04 шт./ m^2 ; 1197 шт.; 2025 г) и (0.06 ± 0.03 шт./ m^2 ; 1093 шт.; 3328 г) для Балтийской косы соответственно.

Для проверки гипотезы о стабильности количества антропогенного и, в частности, пластикового мусора в разные годы (2020–2022 гг.) были использованы статистические методы. Проверка нормального распределения выборок подтвердила, что каждая из выборок (за 2020, 2021 и 2022 годы) имеет распределение $p < 0.05$ (тест Шапиро-Уилка, уровень значимости $p < 0.05$). Непараметрический тест Краскела-Уоллиса для проверки равенства медианных значений показал ($p > 0.05$), что медианное количество обнаруженного мусора за исследуемый период (по годам) статистически не отличается.

Для анализа тенденции по изменению количества мусора на Куршской и Балтийской косах за период с 2019 по 2022 гг. использовался линейный регрессионный анализ. Полученные линейные тренды, описывающие изменчивость количества мусора (антропогенного и, в частности, пластикового) в штуках на квадратный метр (шт./ m^2) за исследуемый период, показали слабый убывающий тренд со скоростью примерно 0.01 шт./ m^2 в год. Однако все полученные тренды оказались статистически незначимыми ($p > 0.05$).

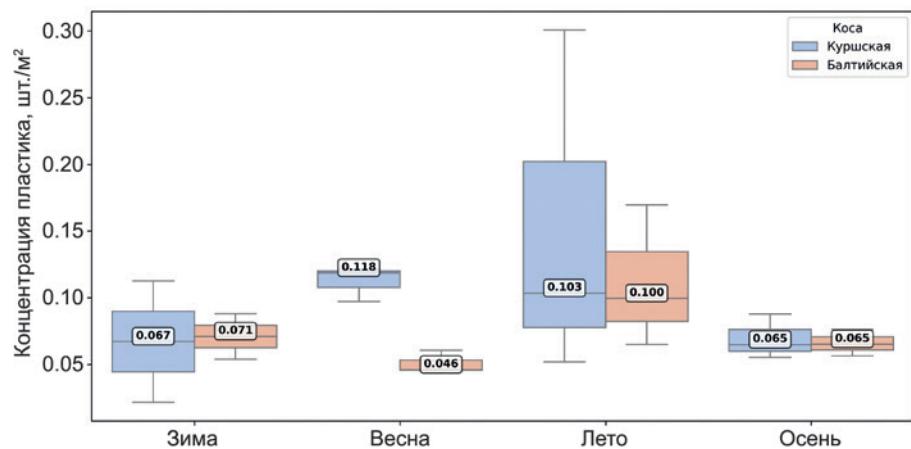


Рис. 3 – Распределение концентраций (шт./ m^2) пластикового мусора для пляжей Куршской и Балтийской кос в разные сезоны

Анализ материала (тест Краскела-Уоллиса, $p > 0.05$) не выявил статистически значимых сезонных различий в концентрациях пластикового мусора, хотя визуальный осмотр данных показал максимальные значения в летний период (0.103 и 0.100 шт./ m^2 на Куршской и Балтийской косах соответственно) и минимальные – весной на Балтийской косе (0.046 шт./ m^2). Показатели зимнего и осеннего сезонов занимали промежуточное положение и были практически идентичны. На Куршской косе весенний пик (0.118 шт./ m^2), напротив, стал наивысшим за весь период наблюдений, что подчеркивает высокую пространственно-временную вариабельность данных.

Среднее количество обнаруживаемых объектов пластикового мусора на Куршской косе в осенне-зимний период (0.13 шт./ m^2) несколько ниже, чем в весенне-летний (0.1 шт./ m^2), по среднему значению массы пластикового мусора различие более существенно, 460 г для осенне-зимнего сезона и 870 г для весенне-летнего соответственно. Данный факт подтверждает предположение о сильной фрагментации крупных объектов пластика в зимний штормовой период (Chubarenko et al., 2020; Чубаренко и др., 2021; Fetisov et al., 2024).

На рисунке 4 показано распределение собранного мусора по типам классификации OSPAR, включая пластиковый мусор как основную категорию. Средняя масса пластикового мусора составила 3.5 г (медианная масса 0.3 г). Наибольшей массой среди единичных предметов антропогенного морского мусора отличались фрагменты автомобильных покрышек и жестяные банки из-под консервов (максимальная масса одного предмета достигала 256 г). Средний размер антропогенного морского мусора составил 8.7 см (медиана 4 см).



Рис. 4 – Состав антропогенного морского мусора, собранного в ходе ежеквартальных обследований на двух пляжах Калининградской области с июля 2019 г. по октябрь 2022 г. (см. рисунок 1): а – процентное соотношение типов мусора по количеству единиц; б – процентное соотношение типов мусора по массе

Что касается процентного соотношения антропогенного морского мусора (рисунок 4), то пластик составлял примерно $89\text{--}90$ % от общего объема, независимо от того, измерялся ли он по количеству предметов или по массе. По количеству мусора резина, бумага/картон, металл, стекло/керамика, текстиль (одежда) и древесина составляли по $1\text{--}3$ % от общего объема, по массе преобладали резина (3.9 %) и металл (2.1 %). Полученные результаты показывают, что состав антропогенного морского мусора, выявляемый на основе мониторинга, изменяется в зависимости от выбранного показателя: критерий «количество» или «масса».

Причина этому – существенные различия в массе отдельных предметов в каждом из типов мусора. Например, легкие и малозаметные предметы вроде тонких нитей от мешков биг-бэгов, пеллет, крупинок пенополистирола или сигаретные фильтры могут находиться на пляжах в огромных количествах, но практически ничего не весить. И наоборот, массивные и громоздкие объекты, такие как рыболовные сети,

геотекстиль, металлические изделия – тяжелые, но их количество среди всего найденного мусора будет невелико.

Анализ состава пластикового загрязнения на Балтийском побережье (рисунок 5) показывает, что его основу формируют несколько ключевых полимеров. Наиболее распространенными из них являются полиэтилентерефталат (PET, 12 %), ацетат целлюлозы (CA, 11%), полистирол (PS, 10 %), полиэтилен (PE, 10 %) и полипропилен (PP, 9 %). Заметную долю также составляют карбон (композит, 5 %) и полиуретан (PUR, 5 %). Помимо доминирующих полимеров в образцах присутствуют иные синтетические материалы, каждый из которых вносит небольшой, но суммарно значимый вклад в общую картину загрязнения.

Важно отметить, что на пляжах часто встречался парафин (5 %) различных фракций и видов. Обычно это твердые маслянистые комки белого или бежевого цвета (реже желтого) с резким запахом нефтепродуктов. Выбросы парафина отмечены на различных побережьях, например, на побережьях Лигурийского моря (Северное Тирренское море) (Suaria et al., 2018), на берегах южной части северного моря (Lorenz et al., 2021) и на пляжах Балтийского моря (UEG, 2014; Esiukova, 2017). В настоящем исследовании парафин (углеводородные воски) регистрировался в качестве самостоятельной категории, отдельно от полимерного пластика. Данный методологический подход согласуется с современными рекомендациями, подробно обоснованными в ряде специализированных работ (Suaria et al., 2018; Lorenz et al., 2021). Как демонстрируют эти исследования, несмотря на визуальное сходство с некоторыми видами пластика, парафиновые агломераты имеют принципиально иное, нефтяное происхождение и химическую природу, относясь к ископаемым углеводородам. Их корректная идентификация и сепарация в данных мониторинга являются критически важными для точной оценки источников загрязнения.

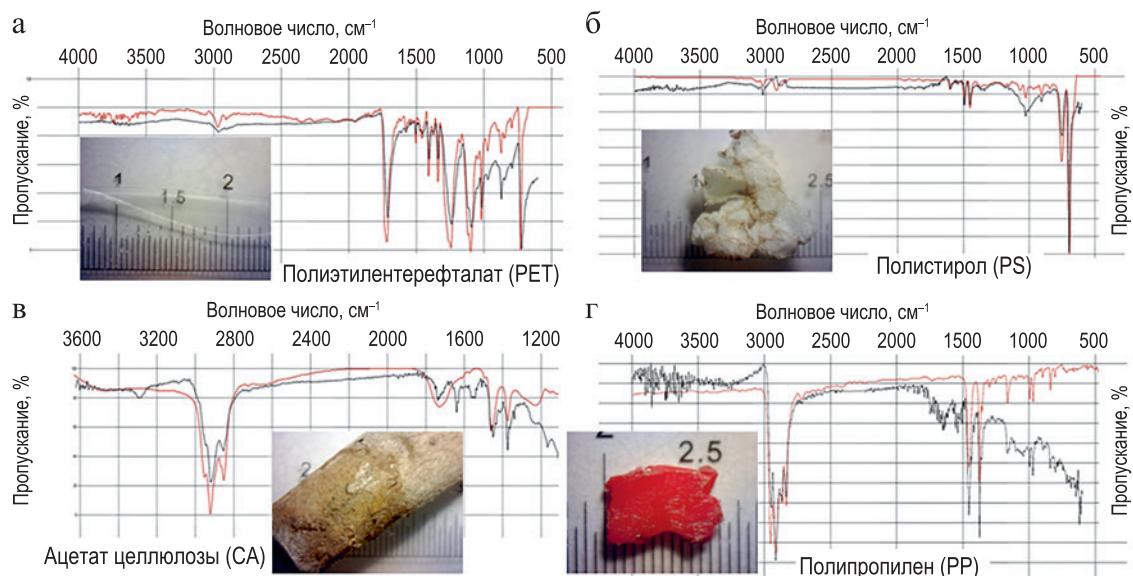


Рис. 5 – Спектры образцов пластика, собранных на пляжах, определенные с помощью ИК-Фурье спектрометра FT-801 и примеры пластиков: **а** – полиэтилентерефталат (PET), **б** – полистирол (PS), **в** – ацетат целлюлозы (CA), **г** – полипропилен (PP)

Значения количества пластикового мусора зависит от местоположения выбранного пляжа и времени года, при этом состав мусора остается достаточно однородным. Это указывает на то, что региональные различия в составе антропогенного морского мусора менее значительны, чем предполагалось ранее для региона Балтийского моря (Balčiūnas et al., 2014; Haseler et al., 2018; Schernewski et al., 2018; Kataržytė et al., 2020; Zalewska et al., 2021). Основным фактором, влияющим на различия в составе антропогенного морского мусора, является общее количество мусора, а не конкретные его категории или сезонность.

Таким образом, для комплексной оценки загрязнения пляжей необходимо учитывать оба этих параметра: и количество, и массу мусора (рисунок 6).

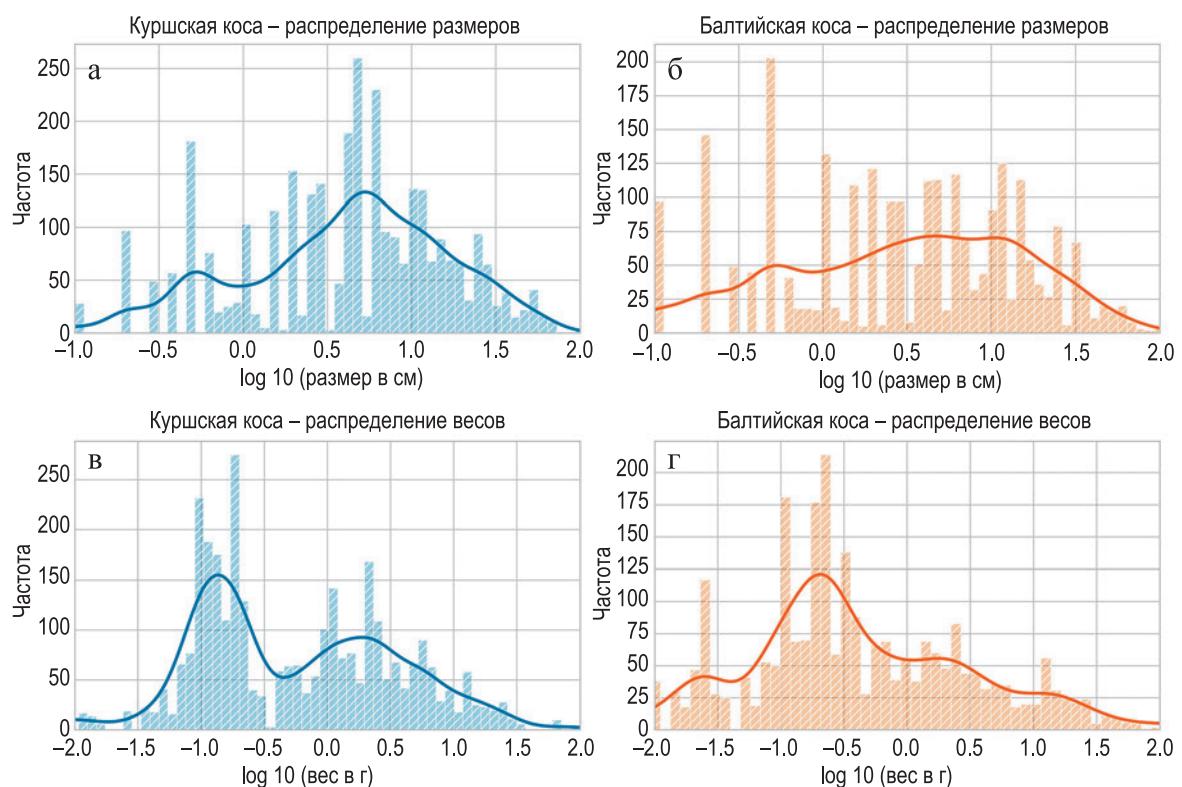


Рис. 6 – Распределение относительных частот пластикового мусора: индивидуальных размеров, см (а) и массы, г (в) для Куршской косы с июля 2019 г. по октябрь 2022 г.; индивидуальных размеров, см (б) и массы, г (г) для Балтийской косы с июля 2019 г. по октябрь 2022 г.

Графики распределения относительной частоты массы и размера пластикового мусора, найденного на двух пляжах Балтийской и Куршской кос, обобщены и представлены на рисунке 6. Анализ распределения мусора по размеру (от 0.01 до 100 см) на Куршской косе (рисунок 6а) показывает, что большинство предметов имеют небольшой размер (менее 1 см), а крупные предметы (более 10 см) встречаются редко.

Максимальная частота отмечена в диапазоне 1.3 см, где число предметов достигает 325 шт., следующий пик, где число найденных предметов достигает 268 шт., приходится на диапазон размеров от 10 до 12.5 см, с последующим резким спадом

частоты встречаемости для более крупных фракций. В сравнении с Куршской косой, на Балтийской косе (рисунок 6б) пик на графике отмечен в диапазоне около 0.5 см, где число найденных предметов достигает 215 шт., что меньше, чем на Куршской косе.

Распределение по размеру на Балтийской косе отличается от Куршской косы меньшим количеством мелких предметов и незначительно большим числом крупных. Несмотря на различия в количестве мелких и крупных предметов, общий характер распределения остается схожим: мелкие предметы преобладают над крупными. Это, возможно, указывает на то, что процессы фрагментации пластика и его накопления в морской среде имеют общие черты, независимо от конкретного участка побережья. Тем не менее, общий характер распределения все же сохраняется, с преобладанием мелких предметов.

График распределения массы для пластикового мусора (до 300 г) на Куршской косе (рисунок 6в) показывает, что большинство предметов имеют малую массу (менее 1 г), а крупные предметы встречаются редко. Логарифмическая шкала подчеркивает быстрое уменьшение количества крупных предметов по мере увеличения их массы. Крупные предметы, такие как пластиковые бутылки, канаты, мешки биг-бэги, встречаются на Куршской косе редко, что может быть связано с их более быстрым удалением (вымыванием) из прибрежной зоны, или же меньшей вероятностью попадания их на пляж. Для Балтийской косы пик частоты массы (рисунок 6г) находится в области низких значений – для 389 найденных предметов диапазон массы от 0.3 до 0.4 г.

Графики показывают, что на обоих участках побережья большая часть пластикового мусора представлена мелкими и легкими предметами, а крупные и тяжелые встречаются значительно реже. Это может свидетельствовать о процессах естественного износа, старения и фрагментации пластика в морской среде (Chubarenko et al., 2020), а также об огромном количестве достаточно легких предметов, наиболее часто оказывающихся на пляжах: сигаретные фильтры, пенополистирол, нити от канатов, обертки от конфет и т.д. Многочисленные наблюдения и исследования пластиковых объектов, плавающих в открытом океане, отмечают непрерывный рост количества мелких и легких предметов мусора диаметром более 1 мм (например, Cózar et al., 2017; Kaandorp et al., 2021).

Дискуссия

Полученные в настоящем исследовании данные согласуются с глобальной оценкой UNEP (2021), по которой пластик составляет порядка 85 % антропогенного морского мусора. Установленная доля пластикового мусора на пляжах Балтийской и Куршской кос (90 %) находится в верхней части диапазона значений, характерных для других регионов. Так, в акватории Балтийского моря аналогичные показатели варьируют от 63.8 % (Schernewski et al., 2018) до 88 % (Hengstmann et al., 2017), а за его

пределами – от 71 % в северо-восточной Атлантике (Anastácio et al., 2023) до 95.6 % в южной части Черного моря (Öztekin et al., 2020).

Примечательно, что даже в удаленных и малонаселенных районах, таких как архипелаг Новая Земля в Российской Арктике, пластик составляет значительную часть загрязнения – от 64 % до 79 % (Ershova et al., 2024). Несмотря на то, что этот показатель ниже, чем в урбанизированных акваториях (включая Балтийское море), повсеместное доминирование пластика в составе найденного на побережьях мусора подтверждает глобальный масштаб проблемы и повсеместное распространение данного типа загрязнителя.

При проведении мониторинга пластикового мусора на пляжах возникают определенные трудности при измерении и контроле массы и размера найденных объектов. Протокол мониторинга OSPAR устанавливает минимальный размер пластиковых частиц не менее 2.5 см, хотя наблюдатель может обнаружить (увидеть) и более мелкие фрагменты и частицы. Небольшие предметы особенно часто встречаются в прибойной зоне, где происходит механическая фрагментация пластикового мусора, и именно там можно обнаружить наиболее полный спектр размеров фрагментов – от макромусора до микропластика (<5 мм). Также многое зависит от опыта, внимания, умения и терпения наблюдателя, что вносит определенные корректировки в работу и конечный результат. Анализ результатов работы показывает, что эффективность обследования пляжей снижается по мере уменьшения размера частиц мусора.

Крупные фрагменты мусора могут также значительно повлиять на результаты (на характеристики «масса» и «размер»), но в то же время они вносят незначительный вклад в категорию «количество частиц». Эти проблемы уже были отмечены в исследовании (Smith and Turrell, 2021), где предлагается решить их путем установления минимального размера собираемых частиц (по методике OSPAR) и применять теоретические модели фрагментации для получения достоверных распределений массы и размеров изучаемых фрагментов. Процедура взвешивания образцов в лаборатории после мониторинга также имеет свои сложности. Необходимо использовать калиброванное оборудование для обеспечения высокой точности измерения и снижения риска ошибок, способное работать в широком диапазоне значений. Необходимо применять эффективные (иногда механические, технические и химические) методы для устранения различных типов загрязнения с поверхности собранного мусора (например, биообрастание водорослями, ракушками, моллюсками, микроорганизмами, а также загрязнение фракциями мазута, песка и глины, и пр.). Для некоторых видов мусора (канаты, биг-бэги, геотекстиль, сети и т.д.) такое загрязнение может быть значительным и трудноудаляемым. Масса мусора на пляже может значительно меняться в зависимости от наличия или отсутствия единственного крупного мусорного объекта на участке длиной 100 м.

Полученные в настоящем исследовании данные о попарных измерениях массы и размеров антропогенного морского мусора ($n = 7927$) поднимают фундаментальный методологический вопрос о возможности конвертации между количественными (шт./м²) и весовыми (г/м²) показателями загрязнения. Анализ литературы, в том

числе работы (Kaandorp et al., 2021), посвященной моделированию потоков морского мусора, однозначно свидетельствует о том, что прямая и универсальная конвертация между массой и количеством морского мусора некорректна. Как демонстрирует указанное исследование, соотношение между этими показателями является сложной функцией, зависящей от множества факторов, ключевым из которых выступает вещественный состав мусора. Такие параметры, как преобладание легких пластиковых фрагментов или тяжелых предметов из стекла и металла, кардинально меняют среднюю массу единицы мусора. Дополнительное влияние оказывают дистанция переноса, гидродинамические условия и степень фрагментации, определяющие размерный спектр частиц.

Заключение

Проведенный многолетний мониторинг (2019–2022 гг.) с использованием усовершенствованной методики протокола OSPAR позволил дать комплексную оценку загрязнения песчаных пляжей юго-восточной части Балтийского моря. Исследование подтвердило, что пластик является доминирующим загрязнителем, составляя 90 % от общего количества антропогенного морского мусора, как по численности, так и по массе, что согласуется с глобальными тенденциями пластикового загрязнения.

Установленный уровень загрязнения характеризуется как относительно низкий и стабильный (0.12 ± 0.08 шт./м² на Куршской косе и 0.08 ± 0.06 шт./м² на Балтийской косе), без статистически значимых временных трендов и сезонных колебаний. Несмотря на некоторое видимое увеличение количества мусора летом, устойчивых сезонных закономерностей за период 2019–2022 гг. не выявлено. Особую экологическую значимость имеет преобладание мелкой фракции (0.1–1 см, массой менее 1 г), что свидетельствует об интенсивной фрагментации крупных объектов под воздействием природных факторов.

Спектральный анализ выявил однородный полимерный состав с преобладанием PET (12 %), CA (11 %), PS (10 %), PE (10 %) и PP (9 %), указывающий на бытовое и рекреационное происхождение мусора.

Полученные масс-размерные распределения и данные о составе загрязнения имеют важное прикладное значение для решения задач математического моделирования процессов переноса, трансформации и накопления пластикового мусора в морской среде.

Собранный в ходе настоящей работы уникальный массив данных, содержащий синхронные измерения массы и размеров для почти 8000 объектов, создает основу для решения данной задачи применительно к условиям юго-восточной части Балтийского моря. В перспективе эти данные могут служить фундаментом для построения региональных регрессионных или машинно-обучаемых моделей, которые будут учитывать специфический состав мусора и характерные для региона распределения частиц по массам и размерам.

Таким образом, настоящее исследование фиксирует наличие методологического пробела и формирует необходимый эмпирический фундамент для его преодоления. Проведенный детальный анализ массо-размерных распределений служит первым шагом в данном направлении для акватории российского сектора Балтийского моря. В то же время мы сознательно воздерживаемся от выведения упрощенного коэффициента пересчета, поскольку его применение без учета композиционного состава загрязнения было бы научно необоснованным и могло бы привести к значительным ошибкам в оценках баланса масс пластика в окружающей среде.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025).

Список литературы

1. Есюкова Е. Е., Чубаренко Б. В., Бурнашов Е. М. Геосинтетические материалы как источник загрязнения пластиковым мусором морской среды // Региональная экология. 2018. № 3 (53). С. 15–28. EDN: [YTXOFN](https://doi.org/10.30694/1026-5600-2018-3-15-28). <https://doi.org/10.30694/1026-5600-2018-3-15-28>
2. Зобков М. Б., Зобкова М. В. Загрязнение водосборов малых озер Карелии антропогенным мусором в результате рекреационной деятельности // Географический вестник. 2024. № 4 (71). С. 133–144. EDN: [KBTJEM](https://doi.org/10.17072/2079-7877-2024-4-133-144). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2024-4-133-144>
3. Лобчук О. И., Килесо А. В. Пространственное распределение и источники антропогенного морского мусора на побережье Калининградской области // Гидрометеорология и экология. 2020. №. 61. С. 521–533. EDN: [SZNHSC](https://doi.org/10.33933/2074-2762-2020-61-521-533). <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2020-61-521-533>
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. ISBN 978-5-91522-513-7. EDN: [ROUYQE](https://doi.org/10.1016/j.rouyqe)
5. Alvarez S., Gestoso I., Herrera A., Riera L. and Canning-Clode J. A comprehensive first baseline for marine litter characterization in the Madeira Archipelago (NE Atlantic) // Water, Air, & Soil Pollution. 2020. Vol. 231. No. 4. 182 p. EDN: [NROODO](https://doi.org/10.1007/s11270-020-04517-x). <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04517-x>
6. Anastacio J., Candeias J. M., Cabral H., Domingos I. Relationships between marine litter and type of coastal area, in Northeast Atlantic sandy beaches // Mar. Environ. Res. 2023. No. 183. EDN: [CKXCPT](https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105827). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105827>
7. Andrade A. The plastic in microplastics: A review // Mar. Pollut. Bull. 2017. Vol. 119. No. 1. P. 12–22. EDN: [YGJTEU](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>
8. Anfuso G., Bolívar-Anillo H. J., Asensio-Montesinos F., Manzolli R. P., Portz L., Daza D. Beach litter distribution in Admiralty Bay, King George Island, Antarctica // Mar. Pollut. Bull. 2020. No. 160. 111657. EDN: [SRHNXN](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111657). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111657>
9. Balčiūnas A., Blažauskas N. Scale, origin and spatial distribution of marine litter pollution in the Lithuanian coastal zone of the Baltic Sea // BALTICA. 2014. Vol. 27. No. 2. P. 39–44. <https://doi.org/10.5200/baltica.2014.27.14>
10. Beaumont N. J., Aanesen M., Austen M. C., Börger T., Clark J. R., Cole M. Global ecological, social and economic impacts of marine plastic // Mar. Pollut. Bull. 2019. No. 142. P. 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.022>

11. Browne M., Galloway T., Thompson R. Spatial Patterns of Plastic Debris along Estuarine Shorelines // Environmental Science & Technology. 2010. Vol. 44. No. 9. P. 3404–3409. EDN: OBQEFT. <https://doi.org/10.1021/es903784e>
12. Chubarenko B., Kileso A., Esiukova E., Pinchuk V., Simon F.-G. Dataset on geosynthetic material debris contamination of the South-East Baltic shore // Data in Brief. 2022. No. 40. 107778. EDN: OZTLAR. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107778>
13. Chubarenko I., Efimova I., Bagaeva M., Bagaev A., Isachenko I. On mechanical fragmentation of single-use plastics in the sea swash zone with different types of bottom sediments: insights from laboratory experiments // Mar. Pollut. Bull. 2020. No. 150. 110726. EDN: VRLIWH. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110726>
14. Cózar A., Martí E., Duarte C. M., García-de-Lomas J., Van Sebille E., Ballatore T. J., et al. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation // Sci. Adv. 2017. Vol. 3. No. 4. EDN: YDCPDN. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600582>
15. Domnin D., Chubarenko B., Grave A. Baseline assessment of beach cast appearance in the South-Eastern Baltic by video monitoring at a pilot site in the Kaliningrad Oblast (Russia) // Mar. Pollut. Bull. 2021. No. 173. 112994. EDN: RAGGKP. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112994>
16. Ershova A., Vorotnichenko E., Gordeeva S., Ruzhnikova N., Trofimova A. Beach litter composition, distribution patterns and annual budgets on Novaya Zemlya archipelago, Russian Arctic // Mar. Pollut. Bull. 2024. Vol. 204. 116517. EDN: WJUZMT. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116517>
17. Esiukova E. Plastic pollution on the Baltic beaches of Kaliningrad region, Russia // Mar. Pollut. Bull. 2017. Vol. 114. No. 2. P. 1072–1080. EDN: MZKPDJ. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.001>
18. European Commission, Joint Research Centre // Guidance on the Monitoring of Marine Litter in European Seas – An Update to Improve the Harmonised Monitoring of Marine Litter Under the Marine Strategy Framework Directive. Publications Office of the European Union. 2023. <https://doi.org/10.2760/59137>
19. Fanini L., Defeo O., Elliott M., Paragkamia S., Pinna M., Salvo V.-S. Coupling beach ecology and macroplastics litter studies: Current trends and the way ahead // Mar. Pollut. Bull. 2021. No. 173. 112951. EDN: QEJWCK. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112951>
20. Fetisov S., Esiukova E., Lobchuk O., Chubarenko I. Abundance and mass of plastic litter on sandy shore: Contribution of stormy events // Mar. Pollut. Bull. 2024. No. 207. 116911. EDN: UBVHZA. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116911>
21. Galgani F., Hanke G., Maes T. “Global distribution, composition and abundance of marine litter,” in Marine Anthropogenic Litter, eds M. Bergmann, L. Gutow, and M. Klages (New York, NY: Springer. 2015. P. 29–56. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_2
22. GESAMP (2019). Guidelines or the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean [Kershaw P. J., Turra A. and Galgani F. eds] (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). In: Rep. Stud. GESAMP. No. 99. 130 p. <http://www.gesamp.org/publications/guidelines-for-the-monitoring-and-assessment-of-plastic-litter-in-the-ocean>
23. González-Fernández D., Cózar A., Hanke G., Viejo J., Morales-Caselles C., Bakiu R., et al. Floating macrolitter leaked from Europe into the ocean // Nature. Sustainability. 2021. Vol. 4. No. 6. P. 474–483. EDN: YZFRMK. <https://www.nature.com/articles/s41893-021-00722-6>
24. Grundlehner A., Diepens N., Linders T., Peeters E., Koelmans A. Towards continuous mass and size distributions for beach plastic litter: Spatiotemporal analyses of abundance and

- composition // Journal of Hazardous Materials. 2023. No. 458. 131984. EDN: YTEDJU. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131984>
25. *Gu Q., Zhang H., Chen Y., Li T.* Mapping the spatiotemporal patterns of beach litter on UK beaches from 2000 to 2016: An emerging hot spot analytical approach // Trans GIS. 2022. Vol. 26. No. 3. P. 1318–1338. EDN: IECWCM. <https://doi.org/10.1111/tgis.12906>
26. *Guerrero-Meseguer L., Veiga P., Rubal M.* Spatio-temporal variability of anthropogenic and natural wrack accumulations along the driftline: marine litter overcomes wrack in the northern sandy beaches of Portugal // J. Mar. Sci. Eng. 2020. Vol. 8. No. 15. P. 1–15. EDN: XBRRTL. <https://doi.org/10.3390/jmse8120966>
27. *Haseler M., Schernewski G., Balciunas A., Sabaliauskaite V.* Monitoring methods for large micro- and meso-litter and applications at Baltic beaches // J. Coast. Conserv. 2018. Vol. 22. No. 1. P. 27–50. EDN: YCXPXV. <https://doi.org/10.1007/s11852-017-0497-5>
28. *Hengstmann E., Gräwe D., Tamminga M. and Fischer E. K.* Marine litter abundance and distribution on beaches on the Isle of Rügen considering the influence of exposition, morphology and recreational activities // Mar. Pollut. Bull. 2017. Vol. 115. Iss. 1–2. P. 297–306. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.026>
29. *Holden J. J., MacNeill S. K., Juanes F., Dudas S. E.* Beach-cast deposition and commercial harvesting of a non-indigenous alga, *Mazzaella japonica*: implications for macrofauna communities in Baynes sound, British Columbia // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2018. Vol. 210. P. 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.06.008>
30. *Isachenko I., Esiukova E., Chubarenko I.* Beach-cast appearance on the tide-less sea shore: parameters of favoring surface waves // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2023. No. 281. 108219. EDN: EUEFFO. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108219>
31. *Jambeck J. R., Geyer R., Wilcox C., Siegle T. R., Perryman M., Andrade A.* Plastic waste inputs from land into the ocean // Science. 2015. Vol. 347. Iss. 6223. P. 768–771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
32. *Kaandorp M. L. A., Ypma S. L., Boonstra M., Dijkstra H. A., and van Sebille E.* Using machine learning and beach cleanup data to explain litter quantities along the Dutch North Sea coast // Ocean science. 2021. Vol. 18. No. 1. EDN: JPAQKU. <https://doi.org/10.5194/os-18-269-2022>
33. *Kataržytė M., Balciunas A., Haseler M., Sabaliauskaite V., Lauciute L., Stepanova K., et al.* Cigarette butts on Baltic Sea beaches: Monitoring, pollution and mitigation measures // Mar. Pollut. Bull. 2020. No. 156. 111248. EDN: FUDQOX. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111248>
34. *Lebreton L., Egger M., Slat B.* A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean // Sci. Rep. 2019. Vol. 9. No. 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>
35. *Lenz M., Brennecke D., Haeckel M., Knickmeier K., Kossel E.* Spatio-temporal variability in the abundance and composition of beach litter and microplastics along the Baltic Sea coast of Schleswig-Holstein, Germany // Mar. Pollut. Bull. 2023. No. 190. 114830. EDN: HQOIJX. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114830>
36. *Lorenz C., Schafberg M., Roscher L., Meyer M. S., Primpke S., Kraus U. R., Gerdts G.* Paraffin and other petroleum waxes in the southern North Sea // Mar. Pollut. Bull. 2021. No. 162. 111807. EDN: GTLFBW. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111807>
37. *Maes T., Barry J., Leslie H., Vethaak A., Nicolaus E., Law R. et al.* Below the surface: twenty-five years of seafloor litter monitoring in coastal seas of North West Europe (1992–2017) // Sci. Tot. Environ. 2018. No. 630. P. 790–798. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.245>
38. *Martins J., Sobral P.* Plastic marine debris on the Portuguese coastline: a matter of size? // Mar. Pollut. Bull. 2011. Vol. 62. No. 12. P. 2649–2653. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.028>

39. *Nguyen D., Nguyen M. Ky., Pham M. T. et al.* Investigating macro marine litter and beach cleanliness along Southern Vietnam beaches // Mar. Pollut. Bull. 2025. Vol. 212. Iss. 5–6. 117566. EDN: [VZDFPV](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117566). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117566>
40. *Onink V., Jongedijk C. E., Hoffman M. J., Van Sebille E., Laufkötter C.* Global simulations of marine plastic transport show plastic trapping in coastal zones // Environ. Res. Lett. 2021. Vol. 16. No. 6. 064053. EDN: [WJSIUJ](https://doi.org/10.1088/1748-9326/abecbd). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abecbd>
41. *Öztekin A., Bat L., Baki O. G.* Beach Litter Pollution in Sinop Sarikum Lagoon Coast of the Southern Black Sea // Turk. J. Fish. & Aquat. Sci. 2020. Vol. 20. No. 3. P. 197–205. EDN: [DQTAHO](https://doi.org/10.4194/1303-2712-v20_3_04). https://doi.org/10.4194/1303-2712-v20_3_04
42. *Ryan P. G., Weideman E. A., Perold V., and Moloney C. L.* Toward balancing the budget: surface macro plastics dominate the mass of particulate pollution stranded on beaches // Front. Mar. Sci. 2020. No. 7. 929. EDN: [ESWLIV](https://doi.org/10.3389/fmars.2020.575395). <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.575395>
43. *Schernewski G., Balciunas A., Gräwe D., Gräwe U., Klesse K., Schul M., Wesnigk S., Fleet D., Haseler M., Möllman N., Werner S.* Beach macro-litter monitoring on southern Baltic beaches: results, experiences and recommendations // J. Mar. Coast. Conserv. 2018. Vol. 22. P. 5–25. EDN: [SNTNLW](https://doi.org/10.1007/s11852-016-0489-x). <https://doi.org/10.1007/s11852-016-0489-x>
44. *Schulz M., Neumann D., Fleet D. M., Matthies M.* A multi-criteria evaluation system for marine litter pollution based on statistical analyses of OSPAR beach litter monitoring time series // Mar. Environ. Res. 2013. No. 92. P. 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.08.013>
45. *Schulz M., van Loon W., Fleet D. M., Baggelaar P., van der Meulen E.* OSPAR standard method and software for statistical analysis of beach litter data // Mar. Pollut. Bull. 2017. No. 122. Iss. 1–2. P. 166–175. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.045>
46. *Smith L., Turrell W. R.* Monitoring plastic beach litter by number or by weight: The Implications of fragmentation // Frontiers in Marine Science. 2021. No. 8. 702570. EDN: [TXGXSS](https://doi.org/10.3389/fmars.2021.702570). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.702570>
47. *Suaria G., Aliani S., Merlino S., Abbate M.* The occurrence of paraffin and other petroleum waxes in the marine environment: A review of the current legislative framework and shipping operational practices // Frontiers in Marine Science. 2018. Vol. 5. No. MAR. 94 p. EDN: [YGPYLZ](https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00094). <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00094>
48. UEG, 2014. Pollution of the North and Baltic Seas with Paraffin. Independent Environmental Group of Experts “Consequences of Pollution Incidents” (UEG) – Opinion dated 22 July 2014. Available at: <http://www.bfr.bund.de/cm/349/pollution-of-the-north-and-baltic-seas-with-paraffin.pdf>
49. UNEP. Comprehensive Assessment on Marine Litter and Plastic Pollution Confirms Need for Urgent Global Action. United Nations environmental Programme. 2021. <https://www.unep.org>
50. *Wenneker B., Oosterbaan L.* Guideline for Monitoring Marine Litter on the Beaches in the OSPAR Maritime Area, Edition 1.0. OSPAR Commission. 2010. <https://doi.org/10.25607/OPB-968>
51. *Zalewska T., Maciak J., Grajewska A.* Spatial and seasonal variability of beach litter along the southern coast of the Baltic Sea in 2015–2019. Recommendations for the environmental status assessment and measures // Science of The Total Environment. 2021. 774. 145716. EDN: [SLKSYC](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145716). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145716>

Статья поступила в редакцию 18.07.2025, одобрена к печати 01.12.2025.

Для цитирования: Лобчук О. И., Килесо А. В., Есюкова Е. Е. Загрязнение песчаных пляжей юго-восточной Балтики антропогенным морским мусором: результаты многолетнего мониторинга по протоколу OSPAR с оценкой массы и размеров // Океанологические исследования. 2025. Т. 53 № 4. С. 136–158. [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(4\).8](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(4).8)

**ANTHROPOGENIC MARINE LITTER ON SANDY BEACHES
OF THE SOUTHEASTERN BALTIC:
FINDINGS FROM A LONG-TERM OSPAR PROTOCOL
MONITORING OF MASS AND SIZE DISTRIBUTION**

O. I. Lobchuk¹, A. V. Kiles^{1,2}, E. E. Esiukova¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia;

² Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Immanuel Kant Baltic Federal University”,
14, Alexander Nevsky str., Kaliningrad, 236016, Russia,
*e-mail: lobchuk_olga@mail.ru

A comprehensive assessment of anthropogenic litter pollution on sandy beaches in the southeastern Baltic Sea was conducted based on a multi-year monitoring program (2019–2022) using an expanded OSPAR protocol. A total of 7,927 litter items were collected and analyzed from two model beaches (the Curonian and Baltiysk Spits). The dominance of plastic pollution was established, accounting for 90 % of the total litter items. The density of anthropogenic litter was 0.12 ± 0.08 items/m² on the Curonian Spit and 0.08 ± 0.06 items/m² on the Baltiysk Spit. For the first time in the region, detailed mass-size characteristics of plastic litter were obtained, revealing a predominance of particles sized 0.1–1 cm with a mass of less than 1 g. Spectral analysis identified a homogeneous polymer composition dominated by PET (12 %), CA (11 %), PS (10 %), PE (10 %), and PP (9 %). Statistical analysis showed no significant temporal trends or seasonal fluctuations in pollution levels. The obtained data are of great importance for developing models of the transport and transformation of plastic litter in the marine environment and can serve as a basis for improving the marine litter monitoring system.

Keywords: Baltic Sea, anthropogenic litter, mass, size, monitoring, OSPAR Convention, Kaliningrad Oblast’

Acknowledgement: The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for I0 RAS (theme No. FMWE-2024-0025).

References

1. Álvarez, S., I. Gestoso, A. Herrera, L. Riera, and J. Canning-Clode, 2020: A comprehensive first baseline for marine litter characterization in the Madeira Archipelago (NE Atlantic). *Water, Air, & Soil Pollution*, **231** (4), 182 p., EDN: NROODO, <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04517-x>
2. Anastacio, J., J. M. Candeias, H. Cabral, and I. Domingos, 2023: Relationships between marine litter and type of coastal area, in Northeast Atlantic sandy beaches. *Marine Environmental Research*, **183**, 105827, EDN: CKXCPT, <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105827>
3. Andrade, A. 2017: The plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin*, **119** (1), 12–22, EDN: YGJTEU, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>
4. Anfuso, G., H. J. Bolívar-Anillo, F. Asensio-Montesinos, R. P. Manzolli, L. Portz, and D. Daza, 2020: Beach litter distribution in Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Marine Pollution Bulletin*, **160**, 111657, EDN: SRHNXN, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111657>

5. Balčiūnas, A. and N. Blažauskas, 2014: Scale, origin and spatial distribution of marine litter pollution in the Lithuanian coastal zone of the Baltic Sea. *BALTICA*, **27** (2), 39–44, <https://doi.org/10.5200/baltica.2014.27.14>
6. Beaumont, N. J., M. Aanesen, M. C. Austen, T. Börger, J. R. Clark, and M. Cole, 2019: Global ecological, social and economic impacts of marine plastic. *Marine Pollution Bulletin*, **142**, 189–195, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.022>
7. Browne, M., T. Galloway, and R. Thompson, 2010: Spatial Patterns of Plastic Debris along Estuarine Shorelines. *Environmental Science & Technology*, **44** (9), 3404–3409, EDN: OBQEFT, <https://doi.org/10.1021/es903784e>
8. Chubarenko, B., A. Kileso, E. Esiukova, V. Pinchuk, and F.-G. Simon, 2022: *Dataset on geosynthetic material debris contamination of the South-East Baltic shore. Data in Brief*, **40**, 107778, EDN: OZTLAR, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107778>
9. Chubarenko, I., I. Efimova, M. Bagaeva, A. Bagaev, and I. Isachenko, 2020: On mechanical fragmentation of single-use plastics in the sea swash zone with different types of bottom sediments: insights from laboratory experiments. *Marine Pollution Bulletin*, **150**, 110726, EDN: VRLIWH, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110726>
10. Chubarenko, I. P., E. E. Esiukova, L. I. Khatmullina, O. I. Lobchuk, I. A. Isachenko, and T. V. Bukanova, 2021: *Microplastic in the marine environment*. Moscow, Nauchnyi Mir, 520 p., ISBN 978-5-91522-513-7, EDN: ROYQE
11. Cózar, A., E. Martí, C. M. Duarte, J. García-de-Lomas, E. Van Sebille, and T. J. Ballatore et al., 2017: The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation. *Science Advances*, **3** (4), e1600582, EDN: YDCPDN, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600582>
12. Domnin, D., B. Chubarenko, and A. Grave, 2021: Baseline assessment of beach cast appearance in the South-Eastern Baltic by video monitoring at a pilot site in the Kaliningrad Oblast (Russia). *Marine Pollution Bulletin*, **173**, 112994, EDN: RAGGKP, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112994>
13. Ershova, A., E. Vorotnichenko, S. Gordeeva, N. Ruzhnikova, and A. Trofimova, 2024: Beach litter composition, distribution patterns and annual budgets on Novaya Zemlya archipelago, Russian Arctic. *Marine Pollution Bulletin*, **204**, 116517, EDN: WJUZMT, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116517>
14. Esiukova, E., 2017: Plastic pollution on the Baltic beaches of Kaliningrad region, Russia. *Marine Pollution Bulletin*, **114** (2), 1072–1080, EDN: MZKPDJ, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.001>
15. Esiukova, E. E., B. V. Chubarenko, and E. M. Burnashov, 2018: Geosynthetic materials as a source of plastic pollution in the marine environment. *Regional Ecology*, **3** (53), 15–28, EDN: YTXOFN, <https://doi.org/10.30694/1026-5600-2018-3-15-28>
16. European Commission, Joint Research Centre. 2023: *Guidance on the Monitoring of Marine Litter in European Seas – An Update to Improve the Harmonised Monitoring of Marine Litter Under the Marine Strategy Framework Directive*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/59137>
17. Fanini, L., O. Defeo, M. Elliott, S. Paragkamia, M. Pinna, and V. S. Salvo, 2021: Coupling beach ecology and macroplastics litter studies: Current trends and the way ahead. *Marine Pollution Bulletin*, **173**, 112951, EDN: QEJWCK, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112951>
18. Fetisov, S., E. Esiukova, O. Lobchuk, and I. Chubarenko, 2024: Abundance and mass of plastic litter on sandy shore: Contribution of stormy events. *Marine Pollution Bulletin*, **207**, 116911, EDN: UBVHZA, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116911>

19. Galgani, F., G. Hanke, and T. Maes, 2015: *Global distribution, composition and abundance of marine litter*. In: Bergmann M., Gutow L., Klages M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham, 29–56, https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_2
20. GESAMP. 2019: Guidelines for the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean. (Kershaw P. J., Turra A. and Galgani F. eds). (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP, **99**, 130 p., <http://www.gesamp.org/publications/guidelines-for-the-monitoring-and-assessment-of-plastic-litter-in-the-ocean>
21. González-Fernández, D., A. Cázar, G. Hanke, J. Viejo, C. Morales-Caselles, and R. Bakiu et al., 2021: Floating macrolitter leaked from Europe into the ocean. *Nature Sustainability*, **4** (6), 474–483, EDN: [YZFRMK](https://doi.org/10.1038/s41893-021-00722-6), <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00722-6>
22. Grundlehner, A., N. Diepens, T. Linders, E. Peeters, and A. Koelmans, 2023: Towards continuous mass and size distributions for beach plastic litter: Spatiotemporal analyses of abundance and composition. *Journal of Hazardous Materials*, **458**, 131984, EDN: [YTEDJU](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131984), <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131984>
23. Gu, Q., H. Zhang, Y. Chen, and T. Li, 2022: Mapping the spatiotemporal patterns of beach litter on UK beaches from 2000 to 2016: An emerging hot spot analytical approach. *Transactions in GIS*, **26** (3), 1318–1338, EDN: [IECWCM](https://doi.org/10.1111/tgis.12906), <https://doi.org/10.1111/tgis.12906>
24. Guerrero-Meseguer, L., P. Veiga, and M. Rubal, 2020: Spatio-temporal variability of anthropogenic and natural wrack accumulations along the driftline: marine litter overcomes wrack in the northern sandy beaches of Portugal. *Journal of Marine Science and Engineering*, **8** (15), 1–15, EDN: [XBRRTL](https://doi.org/10.3390/jmse8120966), <https://doi.org/10.3390/jmse8120966>
25. Haseler, M., G. Schernewski, A. Balciunas, and V. Sabaliauskaitė, 2018: Monitoring methods for large micro- and meso-litter and applications at Baltic beaches. *Journal of Coastal Conservation*, **22** (1), 27–50, EDN: [YCXPXV](https://doi.org/10.1007/s11852-017-0497-5), <https://doi.org/10.1007/s11852-017-0497-5>
26. Hengstmann, E., D. Gräwe, M. Tamminga, and E. K. Fischer, 2017: Marine litter abundance and distribution on beaches on the Isle of Rügen considering the influence of exposition, morphology and recreational activities. *Marine Pollution Bulletin*, **115** (1–2), 297–306, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.026>
27. Holden, J. J., S. K. MacNeill, F. Juanes, and S. E. Dudas, 2018: Beach-cast deposition and commercial harvesting of a non-indigenous alga, *Mazzaella japonica*: implications for macrofauna communities in Baynes sound, British Columbia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **210**, 162–171, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.06.008>
28. Isachenko, I., E. Esiukova, and I. Chubarenko, 2023: Beach-cast appearance on the tide-less sea shore: parameters of favoring surface waves. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **281**, 108219, EDN: [EUEFFO](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108219), <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108219>
29. Jambeck, J. R., R. Geyer, C. Wilcox, T. R. Siegler, M. Perryman, and A. Andrade, 2015: *Plastic waste inputs from land into the ocean*. *Science*, **347** (6223), 768–771, <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
30. Kaandorp, M. L. A., S. L. Ypma, M. Boonstra, H. A. Dijkstra, and E. van Sebille, 2021: Using machine learning and beach cleanup data to explain litter quantities along the Dutch North Sea coast. *Ocean science*, 2021, **18** (1), EDN: [JPAQKU](https://doi.org/10.5194/os-18-269-2022), <https://doi.org/10.5194/os-18-269-2022>
31. Katarzyte, M., A. Balciunas, M. Haseler, V. Sabaliauskaitė, L. Lauciute, and K. Stepanova et al. 2020: Cigarette butts on Baltic Sea beaches: Monitoring, pollution and mitigation measures. *Marine Pollution Bulletin*, **156**, 111248, EDN: [FUDQOX](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111248), <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111248>
32. Lebreton, L., M. Egger, and B. Slat, 2019: A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Scientific Reports*, **9** (1), 1–10, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>

33. Lenz, M., D. Brennecke, M. Haeckel, K. Knickmeier, and E. Kossel, 2023: Spatio-temporal variability in the abundance and composition of beach litter and microplastics along the Baltic Sea coast of Schleswig-Holstein, Germany. *Marine Pollution Bulletin*, **190**, 114830, EDN: HQQIJX, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114830>
34. Lobchuk, O. I. and A. V. Kiles, 2020: Spatial distribution and sources of anthropogenic marine litter on the coast of the Kaliningrad region. *Hydrometeorology and Ecology*, **61**, 521–533, EDN: SZNHSC, <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2020-61-521-533>
35. Lorenz, C., M. Schafberg, L. Roscher, M. S. Meyer, S. Primpke, U. R. Kraus, and G. Gerdts, 2021: Paraffin and other petroleum waxes in the southern North Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **162**, 111807, EDN: GTLFBW, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111807>
36. Maes, T., J. Barry, H. Leslie, A. Vethaak, E. Nicolaus, and R. Law et al. 2018: Below the surface: twenty-five years of seafloor litter monitoring in coastal seas of North West Europe (1992–2017). *Science of The Total Environment*, **630**, 790–798, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.245>
37. Martins, J. and P. Sobral, 2011: Plastic marine debris on the Portuguese coastline: a matter of size? *Marine Pollution Bulletin*, **62** (12), 2649–2653, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.028>
38. Nguyen, D., M. Ky. Nguyen, and M. T. Pham et al., 2025: Investigating macro marine litter and beach cleanliness along Southern Vietnam beaches. *Marine Pollution Bulletin*, **212** (5–6), 117566, EDN: VZDFPV, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117566>
39. Onink, V., C. E. Jongedijk, M. J. Hoffman, E. Van Sebille, and C. Laufkötter, 2021: Global simulations of marine plastic transport show plastic trapping in coastal zones. *Environmental Research Letters*, **16** (6), 064053, EDN: WJSIUJ, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abecbd>
40. Öztekin, A., L. Bat, and O. G. Baki, 2020: Beach Litter Pollution in Sinop Sarikum Lagoon Coast of the Southern Black Sea. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **20** (3), 197–205, EDN: DQTAHO, https://doi.org/10.4194/1303-2712-v20_3_04
41. Ryan, P. G., E. A. Weideman, V. Perold, and C. L. Moloney, 2020: Toward balancing the budget: surface macro plastics dominate the mass of particulate pollution stranded on beaches. *Frontiers in Marine Science*, **7**, 575395, EDN: ESWLIV, <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.575395>
42. Schernewski, G., A. Balciunas, D. Gräwe, U. Gräwe, K. Klesse, and M. Schul et al., 2018: Beach macro-litter monitoring on southern Baltic beaches: results, experiences and recommendations. *Journal of Coastal Conservation*, **22** (1), 5–25, EDN: SNTNLW, <https://doi.org/10.1007/s11852-016-0489-x>
43. Schulz, M., D. Neumann, D. M. Fleet, and M. Matthies, 2013: A multi-criteria evaluation system for marine litter pollution based on statistical analyses of OSPAR beach litter monitoring time series. *Marine Environmental Research*, **92**, 61–70, <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.08.013>
44. Schulz, M., W. van Loon, D. M. Fleet, P. Baggelaar, and E. van der Meulen, 2017: OSPAR standard method and software for statistical analysis of beach litter data. *Marine Pollution Bulletin*, **122** (1–2), 166–175, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.045>
45. Smith, L. and W. R. Turrell, 2021: Monitoring Plastic Beach Litter by Number or by Weight: The Implications of Fragmentation. *Frontiers in Marine Science*, **8**, 702570, EDN: TXGXSS, <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.702570>
46. Suaria, G., S. Aliani, S. Merlino, and M. Abbate, 2018: The Occurrence of Paraffin and Other Petroleum Waxes in the Marine Environment: A Review of the Current Legislative Framework and Shipping Operational Practices. *Frontiers in Marine Science*, **5**, MAR., 94, EDN: YGPYLZ, <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00094>
47. UEG. 2014: Pollution of the North and Baltic Seas with Paraffin. Independent Environmental Group of Experts “Consequences of Pollution Incidents” (UEG) – Opinion dated 22 July 2014. Available at: <http://www.bfr.bund.de/cm/349/pollution-of-the-north-and-baltic-seas-with-paraffin.pdf>

48. UNEP. 2021: Comprehensive Assessment on Marine Litter and Plastic Pollution Confirms Need for Urgent Global Action. United Nations Environmental Programme. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>
49. Wenneker, B. and L. Oosterbaan, 2010: *Guideline for Monitoring Marine Litter on the Beaches in the OSPAR Maritime Area, Edition 1.0*. OSPAR Commission. <https://doi.org/10.25607/OPB-968>
50. Zalewska, T., J. Maciak, and A. Grajewska, 2021: Spatial and seasonal variability of beach litter along the southern coast of the Baltic Sea in 2015–2019. Recommendations for the environmental status assessment and measures. *Science of The Total Environment*, **774**, 145716, EDN: SLKSYC, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145716>
51. Zobkov, M. B. and M. V. Zobkova, 2024: Pollution of small lake watersheds in Karelia with anthropogenic litter as a result of recreational activities. *Geographical Bulletin*, **4** (71), 133–144, EDN: KBTJEM, <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2024-4-133-144>

Submitted 18.07.2025, accepted 01.12.2025.

For citation: Lobchuk, O. I., A. V. Kileso, and E. E. Esiukova, 2025: Anthropogenic marine litter on sandy beaches of the Southeastern Baltic: findings from a long-term OSPAR protocol monitoring of mass and size distribution. *Journal of Oceanological Research*, **53** (4), 136–158, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(4\).8](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(4).8)

东南波罗的海沙质海滩人为海洋垃圾污染状况： 基于OSPAR协议的多年监测及质量与尺寸评估结果

O. I. Lobchuk¹, A. V. Kileso^{1,2}, E. E. Esiukova¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 邮编: 117997, Russia;

² Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Immanuel Kant Baltic Federal University”,
14, Alexander Nevsky str., Kaliningrad, 邮编: 236016, Russia,
*电子邮件: lobchuk_olga@mail.ru

基于扩展的OSPAR协议(2019–2022年)·通过对东南波罗的海沙质海滩进行多年监测·完成了人为海洋垃圾污染的综合评估·在两个典型海滩(库尔斯沙嘴和波罗的海沙嘴)共采集并分析了7927件垃圾物品·研究确定了塑料污染的主导地位·其占垃圾总量的90%·人为海洋垃圾的污染密度在库尔斯沙嘴为 0.12 ± 0.08 件/平方米·在波罗的海沙嘴为 0.08 ± 0.06 件/平方米·首次获得了该地区塑料垃圾详细的质量-尺寸特征数据·结果表明尺寸为0.1–1厘米·质量小于1克的颗粒占主导地位·光谱分析揭示了均匀的聚合物组成·以PET(12%)·CA(11%)·PS(10%)·PE(10%)和PP(9%)为主·统计分析未发现污染存在显著的时间趋势和季节性波动·所获数据对开发海洋环境中塑料垃圾的迁移与转化模型具有重要意义·并可作为完善人为海洋垃圾监测体系的基础·

关键词:波罗的海·人为海洋垃圾·质量·尺寸·监测·OSPAR·加里宁格勒州

致谢:本研究在俄罗斯联邦科学与教育部下达给俄罗斯科学院希尔绍夫海洋研究所的国家任务框架内完成(课题编号:FMWE-2024-0025)。