

НАКОПЛЕНИЕ МИКРОПЛАСТИКОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ПЛЯЖЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЮГО-ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРЫМА

Е.Н. Сибирцова¹, М.И. Силаков², А.В. Темных³, А.В. Завьялов⁴

¹⁻⁴ Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского» РАН

¹ Науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: elenasibircova@yandex.ru

² Мл. науч. сотр.; e-mail: ilmihvokalis@mail.ru

³ Науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: atemnykh@yandex.ru

⁴ Мл. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: andrej-zavyalov@yandex.ru

Исследована динамика концентрации микропластикового загрязнения пляжевых отложений юго-западного побережья Крыма за период с лета 2018 по осень 2020 г. Объектами исследования были выбраны расположенные в окрестностях Севастополя районы с различными локальными условиями и разной степенью антропогенной нагрузки: пять пляжей в популярных зонах рекреации, оборудованные соответствующей инфраструктурой, и два контрольных района с морфологией берега, удобной для захода в воду, но с отсутствием какой-либо инфраструктуры и массового потока отдыхающих. Для оценки антропогенной нагрузки в полевых условиях регистрировались фактические показатели единовременной допустимой рекреационной нагрузки и дневной посещаемости пляжей.

Рост концентрации микропластикового загрязнения за исследуемый период (2018–2020) отмечен на всех семи исследуемых пляжах. В отдельных зонах рекреации количество микропластика увеличилось в пять раз. Максимум концентрации микропластикового загрязнения зафиксирован на пляже Песочный (до 100 единиц·м⁻²), что на порядок превышает результаты, полученные в остальных районах. По морфотипам микропластика наибольшую долю по всем районам составляли фрагменты – 48–80%. Пространственно-временная динамика концентрации микропластикового загрязнения на теле пляжа выражена по-разному: наиболее интенсивные колебания концентрации отмечены в нижней части пляжа – от уреза воды до верхней границы заплеска волн. Наибольшая кумуляция микропластика на большинстве пляжей сосредоточена также в нижней либо средней части тела пляжа. Отмечено, что на пляжах с максимальной концентрацией микропластикового загрязнения (Песочный и Омега) фактическая единовременная допустимая рекреационная нагрузка превышала теоретическую более чем в 2 раза. Исследование показало относительно благополучную обстановку в отношении микропластикового загрязнения береговых отложений практически во всех исследуемых районах, исключая пляж Песочный, где количество микропластика сопоставимо с таковым в Средиземном море, но на порядок ниже, чем в других регионах Мирового океана.

Ключевые слова: микропластик, пластиковые отходы, береговой грунт, зоны рекреации, рекреационная нагрузка, Черное море

ВВЕДЕНИЕ

Растущие темпы производства пластиковых изделий и крайне низкие масштабы их переработки [Bergmann et al., 2015; Plastics Europe, 2020] повсеместно обуславливают кумуляцию большого количества пластикового мусора в наземных и морских экосистемах.

Попадая с наземного или морского источника в прибрежные морские экосистемы, пластиковый мусор распределяется в морской среде в многовекторном направлении: оседает на дно, загрязняя донные биоценозы, остается в толще воды или поднимается на поверхность и может быть вынесен на берег.

На берегу пластиковые отходы подвержены процессам деградации под воздействием тепла, фотоокисления ультрафиолетовыми лучами и механического воздействия воды или грунта. Макропластик (частицы размером более 20 мм), как правило, ре-

гулярно удаляется с пляжей во время уборки. Более мелкие частицы мезопластика (5–20 мм) остаются в пляжных отложениях и со временем измельчаются до микропластика (МП) (частицы размером менее 5 мм) [Barnes et al., 2009; Andredy, 2011].

Существенную роль в процессах накопления МП в прибрежных зонах рекреации (ЗР) играют совокупность локальных характеристик местности (особенности рельефа, гидродинамика, типы берегов и грунта) и последствия воздействия комплекса антропогенной нагрузки (транспортная инфраструктура, свалки жилых и промышленных районов, насыщенность рекреационных зон пластиковым оборудованием и т. д.).

К настоящему времени зарубежными авторами опубликовано большое количество работ о микропластиковом загрязнении (МЗ) пелагиали и бентали Мирового океана, зоне контакта «суша–море»

[Hidalgo-Ruz et al., 2012; Kaberi et al., 2013; Bergmann et al., 2015; Kim et al., 2015; Karkanorachaki et al., 2018; Hengstmann et al., 2018]. Аналогичных исследований, проводимых отечественными учеными, крайне мало [Сибирцова, 2018; Блиновская, Якименко, 2018; Есюкова, Чубаренко, 2018; Mukhanov et al., 2019; Позднякова и др., 2020].

На Крымском побережье проблема загрязнения ЗР крупным пластиковым мусором изучается с 1990-х гг. [Шадрин, Лялина, 1999]. Работы по исследованию МЗ пляжных отложений начаты в 2016 г. и выполняются в виде ежесезонного мониторинга двух наиболее популярных ЗР, территориально и административно относящихся к площади Севастопольского региона [Сибирцова, 2018].

Цель данной статьи – оценить пространственно-временную динамику качественно-количественных параметров МЗ семи пляжей юго-западного побережья Крыма с различными локальными условиями и разной степенью антропогенной нагрузки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для данной работы послужили данные собственных исследований, полученные в результате проведения мониторинга концентрации МЗ в летне-осенний период 2018–2020 гг. в пляжных отложениях семи районов юго-западного побережья Крыма (рис. 1). Мониторинг проводился ежесезонно в штилевую погоду. Ключевыми принципами методики [Сибирцова, Агаркова-Лях, 2019] являлись:

1. Особенности выбора районов исследования.

Районы исследования расположены на юго-западном побережье Крыма. Из них пять популярных у отдыхающих ЗР обозначены цифрами 1, 4, 5, 6, 7 и две локации с морфологией берега, удобной для захода в воду, – 2, 3 (см. рис. 1), но с отсутствием какой-либо инфраструктуры и массового потока отдыхающих. Собственно, пляжи 2 и 3 выбраны для возможности последующего сравнения результатов с «фоновыми» (контрольными) данными.

2. Особенности выбора точек отбора проб.

Выбирался 100-метровый отрезок пляжа с наиболее характерными особенностями – как правило, его центральная часть. Если длина береговой линии была менее 100 м, исследования охватывали весь пляж. На выбранном отрезке перпендикулярно профилю пляжа проводили воображаемую трансекту, на которой отмечали точки отбора проб в трех субзонах: в верхней части, примыкающей к верхней границе тела пляжа или зоне зеленых насаждений, – субзона T_1 , в средней части – субзона T_2 , в нижней части пляжа у уреза воды (в пределах верхней границы заплеска волн) – субзона T_3 (рис. 2). На

пляжах шириной до 10–15 м выбирались две точки: в субзонах T_1 и T_3 . Отбор пляжных отложений осуществляли на глубину до $5,0 \pm 0,5$ см на квадрате размерами 1×1 м.

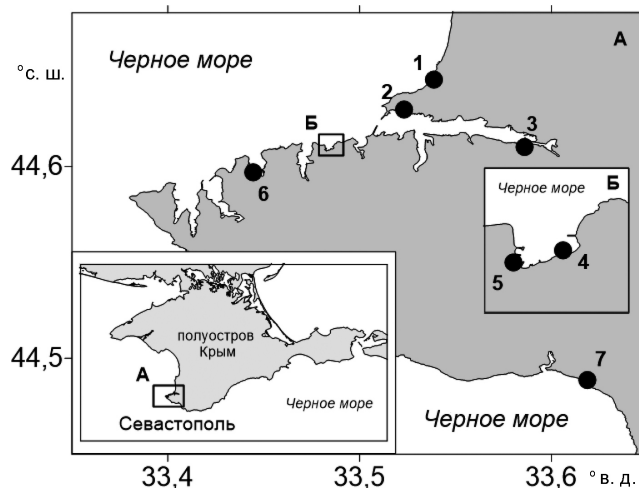


Рис. 1. Районы проведения мониторинговых исследований:

1 – пляж Учкучевка; 2 – мыс Константиновский; 3 – устье р. Черной (ТЭЦ); 4 – пляж Солнечный; 5 – пляж Песочный; 6 – пляж Омега; 7 – пляж Золотой

Fig. 1. Location of study areas:

1 – Uchkuevka beach; 2 – Konstantinovskiy Cape; 3 – mouth of the Chernaya River (Combined Heat and Power plant (CHP)); 4 – Solnechny beach; 5 – Pesochny beach; 6 – Omega beach; 7 – Zolotoy beach

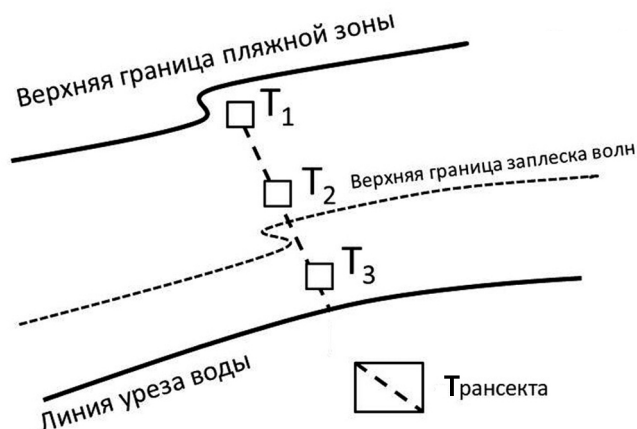


Рис. 2. Схема отбора проб

Fig. 2. Sampling scheme

3. Оценка локальных условий и антропогенной нагрузки. Параллельно с отбором проб на пляже осуществлялось исследование его основных характеристик: геоморфологических (длина, средняя ширина тела пляжа, наличие клифа, обрывов и др.), экологических (расстояние до ближайших источников загрязнений воды, воздуха), экономических (количество объектов инфраструктуры, наличие туа-

летов, пунктов спасения, пресной воды, душевых, способ утилизации отходов), социологических (наличие и качество подъездных дорог, автостоянок, наличие и площадь тентовых площадок, количество аттракционов на воде, на берегу и т. п.). Таким образом, учитывались особенности локальных условий ЗР и потенциальные источники МП.

Основные рекреационные показатели исследуемых пляжей – единовременная допустимая рекреационная нагрузка и дневная посещаемость пляжа – рассчитывались с учетом норматива предельно допустимой рекреационной нагрузки (n). Согласно методике [Агаркова-Лях, Тамойкин, 2017], для галечных пляжей он был принят равным четырем человекам, одновременно отдыхавшим в течение дня, на которых приходился один погонный метр пляжной полосы вдоль берега моря (для песчаных и песчано-гравийных пляжей $n = 3,5$ чел.-дн./м; для песчано-галечных и гравийно-галечных $n = 3,75$ чел.-дн./м). Допустимая рекреационная нагрузка для исследуемого участка пляжа определялась по формуле:

$$E_n = k_1 \cdot k_2 \cdot n \cdot L, \quad (1)$$

где k_1 – социально-экологический коэффициент, его величина (0,5–0,8) зависит от степени негативного вмешательства человека в природные комплексы, от потока возможных воздействий, связанных с хозяйственной деятельностью; k_2 – коэффициент рекреационной привлекательности, его величина (0,4–0,8) зависит от благоустройства территории, возможности в настоящее время использовать ее для отдыха, популярности места отдыха, стереотипа мышления отдыхающих; L – протяженность пляжной полосы вдоль берега моря, м.

Коэффициенты k_1 и k_2 определялись нами в соответствии с характеристиками пляжей, перечисленными выше. С целью более точного сравнения допустимой рекреационной нагрузки на пляжах с разной длиной береговой линии полученная величина E_n была приведена к 10-метровому отрезку, что соответствовало минимальной длине одного из исследуемых пляжей:

$$E_{n10} = E_n/10. \quad (2)$$

Кроме того, в полевых условиях фиксировалась фактическая средняя величина E_n , также в пересчете на отрезок в 10 м погонных ($E_{\text{факт.10}}$, чел./м).

Дневная посещаемость определялась по формуле:

$$V_n = k_3 \cdot E_n, \quad (3)$$

где k_3 – коэффициент сменяемости отдыхающих на пляже в течение дня.

Для изучения фактических рекреационных нагрузок использовался выборочный моментный метод [Агаркова-Лях, Тамойкин, 2017]. В момент учета фиксировалось количество присутствующих отдыхающих на пляже и прилегающей акватории, параллельно осуществлялась фото- и видеозапись. На каждом пляже наблюдения проводились в течение восьми дней в летний период в рабочие и нерабочие дни.

Величина k_3 устанавливалась путем опроса отдыхающих о периоде времени их отдыха в течение дня на конкретном пляже. Поделив 10 дневных часов на среднеарифметическую величину результатов опроса (t , час), получали значение k_3 для пляжа, где проводился опрос:

$$k_3 = 10/t. \quad (4)$$

4. Определение гранулометрического состава отложений производили по массовому содержанию частиц различных фракций, выраженному в процентах по отношению к массе, взятой для анализа сухой пробы. Просеивание проб осуществлялось ситовым методом с помощью набора сит с размером ячеек 10,0; 5,0; 2,0; 1,0 и 0,5 мм.

5. На этапе извлечения и определения концентрации МП использовались стандартные процедуры: плотностное разделение путем помещения 50-граммовой порции пробы в 200 мл насыщенного солевого раствора (NaCl плотностью $1,6 \text{ г/см}^3$) – время экспозиции составляло 5–6 часов, количество повторностей – 3, в соответствии с рекомендациями [Besley et al., 2016]; влажное перекисное окисление – в случае наличия в пробе органического материала (35% раствор H_2O_2); фильтрование через сито из нейлона с диаметром пор 120 мкм. Микрофотографирование и фотографирование частиц МП производилось с помощью цифрового микроскопа Levenhuk DTX 700 Mobi.

6. Качественный анализ частиц МП. Все обнаруженные частицы МП подвергались сортировке по морфологическим характеристикам (форма, цвет, прозрачность). По форме МП дифференцировали на пять основных групп: фрагменты, гранулы, пеллеты, пленки, волокна. Частицы, размер которых хотя бы по одному из измерений лежал за пределами диапазона 0,5–5 мм, в данной работе не учитывались. Тип пластикового материала определялся с помощью процедуры плотностного сепарирования [Masura et al., 2015].

7. Статистический анализ. Для анализа сходства станций сбора проб использовали метод иерархической кластеризации: на основе матрицы исходных данных, трансформированных квадратным корнем, и последующего построения треугольной матрицы сходства по Эвклидову расстоянию прово-

дидась группировка данных способом осреднения по группам, после чего строился кластер схожести станций по загрязнению МП. Статистический анализ проводили в программных пакетах Excel и PRIMER 5.2.2.

8. Контроль качества. С целью предотвращения случайного попадания МП в исследуемые пробы из окружающей среды на всех этапах работ строго соблюдались правила [Guidelines..., 2019]: использовалась хлопчатобумажная лабораторная одежда и перчатки, стеклянное или металлическое оборудование и упаковочная тара; все поверхности рабочей зоны перед началом работ обрабатывались спиртом, емкости для анализа, сита промывались дистиллированной водой. Процедуры плотностного разделения осуществлялись с использованием дистиллированной воды. Во время экспозиции пробы накрывались алюминиевой фольгой. Одновременно выполнялся отрицательный атмосферный контроль в виде размещения на рабочей поверхности трех образцов фильтровальной бумаги, пропитанных дистиллированной водой, помещенных в чашках Петри.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Качественный состав МП. При идентификации МП по типу материала было выделено несколько основных групп: вспененный пластик (пенопласт и пенополистирол), полиэтилен, полипропилен, по-

лиэтилентерефталат (ПЭТ) и неидентифицируемый пластик. В последнюю группу включили частицы, определение которых затруднялось значениями их плотности, близкими к таковым сразу нескольких типов пластика (поливинилхлорид, полиэстер и др.).

Максимум вспененного МП, составляющий в среднем 12,1 ед./м², зарегистрирован на пляже Песочный. Максимальное количество полиэтилена и полипропилена также зафиксировано на пляже Песочный (до 47 и 39 ед./м² в отдельных пробах соответственно). Полиэтилентерефталат встречался во всех районах исследования.

По морфотипу частицы МП были дифференцированы на пять основных групп: фрагменты, гранулы, пеллеты, пленки, волокна (рис. 3). Среди них наибольшую долю по всем пляжам составляли фрагменты – 48–80%. В пробах грунта пляжей Солнечный и Золотой не обнаружено пеллет и волокон. Максимальная доля пеллет выявлена в районах Константиновский и Песочный. Высокая доля волокон выявлена на пляжах Учкеевка и Омега – 22,8 и 25,8% соответственно. Чуть меньше на пляже Константиновский – 17% (рис. 4).

Частицы МП в виде пленок были обнаружены на всех пляжах и составляли 1–21% от общего количества МП. Минимальная их доля среди прочих форм МП зарегистрирована на пляже Песочный, максимальная – на ТЭЦ.

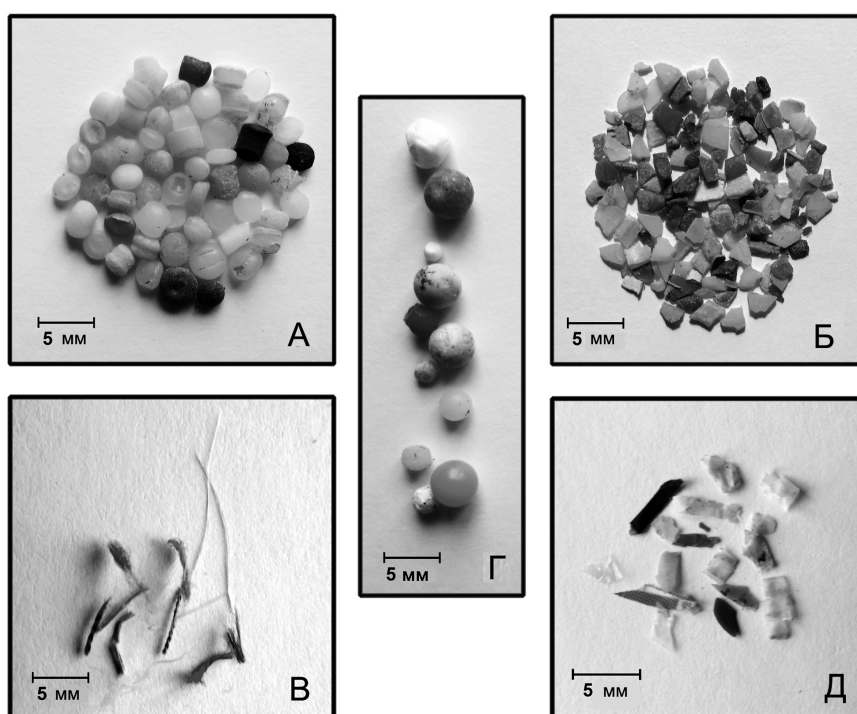


Рис. 3. Примеры основных морфотипов МП: А – пеллеты; Б – фрагменты; В – волокна; Г – гранулы; Д – пленки

Fig. 3. Examples of basic MPs morphological types: А – pellets; Б – fragments; В – fibers; Г – granules; Д – films

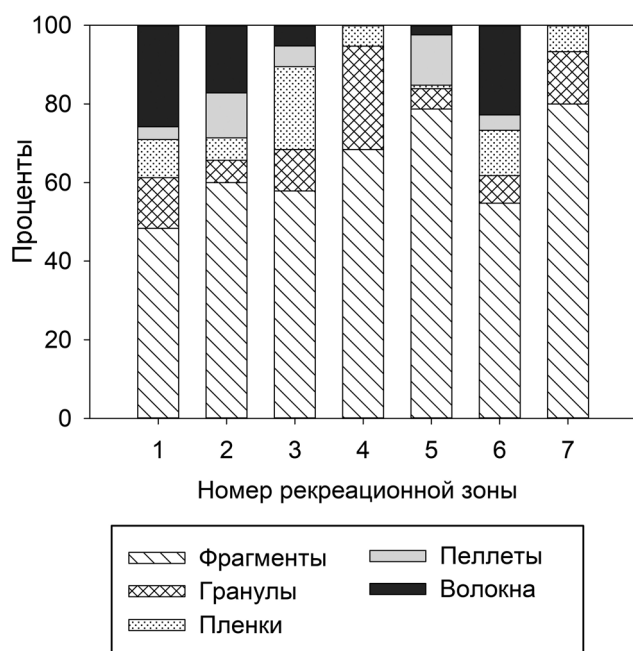


Рис. 4. Количество основных форм МП в береговых отложениях исследуемых районов

Fig. 4. The number of basic MPs forms in shore sediment of study areas

Концентрация МЗ в пляжевых отложениях.

Выявлена тенденция кумуляции МП в пляжевых отложениях во всех исследуемых районах: в течение трех лет мониторинга на пляжах Песочный, Солнечный, Золотой средние значения концентрации МЗ повысились в 1,5–3 раза; на пляжах Константиновский и ТЭЦ в 4–5 раз (рис. 5); на пляжах Омега и Учкеевка за пять лет (по сравнению с данными 2016 г. [Сибирцова, 2018]) в 3,4 и 4 раза соответственно.

Таким образом, среди исследуемых районов можно выделить лидеров по скорости аккумуляции МП, которыми являются пляжи ТЭЦ и Константиновский, где за время мониторинга количество МП выросло с 3 до 16 ед./м² и с 3 до 13 ед./м² соответственно; т. е. скорость прироста количества МП здесь составляла более чем 200% в год. При этом пляжи Песочный и Солнечный отличаются от всех остальных наименьшей скоростью накопления МП – не более 16% в год. Максимальные средние величины концентрации МЗ зафиксированы на пляже Песочный – 77–100 ед./м², что на порядок превышает таковые на остальных пляжах.

Установлено, что постепенное накопление МП происходит на всем теле пляжа, практически во всех субзонах. Исключением являются субзоны Т₁ и Т₃ пляжа Солнечный, субзона Т₃ пляжа Песочный в 2019 г. и Т₂ пляжа Омега в летний сезон 2019 г. На этих участках количество МП в 2018–2019 гг. было выше, чем в 2020 г.

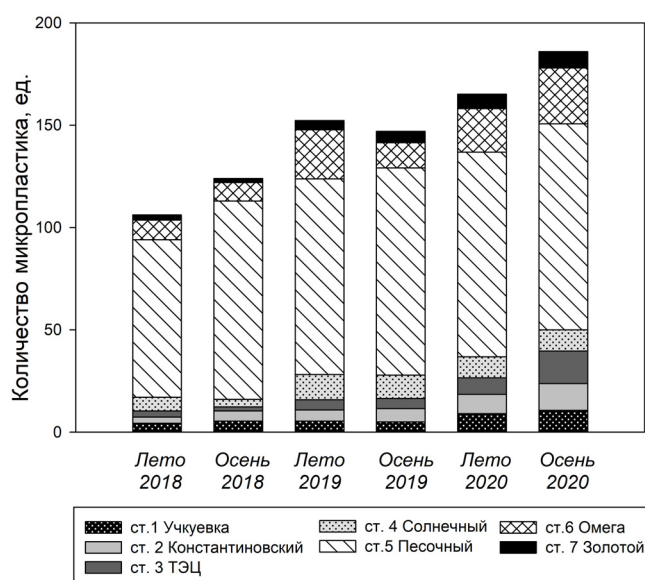


Рис. 5. Средние значения количества МП в исследуемых районах по сезонам

Fig. 5. Average values of MPs amount in study areas by seasons

Дендрограмма (рис. 6) наглядно демонстрирует степень сходства точек отбора проб по концентрации МЗ в субзонах Т₁, Т₂, Т₃. Очевидна высокая степень сходства большинства станций по МЗ. В отдельную группу был отнесен пляж Песочный, где степень накопления и средние величины МЗ существенно отличались.

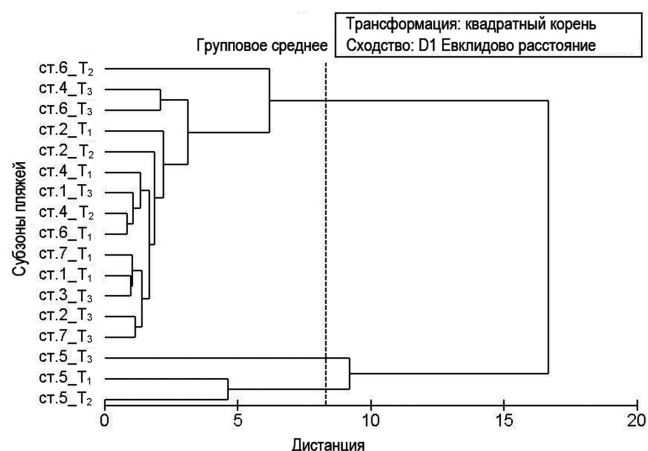


Рис. 6. Дендрограмма сходства станций сбора проб береговых отложений

Fig. 6. Dendrogram for hierarchical clustering of onshore sampling stations

Рассмотрим более детально особенности динамики концентрации МЗ в каждой субзоне на разных пляжах. Изменение количества МП на пляже Учкеевка в субзонах Т₂ и Т₃ находилось в противофазе (рис. 7А), а на пляже Омега количество МП во всех

трех субзонах варьировалось синхронно (рис. 7Б). В других исследуемых районах какой-либо выраженной упорядоченности данных параметров не выявлено.

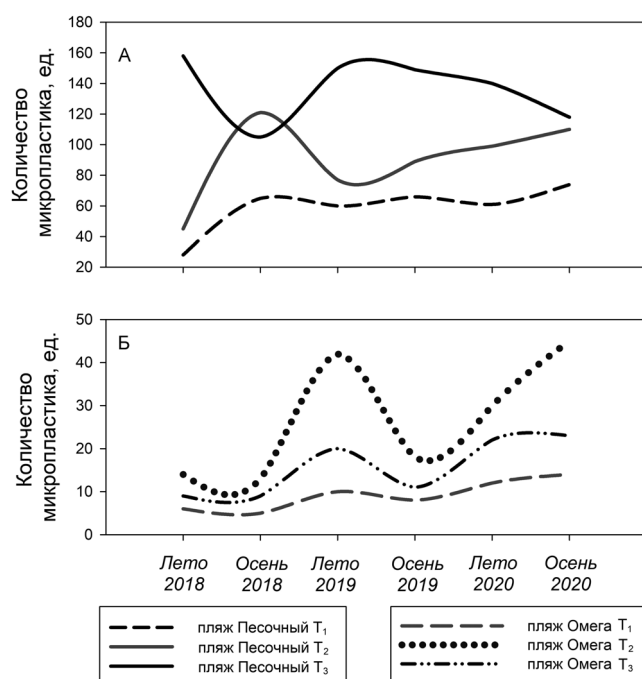


Рис. 7. Распределение МП в разных субзонах тела пляжа: А – Учкуевка; Б – Омега

Fig. 7. Distribution of MPs at different subzones of the beach body: А – Uchkuevka beach; Б – Omega beach

В районах с шириной пляжа, достаточной для отбора проб в трех субзонах, наиболее динамично изменялись значения концентрации МЗ в субзоне T_3 (табл. 1).

Таблица 1
Субзоны наибольшей концентрации МЗ

Название пляжа	Лето	Осень
Учкуевка	T_2 (2018, 2020), T_3 (2019)	T_2 (2018, 2020), T_3 (2019)
Солнечный	T_3	T_3
Песочный	T_3	T_3 (2019, 2020), T_2 (2018)
Омега	T_2	T_2

Таким образом, было выделено четыре типа характера накопления МП на исследуемых пляжах, в качестве критерия использованы наиболее динамичные показатели концентрации МЗ в субзоне T_3 .

Первый тип – на пляжах с открытой береговой линией – Учкуевка и Золотой. Накопление МП

здесь происходит постепенно, с небольшими флуктуациями. За время мониторинга количество МП в субзоне T_3 увеличилось в 1,5–2 раза (рис. 8А).

Второй тип – на пляжах Константиновский и ТЭЦ, расположенных у входа и в кутовой части Севастопольской бухты. В 2018–2019 гг. динамика концентрации МЗ в субзоне T_3 находилась на этих пляжах в противофазе, но с 2020 г. обнаружено резкое повышение количества МП в 1,5 раза (рис. 8Б). Концентрация МЗ в субзоне T_3 за время мониторинга возросла в 3–4 раза.

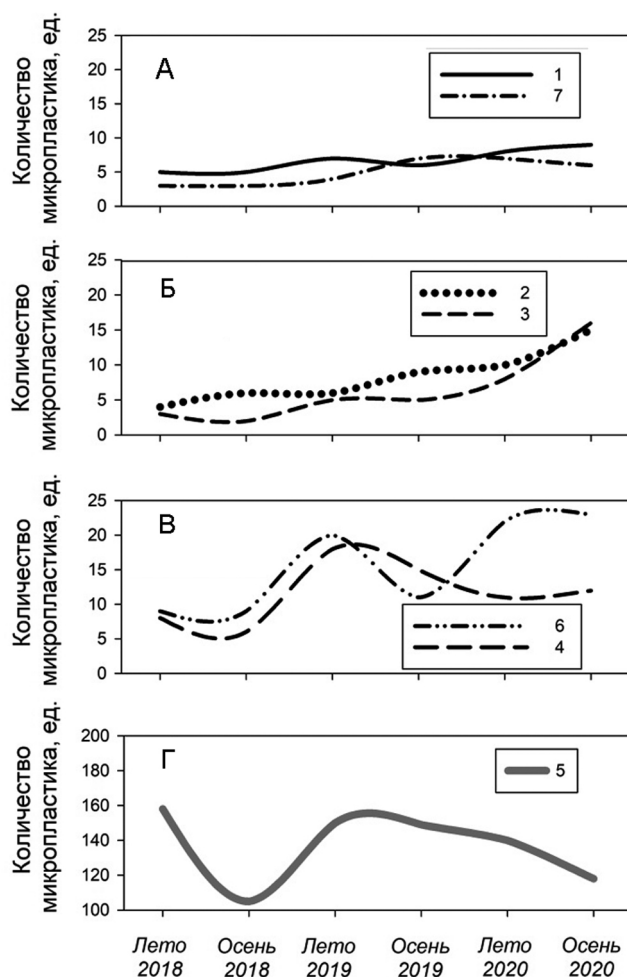


Рис. 8. Динамика накопления МП в субзоне T_3 на участках: А – Учкуевка и Золотой; Б – Константиновский и ТЭЦ; В – Омега и Солнечный; Г – Песочный; 1 – пляж Учкуевка; 2 – мыс Константиновский; 3 – устье р. Черная (ТЭЦ); 4 – пляж Солнечный; 5 – пляж Песочный; 6 – пляж Омега; 7 – пляж Золотой

Fig. 8. Dynamics of MPs accumulation at the T_3 subzone at the sites: А – Uchkuevka and Zolotoy; Б – Konstantinovskiy and CHP; В – Omega and Solnechny; Г – Pesochny; 1 – Uchkuevka beach; 2 – Konstantinovskiy Cape; 3 – mouth of the Chernaya River (Combined Heat and Power plant (CHP)); 4 – Solnechny beach; 5 – Pesochny beach; 6 – Omega beach; 7 – Zolotoy beach

Третий тип – на пляжах, расположенных в полузакрытых бухтах за пределами Севастопольской бухты, – Омега и Солнечный. Здесь наблюдались значительные флуктуации концентрации МЗ в субзоне T_3 . Если в 2018–2019 гг. на обоих пляжах осенью наблюдалось некоторое снижение количества МП после летнего сезона, то осенью 2020 г. отмечено его возрастание (рис. 8В).

Четвертый тип – на пляже Песочный. Концентрация МЗ в субзоне T_3 за три года уменьшилась в 1,5 раза – с 158 до 118 ед./м² (рис. 8Г).

Антропогенная нагрузка. Совокупность локальных параметров и антропогенной нагрузки на каждом пляже имела индивидуальные особенности. Важным моментом, обуславливающим более точное понимание характера антропогенной нагрузки, явилась возможность сравнения величины вычисленной единовременной допустимой рекреационной нагрузки (E_n) с фактической ($E_{n\text{ факт}}$), наблюдаемой нами в полевых условиях (табл. 2).

Таблица 2

**Единовременная допустимая рекреационная нагрузка
и дневная посещаемость исследуемых районов**

Название пляжа	k_1	k_2	k_3	L , м	n	E_{n10^3} чел.	$E_{n\text{ факт } 10^3}$ чел./м	$E_{n\text{ факт } 10^3} / E_{n10^3}$ чел./м	$V_{n\text{ факт } 10^3}$ чел./м
Учкуевка	0,6	0,8	3,7	100	3,5	16,8	24	1,43	89
Константиновский	0,6	0,5	5	20	3,5	10,5	8	0,76	40
ТЭЦ	0,6	0,4	10	10	3,75	9	6	0,67	60
Солнечный	0,6	0,6	4,6	60	4	14,4	23	1,6	138
Песочный	0,6	0,6	4	45	3,75	13,5	31,7	2,35	127
Омега	0,6	0,7	4,3	100	3,5	14,7	38	2,6	165
Золотой	0,8	0,6	3,1	60	3,75	18	8,8	0,49	27

Отмечено, что на пляжах Песочный и Омега, где концентрация МЗ была максимальной, фактическая единовременная допустимая рекреационная нагрузка превышала теоретическую в 2,35 и 2,6 раза соответственно. Это говорит о превышении числа отдыхающих на этих пляжах нормы, которая определяет степень комфорта для самих отдыхающих относительно друг друга, а также безопасность для окружающей среды. Расположение указанных пляжей вблизи от жилых массивов способствует их популярности и у местного населения, и у приезжих. Пляж Омега благодаря своей мелководности (табл. 3) в течение уже нескольких десятилетий особенно популярен у отдыхающих с маленькими детьми, которые, как и на пляже Песочный, проводят у моря в среднем не менее 2,5 часов в день в летний период (см. табл. 2). Многочасовой отдых с детьми предполагает активное использование «одноразовых» пластиковых предметов (упаковочный материал, пакеты, стаканчики, сигаретные фильтры, крышки и др.), что обуславливает большое количество МЗ с наземного источника. Источником МП здесь может являться также наличие разветвленной транспортной городской инфраструктуры, так как преобладающие ветра южного направления в летне-осенний сезон [Ациховская, Богданова, 2004] обуславливают снос МП с установленных

точек сбора мусора и стихийных свалок, а также с дорожного покрытия по направлению к этим пляжам. Так как динамика концентрации МЗ во всех субзонах изменяется синхронно (см. рис. 7Б), а максимальное количество МП сосредоточено в субзоне T_2 (см. табл. 1), возможно, именно наземный источник МП играет здесь первостепенную роль.

Пляжи Омега, Песочный и Солнечный отличаются максимальными показателями дневной посещаемости (см. табл. 2). При этом скорость накопления МП на пляжах Песочный и Солнечный, расположенных в одной бухте, но отличающихся типами грунта, минимальная. На последнем пляже субзона T_3 неизменно характеризуется наибольшей динамикой концентрации МЗ (см. табл. 1). На пляже Песочный максимальная динамика аналогичных параметров также наблюдалась в субзоне T_3 и только осенью 2018 г. в субзоне T_2 .

При практически равной минимальной скорости накопления МЗ, его максимум сосредоточивается на пляже Песочный, где преобладает песчаная фракция, а на пляже Солнечный, где тип пляжных отложений галечный, оказывается на порядок ниже. Вероятно, это обусловлено особенностями гидродинамики и ветрового волнения в бухте Песочная, способствуя такому перераспределению поступающего с моря МП.

Таблица 3

Локальные характеристики исследуемых районов

Исследуемый район	Степень замкнутости акватории и расположение пляжа	Тип грунта	Линейные параметры исследуемого участка пляжа: длина/ширина, м	Наличие клифа	Ширина субзоны от уреза воды до верхней границы заплеска волн, м	Глубина на расстоянии 2/10/20/50 м от уреза воды
Учкуевка	Открытая акватория. Западное побережье	Песчано-гравийный	100/40	–	15	0,45/0,95/ 1,45/2,85
Константиновский	На выходе Севастопольской бухты, открытой с запада. Восточнее северного заградительного мола. Полузакрытая бухта	Песчаный	20/3,5	+	3,5	0,4/0,85/ 1,5/3,15
ТЭЦ	Южная сторона кутовой части Севастопольской бухты, открытой с запада	Песочно-галечный	30/2	+	2	0,35/1,3/ 1,95/2,35
Солнечный	Юго-восточная сторона бухты Песочная. Бухта полузакрытая, открытая с севера	Галечный	60/25	–	14	0,4/1,1/ 1,9/2,65
Песочный	Юго-западная сторона бухты Песочная. Полузакрытая бухта, открытая с севера	Песчано-галечный	45/35	–	11	0,4/0,95/ 1,25/2,15
Омега	Юго-западная сторона бухты Омега. Полузакрытая бухта, открытая с севера	Песчано-гравийный	100/20	–	10	0,4/0,6/ 0,95/2,0
Золотой	Открытая акватория. Юго-западное побережье	Гравийно-галечный	60/8	+	8	0,5/0,9/ 2,30/3,55

Участки Константиновский, ТЭЦ и пляж Золотой имеют фактическую единовременную допустимую рекреационную нагрузку в 1,5–2 раза ниже теоретической. Объясняется это, в первую очередь, их трудной доступностью. Кроме того, если пляж Золотой пользуется популярностью у приезжих отдыхающих благодаря пейзажно-эстетической привлекательности, то небольшие прибрежные пляжи ТЭЦ и Константиновский можно только условно назвать ЗР, так как они востребованы только у местного населения ближайших жилых зон. Дневная посещаемость на этих трех пляжах минимальная (см. табл. 3). Тем не менее, как было отмечено выше, скорость накопления МП на ТЭЦ и Константиновском самая высокая. Это можно объяснить наличием выраженного клифа, который препятствует перемещению частиц МП за пределы верхней части пляжа, вследствие чего МП, поступивший с наземного или морского источника, либо аккумулируется на пляже, либо

снова уносится в море. Возможно, значительно меньшая скорость накопления МП на пляже Золотом, где также имеется клиф, объясняется расположением его не в полузакрытой бухте, как ТЭЦ и Константиновский, а на открытом берегу, где более интенсивны процессы водообмена.

Оценка степени загрязнения МП юго-западного побережья Крыма. Исследование ЗР юго-западного побережья Крыма показало относительно благополучную обстановку по уровню концентрации МЗ в береговых отложениях, сопоставимому с таковым в Ионическом море [Karkanorachaki et al., 2018] (табл. 4). Исключением является пляж Песочный, где количество МП соответствует аналогичным параметрам в Эгейском море, достигающим 293–977 ед./м² [Kaberli et al., 2013; Karkanorachaki et al., 2018]. Тем не менее концентрация МЗ в исследуемых районах на порядок ниже, чем в других регионах Мирового океана [Kim et al., 2015; Hidalgo-Ruz et al., 2012; Hengstmann et al., 2018].

Таблица 4

Концентрация МЗ в береговых отложениях на пляжах различных регионов Мирового океана

Регион исследований	Концентрация МЗ в пляжных отложениях, ед./м ²	Источник
Северо-западное побережье Южной Кореи	470,6	[Kim et al., 2015]
О. Крит (Эгейское море)	41,8–293	[Karkanorachaki et al., 2018]
Греческое побережье Ионического моря	56,7	[Karkanorachaki et al., 2018]
Япония	2600	[Hidalgo-Ruz et al., 2012]
О. Кеа (Эгейское море)	10–977	[Kaberli et al., 2013]
О. Рюген (Балтийское море)	2862,56	[Hengstmann et al., 2018]
Юго-западное побережье Крыма (Черное море)	3–158	Оригинальные данные

ВЫВОДЫ

1. Установлена тенденция постепенной кумуляции МЗ в пляжевых отложениях во всех семи исследуемых районах в летне-осенний период 2018–2020 гг. За время мониторинга концентрация МЗ на исследуемых пляжах повысилась в 1,5–5 раз.

2. Динамика уровня концентрации МЗ на теле пляжа выражена по-разному: наиболее интенсивны ее изменения в нижней части пляжа – от уреза воды до верхней границы заплеска волн (субзона Т₃). Наибольшая кумуляция МП на большинстве пляжей сосредоточена также в субзоне Т₃ либо в

средней части тела пляжа (субзона Т₂). На пляже Песочный зафиксированы максимальные величины концентрации МЗ, на порядок превышающие таковые в других локациях.

3. На пляжах с максимальной концентрацией микропластикового загрязнения (Песочный и Омега) фактическая единовременная допустимая рекреационная нагрузка превышала теоретическую более чем в 2 раза.

4. Уровень концентрации МЗ в пляжевых отложениях исследуемых районов сопоставим с таковым в Средиземном море, но значительно ниже, чем в других регионах Мирового океана.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Севастополя в рамках научного проекта 18-44-920014 р_а, а также в рамках НИР номер государственной регистрации: 121040600178-6.

Авторы выражают глубокую признательность И.С. Чуприне, Н.Н. Сибирцову, Е.Г. Зайцеву и В.А. Гончаренко за помощь в организации научных экспедиций и отборе проб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агаркова-Лях И.В., Тамойкин И.Ю. Предварительные результаты полевых наблюдений и анализ рекреационной нагрузки на береговую зону моря // Системы контроля окружающей среды. 2017. № 7(27). С. 131–140.
- Ациховская Ж.М., Богданова Т.А. Изменчивость ветрового режима в районе Севастополя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: сб. науч. тр. 2004. Вып. 10. С. 103–108.
- Блиновская Я.Ю., Якименко А.Л. Анализ загрязнения акватории залива Петра Великого (Японского моря) микропластиком // Успехи современного естествознания. 2018. № 1. С. 68–73.
- Есюкова Е.Е., Чубаренко И.П. Особенности распределения микропластика на песчаных пляжах Калининградской области (Балтийское море) // Региональная экология. 2018. № 1(51). С. 108–121.
- Позднякова Ш.Р., Иванова Е.В., Гузева А.В., Шалунова Е.П., Мартинсона К.Д., Тихонова Д.А. Исследование содержания частиц микропластика в воде, донных отложениях и прибрежной территории Невской губы Финского залива // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 4. С. 411–420.
- Сибирцова Е.Н. Микропластиковое загрязнение грунтов пляжей г. Севастополя в летний период 2016–2017 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 1. С. 64–73.
- Сибирцова Е.Н., Агаркова-Лях И.В. Методика изучения микропластикового загрязнения в пляжных и донных отложениях различного гранулометрического состава // Системы контроля окружающей среды. 2019. Вып. 1(35). С. 136–145.
- Шадрин Н.В., Лялина М.Ю. Пластиковый мусор в море и на берегу // Акватория и берега Севастополя. Севастополь: Аквавита, 1999. С. 204–210.
- Andredy A.L. Microplastics in the marine environment, *Mar. Pollut. Bull.*, 2011, vol. 62(8), p. 1596–1605.

- Barnes D.K.A., Galgani F., Thompson R.C., Barlaz M. Accumulation and fragmentation of plastic in global environments, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2009, Series B, vol. 364 (1526), p. 1985–1998.
- Bergmann M., Gutow L., Klages M. Marine Anthropogenic Litter, Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, 2015, 457 p.
- Besley A., Vijver M., Behrens P., Bosker T. A standardized method for sampling and extraction methods for quantifying microplastics in beach sand, *Mar. Pollut. Bull.*, 2017, vol. 114, no. 1, p. 77–83.
- Guidelines on the Monitoring and Assessment of Plastic Litter and Microplastics in the Ocean*, P.J. Kershaw, A. Turra, F. Galgani (eds.), GESAMP, London, UK, 2019, 130 p.
- Hengstmann E., Tammenga M., Bruch C., Fischer E.K. Microplastic in beach sediments of the Isle of Rügen (Baltic Sea), *Mar. Pollut. Bull.*, 2018, vol. 126, p. 263–274.
- Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.T., Thiel M. Microplastics in the marine environment, *Environ. Sci. Technol.*, 2012, vol. 46, p. 3060–3075.
- Kaberi H., Tsangaris C., Zeri C., Mousdis G., Papadopoulos A., Streftaris N. Microplastics along the shoreline of a Greek island (Kea Island, Aegean Sea). *The 4th International Conference on Environmental Management* (Greece, June 24–28), Athens: Konstantinos Aravossis, National Technical University of Athens, 2013, p. 197–202.
- Karkanorachaki K., Kiparissis S., Kalogerakis G., Yiantzi E., Psillakis E., Kalogerakis N. Plastic pellets, meso- and microplastics on the coastline of Northern Crete, *Mar. Pollut. Bull.*, 2018, vol. 133, p. 578–589.
- Kim I.S., Chae D.H., Kim S.K., Choi S.B., Woo S.B. Factors influencing the spatial variation of microplastics on high-tidal coastal beaches in Korea, *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 2015, vol. 69, p. 299–309.
- Masura J., Baker J., Foster G., Arthur C. Laboratory Methods for the analysis of Microplastics in the Marine Environment, *NOAA Marine Debris Division*, Silver Spring, USA, 2015, 29 p.
- Mukhanov V.S., Litvinyuk D.A., Sakhon E.G., Bagaev A.V., Veerasingam S., Venkatachalapathy R. A new method for analyzing microplastic particle size distribution in marine environmental samples, *Ecologica Montenegrina*, 2019, vol. 23, p. 77–86.
- Электронный ресурс
Plastics Europe. Plastics – The facts, 2020. URL: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4312-plastics-facts-2020> (дата обращения 10.07.2021).

Поступила в редакцию 21.01.2021

После доработки 16.06.2021

Принята к публикации 27.09.2021

MICROPLASTIC ACCUMULATION IN BEACH SEDIMENTS OF THE SOUTHWEST COAST OF CRIMEA

E.N. Sibirtsova¹, M.I. Silakov², A.V. Temnykh³, A.V. Zav'yalov⁴

^{1–4} Federal research center A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS

¹ Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: elenasibirtsova@yandex.ru

² Junior Scientific Researcher; e-mail: ilmihvokalis@mail.ru

³ Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: atemnykh@yandex.ru

⁴ Leading Engineer; e-mail: andrej-zavyalov@yandex.ru

The dynamics of microplastic concentration in beach sediments on the southwest coast of Crimea for the period from summer 2018 till autumn 2020 was investigated. The objects of research were areas located in the vicinity of Sevastopol with different local conditions and varying degree of anthropogenic load, i.e. five beaches in popular recreation areas, equipped with the adequate infrastructure, and two control areas with coastal relief suitable for entering the water, but without infrastructure and mass flow of tourists. To assess the anthropogenic load in the field, the actual indicators of one-time permissible recreational load and daily beach attendance were recorded.

The increasing microplastics concentrations during the study period 2018–2020 were recorded in all study areas. The amount of microplastics increased 5 times in some recreation areas. The maximum microplastic concentration was recorded on the Pesochny beach (up to 100 items per 1 m²), which is by an order more than in the other areas. The largest share among the morphotypes of microplastic particles is owned by fragments – 48–80% in all regions. The spatial-temporal dynamics of microplastic concentration over the beach body is expressed in different ways. The most intense fluctuations in concentration were observed in the lower part of the beach, i.e. from the water edge to the upper boundary of wave splash. The greatest accumulation of microplastics on most beaches is also in the lower or middle part of the beach body. It was noted that the beaches with maximum microplastic concentrations (Pesochny and Omega beaches) demonstrate the actual one-time permissible recreational load more than 2 times above the theoretical one. The study showed a relatively favorable situation with a low level of MP in coastal sediments, excluding the Pesochny beach, where the microplastic pollution is comparable to that in the Mediterranean Sea, but an order of magnitude lower than in other parts of the World Ocean.

Keywords: microplastics, plastic waste, coastal sediments, recreational zones, recreational load, the Black Sea

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research and Sebastopol (project number 18-44-920014 p_a), and also under the state recorded research task 121040600178-6.

The authors are deeply grateful to I.S. Chuprina, N.N. Sibirtsov, E.G. Zaitsev and V.A. Goncharenko for their assistance in the organization of scientific expeditions and sampling.

REFERENCES

- Agarkova-Lyah I.V., Tamojkin I.Yu. Predvaritel'nye rezultaty polevykh nablyudenij i analiz rekreatsionnoj nagruzki na beregovuyu zonu morya [Preliminary results of field observation and analysis of recreation load over the coastal zone], *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2017, no. 7(27), p. 131–140. (In Russian)
- Andredy A.L. Microplastics in the marine environment, *Mar. Pollut. Bull.*, 2011, vol. 62(8), p. 1596–1605.
- Atsikhovskaya Zh.M., Bogdanova T.A. Izmenchivost' vetrovogo rezhima v rajone Sevastopolya [Variability of wind regime in Sevastopol], *Ekol. bez. pribir. i shel'f. zon moray, Sb. nauchn. tr.*, 2004, no. 1, p. 103–108. (In Russian)
- Barnes D.K.A., Galgani F., Thompson R.C., Barlaz M. Accumulation and fragmentation of plastic in global environments, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2009, Series B, vol. 364 (1526), p. 1985–1998.
- Bergmann M., Gutow L., Klages M. *Marine Anthropogenic Litter*, Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, 2015, 457 p.
- Besley A., Vijver M., Behrens P., Bosker T. A standardized method for sampling and extraction methods for quantifying microplastics in beach sand, *Mar. Pollut. Bull.*, 2017, vol. 114, no. 1, p. 77–83.
- Blinovskaya Ya.Yu., Yakimenko A.L. Analiz zagryazneniya akvatorii zaliva Petra Velikogo (Yaponskogo morya) mikroplastikom [Analysis of microplastics pollution of the water area of the Peter the Great Bay (the Japanese Sea)], *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2018, no. 1, p. 68–73. (In Russian)
- Esyukova E.E., Chubarenko I.P. Osobennosti raspredeleniya mikroplastika na peschanykh plyazhakh Kaliningradskoj oblasti (Baltijskoe more) [Specific features of the distribution of microplastic on sandy beaches of the Kaliningrad region (the Baltic Sea)], *Regional'naya ekologiya*, 2018, no. 1(51), p. 108–121. (In Russian)
- Guidelines or the Monitoring and Assessment of Plastic Litter and Microplastics in the Ocean*, Kershaw P.J., Turra A., Galgani F. (eds.), GESAMP, London, UK, 2019. 130 p.
- Hengstmann E., Tamminga M., Bruch C., Fischer E.K. Microplastic in beach sediments of the Isle of Rügen (Baltic Sea), *Mar. Pollut. Bull.*, 2018, vol. 126, p. 263–274.
- Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.T., Thiel M. Microplastics in the marine environment, *Environ. Sci. Technol.*, 2012, vol. 46, p. 3060–3075.
- Kaberi H., Tsangaris C., Zeri C., Mousdis G., Papadopoulos A., Streftaris N. Microplastics along the shoreline of a Greek island (Kea Island, Aegean Sea), *The 4th International Conference on Environmental Management* (Greece, June 24–28), Athens, Konstantinos Aravossis, National Technical University of Athens, 2013, p. 197–202.
- Karkanorachaki K., Kiparissis S., Kalogerakis G., Yiantzi E., Psillakis E., Kalogerakis N. Plastic pellets, meso- and microplastics on the coastline of Northern Crete, *Mar. Pollut. Bull.*, 2018, vol. 133, p. 578–589.
- Kim I.S., Chae D.H., Kim S.K., Choi S.B., Woo S.B. Factors influencing the spatial variation of microplastics on high-tidal coastal beaches in Korea, *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 2015, vol. 69, p. 299–309.
- Masura J., Baker J., Foster G., Arthur C. Laboratory Methods for the analysis of Microplastics in the Marine Environment, *NOAA Marine Debris Division*, Silver Spring, USA, 2015, 29 p.
- Mukhanov V.S., Litvinyuk D.A., Sakhon E.G., Bagaev A.V., Veerasingam S., Venkatachalapathy R. A new method for analyzing microplastic particle size distribution in marine environmental samples, *Ecologica Montenegrina*, 2019, vol. 23, p. 77–86.
- Pozdnyakova Sh.R., Ivanova E.V., Guzeva A.V., Shalunova E.P., Martinsona K.D., Tikhonova D.A. Issledovanie soderzhaniya chastits mikroplastika v vode, donnykh otlozheniyakh i pribrezhnoj territorii Nevskoj guby Finskogo zaliva [Investigation of the content of microplastic particles in water, bottom sediments and the coastal territory of the Neva Bay of the Gulf of Finland], *Vodnye resursy*, 2020, no. 47(4), p. 411–420. (In Russian)
- Shadrin N.V., Lyalina M.Yu. Plastikovyj musor v more i na beregu [Plastic debris in the sea and on the shore], *Akvatoriya i berega Sevastopolya*, Sevastopol, Akvavita Publ., 1999, p. 204–210.
- Sibircova E.N. Mikroplastikovoje zagryaznenie gruntov plyazhej g. Sevastopolya v letnij period 2016–2017 gg. [Microplastics pollution of Sevastopol beaches during the summer of 2016–2017], *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon moray*, 2018, no. 1, p. 64–73. (In Russian)
- Sibircova E.N., Agarkova-Lyah I.V. Metodika izucheniya mikroplastikovogo zagryazneniya v plyazhnyh i donnykh otlozheniyah razlichnogo granulometricheskogo sostava [The method of analyzing microplastics pollution of beach and bottom sediments of various grain texture], *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2019, no. 1(35), p. 136–145. (In Russian)
- Web source*
- Plastics Europe. Plastics – The facts, 2020, URL: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4312-plastics-facts-2020> (access date 10.07.2021).

Received 21.01.2021

Revised 16.06.2021

Accepted 27.09.2021