

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ГЛУШКО АРИНА ЕВГЕНЬЕВНА

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АЗОВСКОГО МОРЯ МИКРОПЛАСТИКОМ

Специальность 1.6.21. Геоэкология

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
доктор географических наук, доцент
Беспалова Людмила Александровна

Ростов-на-Дону 2025

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ГЛАВА. ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МИКРОПЛАСТИКОМ МИРОВОГО ОКЕАНА	10
1.1. Понятие микропластик, его классификации и источники поступления в морскую среду.....	13
1.2. Современный уровень исследования загрязнения микропластиком	18
2. ГЛАВА. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ АЗОВСКОГО МОРЕЯ.....	25
2.1. Геологическое строение.....	26
2.2. Рельеф дна и берегов.....	28
2.3. Гидро климатические особенности	31
2.4. Донные осадки.....	34
2.5. Динамика вод.....	37
2.6. Биота	39
3. ГЛАВА. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	43
3.1. Методы отбора проб	45
3.1.1. Отбор проб пляжевых отложений	46
3.1.2. Отбор проб донных осадков	48
3.1.3. Отбор проб с поверхности воды.....	51
3.1.4. Отбор проб моллюсков	53
3.1.5. Отбор проб атмосферных выпадений	54
3.1.6. Отбор проб почв прибрежной зоны	54
3.2. Лабораторные методы анализа микропластика	55
3.2.1. Метод анализа микропластика в пробах пляжевых отложений	58
3.2.2. Метод анализа микропластика в донных отложениях и почвах.....	60
3.2.3. Метод анализа микропластика в пробах воды.....	62
3.2.4. Метод анализа микропластика в пробах моллюсков	62
3.2.5. Метод анализа микропластика в пробах атмосферных выпадений	63
3.3. Идентификация микропластика	64
3.3.1. Визуальное исследование. Оптическая микроскопия.	64

3.3.2. Растровая электронная микроскопия	68
3.3.3. Определение химического состава микропластика. ИК-Фурье спектроскопия	70
4. ГЛАВА. ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ МИКРОПЛАСТИКОМ СРЕДЫ И БИОТЫ АЗОВСКОГО МОРЯ	72
4.1. Оценка уровня концентрации микропластика, его морфологических и морфометрических особенностей	73
4.1.1. Микропластик в пляжевых отложениях.....	73
4.1.2. Микропластик в донных отложениях.....	82
4.1.3. Микропластик в поверхностных водах	89
4.1.4. Микропластик в моллюсках Азовского моря	92
4.2. Анализ источников поступления микропластика	95
4.2.1. Микропластик в атмосферных выпадениях над акваторией моря	95
4.2.2. Микропластик в устьевых областях рек	102
4.2.3. Микропластик в почвах прибрежной зоны.....	108
4.3 Деградация частиц микропластика	112
4.4. Химический состав микропластика	117
4.5. Зонирование Азовского моря по степени загрязнения микропластиком....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:.....	131

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Загрязнение морской среды фрагментами микропластика (МП) (частицы менее 5 мм), стало серьезной экологической проблемой и предметом интереса большого количества исследований, осуществляемых в последнее время. На сегодняшний день микропластик обнаруживают по всему миру на пляжах (Doyen et al., 2019), в глубоководных отложениях (Zobkov et al., 2017) и в воде (Sagawa et al., 2018). Ввиду небольшого размера МП является биодоступным для организмов по всей пищевой цепи. Кроме того, фрагменты МП адсорбируют на своей поверхности разнообразные стойкие органические загрязнители и тяжелые металлы, что дополнительно подвергает опасности жизнь морских организмов. (Ashton et al., 2010).

Исследования антропогенного загрязнения морских экосистем микропластиком широко представлено в научной литературе. В России оценочные работы по данной проблеме начаты около 10 лет назад (Bagaev et al., 2017; Сибирцова, 2018; Ефимова, Чубаренко, 2018; Есюкова, Чубаренко, 2019; Блиновская и др., 2020; Чубаренко и др., 2021, Глушко и др., 2021). Все это указывает на необходимость разработки и применения стандартных процедур отбора и анализа накопления пластика в воде, донных и береговых отложениях, биоте. Детальный мониторинг среды и биоты морских экосистем может позволить дать объективную оценку реальных природных рисков, связанных с загрязнением пластиком и его воздействием на гидробионты, общее состояние экосистемы и человека.

В этой связи **целью** данной работы является оценка уровня загрязнения Азовского моря микропластиком:

Задачи исследования:

- выполнить библиометрический анализ по проблеме загрязнения микропластиком водных объектов в России и за рубежом;
- дать характеристику природных условий Азовского моря;
- изучить применяемые методы отбора и обработки проб на микропластик;
- оценить уровень концентрации МП в средах и биоте Азовского моря;

- определить основные источники поступления МП в Азовское море;
- ранжировать акваторию Азовского моря по степени загрязнения микропластиком.

Объект исследования – Азовское море: вода, донные и пляжевые отложения, гидробионты (моллюски), источники поступления (атмосферные выпадения, устьевые области рек, почвы прибрежной зоны).

Предмет исследования – уровень концентрации частиц МП в средах Азовского моря, качественный и количественный состав.

Соответствие диссертационного исследования паспорту специальности.

Тема научной работы соответствует паспорту специальности 1.6.21 – «Геоэкология».

В связи с выполненными исследованиями и оценкой загрязнений, зафиксированных в средах Азовского моря, данная работа полностью отвечает приведенным пунктам паспорта специальности:

4. Глобальные и региональные экологические кризисы – комплексные изменения окружающей среды и ее компонентов, приводящие к резкому ухудшению условий жизни и хозяйственной деятельности.

5. Природная среда и индикаторы ее изменения под влиянием естественных природных процессов и хозяйственной деятельности человека (химическое и радиоактивное загрязнение биоты, почв, пород, поверхностных и подземных вод), наведенных физических полей, изменения состояния криолитозоны.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые проведена оценка загрязнения Азовского моря (воды, донных и пляжевых отложений, моллюсков) частицами микропластика;
- определены и описаны морфологические особенности, размерный ряд, виды деградации МП во всех средах;
- проведена идентификация частиц МП по химическому составу в средах Азовского моря;
- исследованы основные источники поступления МП в Азовское море с речным стоком, атмосферными выпадениями, материалом абразии берегов;

- выполнено зонирование акватории Азовского моря по степени загрязнения микропластиком и выделены импактные зоны.

Практическая значимость.

Полученные результаты исследования могут быть положены в основу мониторинга загрязнения Азовского моря МП, а также служить информационной базой для принятия природоохранными организациями важных решений по снижению негативных последствий от загрязнения микропластиком среды и биоты.

Материалы диссертации могут применяться в учебном процессе при чтении курсов лекций «Гидрология», «Региональные проблемы комплексного управления прибрежными территориями», «Современные проблемы Больших морских экосистем» и для осуществления практических и лабораторных работ в Институте наук о Земле Южного федерального университета.

Достоверность результатов.

Достоверность полученных в ходе проведения научного исследования результатов и выводов данной работы подтверждается большим объемом полевых и лабораторных исследований. Всего собрано и обработано 51 проба воды, 27 проб донных осадков, более 72 проб пляжевых отложений, 44 пробы моллюсков, 11 проб атмосферных выпадений, 13 проб воды в устьевых областях рек, 8 проб почв прибрежной зоны. В лабораторных условиях с использованием стереомикроскопа Микромед МС-1 вар. 2С Digital выполнено определение количественного состава, морфологических и морфометрических особенностей МП во всех средах в количестве 255 проб; определена степень деградации микропластика с помощью растрового электронного микроскопа VEGA II LMU в количестве 59 проб; определен химический состав МП на ИК-Фурье спектрометрах JASCO FT/IR-6800 и ФСМ 2202 в 80 подобных образцах. В ходе проведения исследований полученные результаты по Азовскому морю сопоставлялись, с данными по другим морям Мирового океана.

Личный вклад автора.

В основу данной работы положены данные, которые были получены в результате проведения экспедиционных и лабораторных исследований. Работы осуществлялись в период с 2019 года по 2023 год. Автор принимала участие в полевых экспедиционных исследованиях, лично проводила отбор и пробоподготовку образцов для дальнейшего лабораторного анализа, осуществляла количественный анализ частиц МП в отобранных образцах по методике Национального управления океанических и атмосферных исследований NOAA (Masura et al., 2019). Также были выявлены морфологические и морфометрические характеристики обнаруженных частиц микропластика. В работе использовались статистические и картографические методы исследований. Кроме того, произведена подготовка полученных результатов к опубликованию в научных журналах. Постановка проблемы, анализ, обобщение полученных результатов проведены лично автором. Результаты исследований были представлены на российских и международных научных конференциях и семинарах.

Апробация работы и публикации.

Основные результаты и положения по теме научного исследования были опубликованы в 10 печатных работах, три из которых представлены в ведущих рецензированных изданиях, рекомендуемых ВАК.

Результаты данного исследования также были представлены на следующих российских и международных конференциях и семинарах:

- II Международная научная конференция «Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов («Опасные явления – II»)) памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова (6-10 июля 2020 года, г. Ростов-на-Дону, Россия);
- XIV Международная научная конференция «Общество: научно-образовательный потенциал развития (идеи, ресурсы, решения)» (25 марта 2021 года, г. Чебоксары, Россия.);

- ReEarth 2021: Международная научно-исследовательская конференция по перспективным исследованиям в науках о Земле (23 июня 2021 года, г. Барнаул, Россия);

- Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием: «Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана» (20–25 сентября 2021 года, г. Сочи, Россия);

- Seminars of the Department of Ecology and the Center for Research on Biodiversity and Global Change (CIBC-UAM). “Análisis de microplásticos en el Mar de Azov: de la cuantificación a la asimilación a través de las redes tróficas marinas” (27.05.2022, г. Мадрид, Испания);

- Международная научная конференция «Современные тенденции низкоуглеродного развития: глобальные и региональные аспекты» (28 июня – 01 июля 2023 года, г. Грозный);

- Международная научно-практическая конференция «Проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования», посвященной 20-летию кафедры океанологии ЮФУ (базовой кафедры ЮНЦ РАН) и памяти первого заведующего кафедрой члена-корреспондента РАН Дмитрия Геннадьевича Матишова (09-13 сентября 2024 года, г. Новороссийск, п. Абрау-Дюрсо);

- Студенческие научные конференции Южного Федерального Университета «Неделя науки» (2019–2022);

Основные защищаемые положения:

1. Исследованием установлено, что микропластик содержится во всех средах Азовского моря с наибольшими концентрациями в зоне влияния г. Таганрога и стока р. Дон (более 90 шт./кг), стока р. Кубань (более 100 шт./кг) и плюма черноморских вод в Керченском предпроливье (более 80 шт./кг).

2. Морфологические и морфометрические особенности обнаруженных частиц характеризуются преобладанием вторичного МП размером от 0,1 до 1 мм, представленного обесцвеченными волокнами и пленками высокой степени деградации с уровнем концентрации в средах от 58 до 90%.

3. Большая часть обнаруженных частиц микропластика (> 90%) по своему составу является полистиролом, полиэтиленом, полипропиленом, акрилом, полиамидом, полиэтилентерефталатом, используемые населением.

4. В Азовском море выявлено три зоны с различным уровнем загрязнения микропластиком в средах: высокий – прибрежная зона (до глубины 5 м), средний – на глубинах от 5 до 10 м, и низкий – центральная акватория (до глубины 13 м).

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы состоит из 158 страниц, включая 64 рисунка и 9 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, проф. д.г.н. Беспаловой Л.А. за советы и поддержку на всех этапах проведения научного исследования, а также выражает свою благодарность к.г.-м.н. Попову Ю.В., руководителю «Центра исследований минерального сырья и состояния окружающей среды» ЮФУ за помощь в исследовании частиц МП на растровом электронном микроскопе, к.ф.-м.н Пляка П.С., заведующему лабораторией прикладного научного приборостроения ЮНЦ РАН за помощь в исследовании частиц МП на ИК-Фурье спектрометре, С.Б. Зайченко, научному сотруднику Центра коллективного пользования «Молекулярная спектроскопия» на базе НИИ физической и органической химии ЮФУ за помощь в исследовании МП на ИК-Фурье спектрометре, руководителю лаборатории физики моря АО ИО РАН д.ф.-м.н., Чубаренко И.П. за взаимодействие при освоении методики обработки МП в морской среде. Автор благодарит за поддержку весь коллектив кафедры океанологии (базовая кафедра ЮНЦ РАН) Института наук о земле Южного федерального университета.

1. ГЛАВА. ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МИКРОПЛАСТИКОМ МИРОВОГО ОКЕАНА

Важная современная экологическая проблема, которая недостаточно освещена в отечественной научной печати: загрязнение морской среды микропластиком (МП). Одним из основных вопросов при изучении микропластика является отсутствие стандартизированных аналитических методов. В разных исследованиях часто используются различные подходы к отбору проб, обработке и анализу микропластика, что приводит к получению противоречивых данных, которые трудно сравнивать (Hidalgo-Ruz et al., 2012). Такая вариативность мешает оценить истинные масштабы загрязнения и разработать эффективные стратегии смягчения последствий.

Использование пластиковых материалов широко распространено в различных секторах промышленности благодаря их физико-химическим характеристикам, таким как низкая стоимость, высокая прочность и универсальность. Мировое производство пластмасс резко возросло - с 1,5 млн тонн в 1950-х годах до более чем 335 млн тонн в последние годы, при этом значительная его часть потенциально попадает в морскую среду в результате неправильного обращения с отходами (Alimba & Faggio, 2019). Пластиковые отходы подвергаются фрагментации под воздействием физических, химических и биологических процессов. Образовавшиеся макро-, микро- и наночастицы попадают в морскую среду через реки, ветер и т. д. (Barnes et al., 2009; Lebreton et al., 2017). На скорость фрагментации влияют такие факторы, как тип пластика, условия окружающей среды и продолжительность воздействия, что затрудняет прогнозирование и моделирование образования микропластика. Сегодня МП присутствует во многих средах, таких как океаны, реки, почва и атмосфера (Barrett et al. 2020; Анциферова и др., 2025; Wainkwa Chia et al., 2021), что свидетельствует о повсеместной проблеме загрязнения. Обнаружение этих загрязнителей в изолированных районах свидетельствует об их далеко идущем распространении и подчеркивает значение атмосферного переноса и водных течений в их распространении (Akdogan & Guven, 2019; Rezania et al., 2018).

Большое беспокойство так же вызывает способность пластика к адсорбции. Было обнаружено, что микропластик адсорбирует тяжелые металлы, полихлорированные бифенилы (ПХБ) и другие загрязнители присутствующие в окружающей среде. Степень адсорбции зависит от площади поверхности, типа полимера и условий окружающей среды (Holmes et al., 2012). После адсорбции эти загрязняющие вещества могут переноситься на большие расстояния и попадать в организм при проглатывании. Микропластик заглатывается широким кругом морских организмов, от планктона до хищников. Такое попадание может происходить как непосредственно через потребление загрязненной воды или принятие фрагментов пластика за добычу, так и опосредованно, через трофические цепи (Rochman et al., 2015). Наличие микропластика в организме морских видов может привести к физическому и физиологическому ущербу, включая снижение активности питания, нарушение репродуктивных функций (Elizalde-Velázquez & Gómez-Oliván, 2021) и воздействие токсичных веществ, адсорбированных на поверхности пластика.

Анализ исторической динамики загрязнения окружающей среды МП частицами представляет собой комплексное исследование, направленное на выявление эволюции данного вида загрязнения во времени и определение ключевых факторов, способствовавших его интенсификации. Несмотря на то, что микропластик был признан опасной формой загрязнения только в последние десятилетия, его наличие в окружающей среде отслеживается начиная с 1940-х годов, периода, когда наблюдался рост производства и потребления пластмассовых материалов.

Первые этапы исследовательской работы показали обилие и широкое распространение микропластика в морской среде, особенно вдоль береговой линии и в срединно-океанических грядках, а также фокусировались на анализе его влияния на морскую среду, учитывая выявленные риски пластиковых отходов для морских организмов, включая птиц, черепах и рыб (Cole et al., 2011). В течение 1970-х и 1980-х годов научное сообщество акцентировало внимание на изучении последствий пластикового загрязнения для крупных морских животных, таких как

киты и дельфины. К 1990-м годам исследовательская база была расширена за счет включения в анализ воздействия МП на экосистемный уровень.

Так, загрязнение морской среды пластиковыми отходами стало восприниматься как проблема глобального масштаба, о чем свидетельствует включение данной темы в список ключевых проблематик Международной организации ЮНЕСКО, связанных с использованием ресурсов Мирового океана (Иванова, 2018). В то же время вопросы управления пластиковыми отходами на суше продолжают рассматриваться как задачи, имеющие преимущественно региональное или локальное значение, с редкими исключениями на национальном уровне. В 1960 году были заключены первые международные соглашения, направленные на рациональное использование ресурсов Мирового океана и защиту его вод от загрязнения.

В интервале между 1950 и 1960 годами XX века, промышленное изготовление популярных видов пластмасс, находящихся в основе современного ассортимента товаров, включая предметы однократного использования, упаковочные материалы, бутылки, контейнеры и пакеты из полипропилена и полистирола, находилось в состоянии развития. В то время как, определенные виды пластика, такие как полиэтилентерефталат, еще не были изобретены. В этот период наблюдалась тенденция к усилению загрязнения Мирового океана промышленными и бытовыми отходами, обусловленная стремительным возрождением мировой экономики после завершения Второй мировой войны (Иванова, 2018).

Любой пластиковый контейнер, попадающий в морскую среду, представляет собой существенную экологическую угрозу из-за его инертности к физико-химическим воздействиям, включая устойчивость к ультрафиолетовому излучению, экстремальным температурам и химическим реагентам, что обеспечивает продолжительный период его разложения, охватывающий промежуток от 100 до 1000 лет. В процессе деградации под влиянием разнообразных внешних факторов пластик преобразуется в микропластик,

оказывающий еще более выраженное негативное воздействие на морские экосистемы.

Источники наземного происхождения, в том числе городские и сельские стоки, очищенные на сооружениях коммунальной инфраструктуры, а также отходы промышленного и сельскохозяйственного секторов, способствуют значительному поступлению микропластика в речные и прибрежные экосистемы. Последующее перемещение этих частиц в морские и океанические воды приводит к их кумулятивному накоплению и долгосрочному сохранению, где они подвергаются перемещению под воздействием океанических течений и атмосферных ветров.

Для выявления тенденций загрязнения МП акватории и побережья Азовского моря и сопредельных вод логично опираться на прогноз развития производства пластмасс и их использования в мире и в нашей стране.

1.1. Понятие микропластик, его классификации и источники поступления в морскую среду

Пластиковый мусор, встречающийся в океане, имеет различные размеры, которые принято разделять на следующие размерные классы: макропластик (> 250 мм вдоль наибольшей оси), мезопластик ($5\text{--}250$ мм), крупный ($1\text{--}5$ мм) и мелкий ($0,1\text{--}1$ мм) микропластик, нанопластик ($<0,1$ мм) (Eriksen et al., 2014), см. рис. 1.1. Микропластик (МП) – это мелкие пластиковые частицы размером менее 5 миллиметров, которые представляют собой конечный продукт деградации более крупных пластиковых предметов, таких как бутылки, упаковка, рыболовные сети и прочие. Кроме того, микропластик может первоначально содержаться в составе продуктов личной гигиены, например, в отшелушивающих скрабах, а также изделиях из синтетических тканей, которые в процессе стирки высвобождают микроскопические волокна.

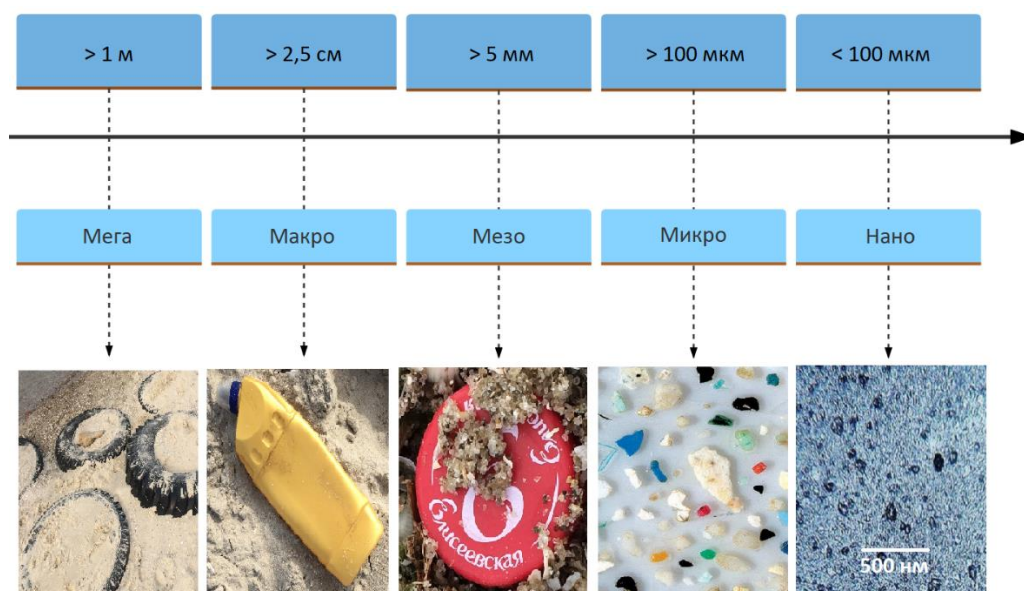


Рисунок1.1 – Размерные классы пластикового мусора

В современной научной литературе установлено разделение микропластиковых частиц, обнаруживаемых в окружающей среде, на две основные категории: первичные и вторичные МП частицы (GESAMP, 2015; Thompson, 2015). Первичный МП производится небольшого размера для его последующего использования в разнообразных товарах потребления, включая, но не ограничиваясь, микросферами в косметических средствах личной гигиены и пластиковыми гранулами, применяемыми в промышленном производстве. Вторичный МП, образуется в результате деградации и фрагментации более крупных пластиковых изделий, включая упаковочные материалы и другие потребительские товары, на более мелкие частицы. Различие между этими категориями помогает определить источники и пути загрязнения окружающей среды микропластиком.

В соответствии с данными, представленными Андради (Andrady, 2011), можно утверждать, что сегодня, примерно 80% частиц микропластика в океане обладают вторичным происхождением. Аналитические выводы, основанные на модельных оценках, проведенных Боушер и Фриот (Boucher, Friot, 2017), указывают на то, что доля первичного микропластика в океанах колеблется между 15 и 31 %. Под первичным МП подразумеваются мелкие пластиковые частицы, чей размер не превышает 5 мм, и которые находят обширное применение как в быту,

так и в различных отраслях промышленности. В контексте промышленного использования и производства, первичный микропластик используются благодаря своим малым размерам и физическим свойствам. Обычно он используется в качестве абразивов в дробеструйных процессах, компонентов в медицинских изделиях и в косметических продуктах. Кроме того, он служит сырьем для синтеза более крупных пластиковых изделий, внося значительный вклад в развитие индустрии производства пластмасс (Jambeck et al., 2015). В сегменте продукции личной гигиены и косметики, включая зубные пасты, косметические средства, а также очищающие и отшелушивающие средства для кожи, микропластик выполняет функцию улучшения чистящих свойств или добавления цвета (Gewert et al., 2015). Первичный микропластик производится в нескольких формах, включая сферы, порошки и гранулы. Каждая форма служит определенным промышленным целям: Сферы обычно используются для создания пластиковых потребительских товаров с помощью различных процессов формовки. Порошки используются в косметике и фармацевтике благодаря своей тонкой текстуре и простоте применения. Гранулы используются в абразивной обработке и очистке благодаря своей грубой природе и высокой прочности (Horton et al., 2017). Основными причинами попадания этих гранул в окружающую среду являются промышленные утечки, аварии во время транспортировки, перегрузки или на стадиях производственного процесса (Ivar do Sul et al., 2009).

Частицы вторичного микропластика характеризуются значительным разнообразием в своей структуре и форме, охватывая спектр от неправильно сформированных фрагментов и кусков до пленок, частиц вспененных полимеров, отделенных волокон и лесок, а также других подобных элементов. Эти частицы могут содержать в себе не только основной пластиковый материал, но и различные вещества, добавленные в процессе производства или адсорбированные из окружающей среды, включая химически адсорбированные соединения, частицы осадков, биологические пленки и другие элементы. Фотографии (рис. 1.2) дают некоторое представление о разнообразии вторичных частиц МР в морской среде.

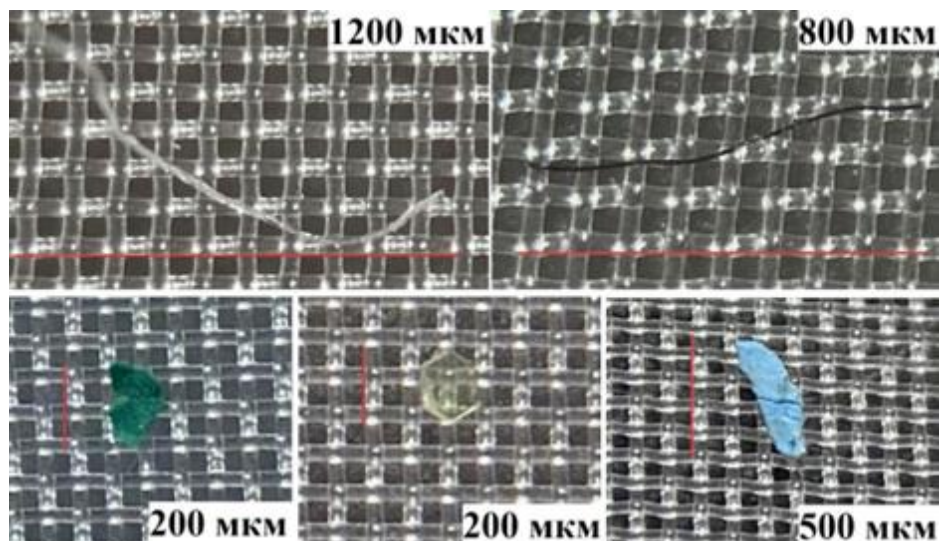


Рисунок 1.2 – Примеры частиц вторичного МП, собранного в Азовском море – фрагменты, плёнки, волокна

Фрагментация - ключевой процесс в образовании вторичного микропластика. Процесс фрагментации крупных пластиковых объектов может происходить как в результате их эксплуатации, так и в процессе разрушения в окружающей среде. К первым относятся выбросы твердых частиц в ходе промышленного производства или обслуживания изделий из пластика, а также выбросы пыли и волокон, возникающие от износа пластмасс при их стандартном использовании. Важным фактором, способствующим генерации микропластика в окружающей среде, являются пластиковые отходы, обнаруживаемые на свалках, в лесных массивах, на береговых линиях и в водных бассейнах. Под действием ультрафиолетового излучения, температурных изменений, физического и химического воздействия, пластиковые отходы становятся более хрупкими и подверженными разрушению, что при участии ветра и волн приводит к образованию частиц микропластика (Andrady, 2015). Предполагается, что для морской среды данный процесс будет играть ключевую роль в образовании микропластика в будущем, даже при условии эффективного применения мер по сокращению попадания крупных пластиковых отходов в окружающую среду (Andrady, 2011). К настоящему времени глобальные оценки объемов попадания первичного микропластика в морскую среду отсутствуют, однако уже были предприняты попытки провести оценку по конкретным странам и источникам, что позволило получить представление о

потенциальных масштабах проблемы. Скорость увеличения концентрации вторичных МП в морской среде пока что остается неопределенной из-за множества факторов, влияющих на этот процесс, от типа используемого полимера до конкретных условий окружающей среды (Song et al., 2017). Фрагментации крупных пластиковых отходов может способствовать деятельность микроорганизмов или активность животных (Sundt et al., 2014), механическое выветривание, фотодеградация – с переменной скоростью приводящая к фрагментации пластиковых частиц, в зависимости от условий окружающей среды, таких как температура, глубина воды. (Cooper, Corcoran, 2010).

Например, исследование Mateos-Cárdenas et al. (2020) показало, что пресноводная амфипода *Gammarus duebeni* может быстро фрагментировать полиэтиленовый микропластик, что подчеркивает роль биологических факторов в образовании микропластика. Аналогичным образом, Калогеракис и др. (2017) исследовали фрагментацию полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) в смоделированных береговых и прибрежных условиях, показав, что механическое напряжение и воздействие ультрафиолета имеют решающее значение для начала образования микропластика. Совместное влияние всех перечисленных факторов практически не изучено, что существенно затрудняет оценку интенсивности образования МП в морской среде (Ter Halle et al., 2017; Burns, Boxall, 2018).

Перенос вторичных частиц МП в морскую среду осуществляется преимущественно с территории суши или через прибрежные зоны. Речные системы играют ключевую роль в перемещении бытовых и промышленных стоков из населенных пунктов, а также пластиковых отходов, подвергшихся фрагментации в прибрежных районах. Фрагментация пластиковых материалов в зонах морских границ может происходить как на поверхности воды, так и в прибрежных районах, главным образом под влиянием ультрафиолетового излучения и действия поверхностных волн (Andrady, 2011, 2017; Efimova et al., 2018; Chubarenko et al., 2020).

1.2. Современный уровень исследования загрязнения микропластиком

В контексте современных исследований твердых антропогенных отходов значительное внимание акцентируется на проблематике микропластика (МП). Первые эмпирические данные, указывающие на присутствие МП при анализе проб фитопланктона, были зарегистрированы в начале 1970-х годов (Carpenter et al., 1972; Carpenter, Smith, 1972), однако активизация дискуссий о влиянии МП на экосистему Мирового океана в международном научном сообществе произошла только в последние годы (Rochman et al., 2013; Ivar do Sul, Costa, 2014; Browne et al., 2011; Fendall, Sewell, 2009). В русскоязычных исследовательских базах, содержащих публикации по этой теме, можно найти не более ста научных работ. Вариабельность данных относительно объема и массы плавающих пластиковых отходов может быть обусловлена неравномерным охватом различных регионов исследованиями, а также разнообразием методологических подходов, включая численные модели и методы интерполяции данных (Van Sebille et al., 2015). Несмотря на это, наблюдения в наиболее тщательно исследованных районах позволяют с высокой степенью достоверности оценить уровень загрязнения морских акваторий плавающими пластиковыми отходами. В то же время, в морских течениях Южного полушария наличие плавающих фрагментов пластика фиксируется лишь в количестве, едва достаточном для подтверждения их присутствия (Cózar et al., 2014; Eriksen et al., 2014, 2013). Расширенные пространства океанической поверхности, расположенные вне основных круговоротов, остаются в значительной степени неисследованными, что вносит значительные погрешности в глобальные оценки объемов плавающего пластика (Van Sebille et al., 2015).

Пластиковые отходы в океане вызывают все большую озабоченность экологов, и по всему миру выявлены значительные зоны их скопления. Эти районы, часто называемые мусорными пятнами, в основном расположены в субтропических районах океана и характеризуются высокой концентрацией пластиковых отходов (рис. 1.3). Наиболее известным из них является Большое тихоокеанское мусорное пятно (GPGP), обнаруженное в субтропических водах

северной части Тихого океана, которое продемонстрировало масштабы воздействия пластиковых отходов на океанические экосистемы (E. Seville et al., 2015, M. Egger, F. Sulu-Gambari, L. Lebreton., 2020). Количественный анализ, выполненный на основе данных, собранных различными исследовательскими кораблями и самолетами, демонстрирует, что в определенной акватории океана на поверхности воды находится минимум 79 000 тонн (от 45 000 до 129 000 тонн) пластиковых отходов, охватывающих площадь примерно в 1,6 миллиона квадратных километров (Lebreton et al., 2018). Кроме того, более мелкие фрагменты изначально плавучего пластикового мусора накапливаются в морских глубинах под мусорным пятном (Egger, Sulu-Gambari, & Lebreton, 2020). Более 75% массы этих пластиковых отходов составляют объекты с размером более 5 см, при этом не менее 46% от этой массы приходится на рыболовные сети. Микропластик, занимая около 8% общей массы, тем не менее, составляет 94% от общего количества частиц (Lebreton et al., 2018). Распространение пластиковых отходов не ограничивается этими пятнами, а распространяется по различным морским средам, причиняя вред водным организмам в результате проглатывания и запутывания.

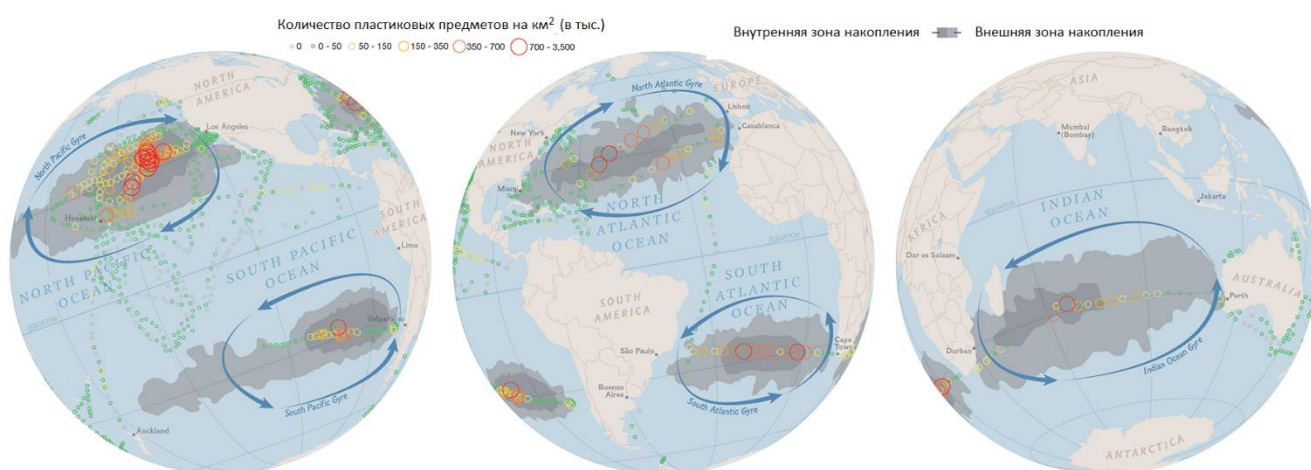


Рисунок 1.3 – Концентрация пластикового мусора в поверхностных водах Мирового океана (Cózar et al., 2014; Fdez-Sevilla, 2014)

Исследования по загрязнению морских вод отходами из синтетических полимеров находятся на этапе, который можно сравнить с периодом географических открытий в истории океанологии. В этом контексте особую ценность представляют исследования, направленные на глобальный анализ

загрязнения, учитывая возможные различия в применяемых методологиях, схемах, инструментах, подходах к обработке проб, метриках и другие аспекты, влияющие на точность получаемых результатов. В качестве примера можно привести исследование, осуществлённое Бусом и его коллегами в 2017 году, цель которого заключалась в оценке относительного распределения микропластика в разнообразных морских экосистемах (Booth et al., 2017). Данный анализ был основан на обработке исследовательских данных, опубликованных в период с 2000 по 2017 год (Auta, Emenike, & Fauziah, 2017; Bergmann et al., 2015; Browne et al., 2011, 2010; Cole et al., 2011; Connors et al., 2017; Van Cauwenberghe et al., 2015).

Представленные в таблице 1 результаты анализа концентрации частиц микропластика в поверхностных водах, на пляжах и в донных отложениях указывают на значительные различия. Однако, стоит отметить существенные ограничения при интерпретации таких глобальных выводов, особенно в свете ограниченного объема первичных данных. Высокий уровень вариабельности получаемых данных может быть коррелирован с отсутствием унифицированных методических подходов к процедурам сбора и анализа проб МП. В частности, данные, полученные из полнообъемных проб воды в рамках различных исследований, систематически показывают значения микропластика, значительно превышающие те, что были выявлены с использованием сетей. Это наблюдение подразумевает возможность существенных потерь или недостаточности эффективности выборочного метода, основанного на использовании сетей. Анализ таблицы подчеркивает значительные расхождения в концентрациях микропластика в рамках одного типа среды. Наименьший диапазон различий до 1–3 порядков в донных отложениях предполагает воздействие течений и ветра на перемещение и распределение частиц МП. Кроме того, наибольшая степень загрязнения абиотических сред наблюдается в пляжевых отложениях и прибрежных зонах, что соответствует наблюдаемой тенденции к накоплению микропластика в этих средах со временем.

В исследовании, проведенном Booth и соавторами (2017), был рассмотрен процесс аккумуляции пластиковых отходов на морском дне. Отмечается, что на

сегодняшний день свыше 90% частиц МП концентрируются в океанических донных осадках. Анализ показал, что более 8% от общего объема микропластика находится в водной толще, в то время как оставшаяся часть распределена между поверхностным слоем воды и биотой морских организмов, как демонстрируется в таблице 1 исследования. Результаты такого исследования способствуют выявлению общих закономерностей в глобальном распределении пластикового мусора в морских экосистемах.

Как видно из приведенной таблицы изучение загрязнения микропластиком в последние годы набрало значительный оборот, и многочисленные исследования посвящены пониманию его распространенности, источников и последствий в различных морских средах по всему миру. Так, например подробное исследование Средиземноморского бассейна, проведенное Аутой, Эменике и Фаузией (2017), показало обширное загрязнение микропластиком воды и донных отложений, подчеркнув настоятельную необходимость в эффективных стратегиях управления отходами для смягчения этой растущей экологической угрозы. Авторы отметили, что МП представляет собой не только видимую и эстетическую проблему, но и создает значительный риск для морского биоразнообразия и здоровья человека из-за своей способности адсорбировать токсичные вещества и выступать в качестве переносчиков загрязнителей (Auta, Emenike, & Fauziah, 2017).

В исследовательской работе, выполненной командой под руководством Манбохи было сосредоточено внимание на анализе уровня загрязнения микропластиком поверхностных вод прибрежной и морской зон южной части Каспийского моря. Результаты данного исследования обнаружили наличие и широкое распространение частиц МП (средняя концентрация МП составила $0,246 \pm 0,020$ шт/м³) в данной морской экосистеме (Manbohi et al., 2021). В рамках отдельного исследовательского проекта, проведенного Гайебзаде и коллегами, была осуществлена оценка загрязнения МП донных отложений на южном побережье Каспийского моря. Данный анализ выявил наличие МП на морском дне (средняя концентрация МП составила $183,5 \pm 154,4$ шт/кг), и предоставил данные о его разновидностях (Ghayebzadeh et al., 2020).

Таблица 1.1 – Уровень концентраций микропластика в различных средах Мирового океана

Среда Мирового океана	МП в поверхностных водах шт./л (макс.-мин.)	МП в пляжах и побережьях шт./кг (макс.-мин.)	МП в донных осадках шт./кг (макс.-мин.)	Источники
Мировой океан (минимальная Концентрация)	$8,5 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	2,155	(Booth et al., 2017)
Мировой океан (максимальная концентрация)	16	4340	1792	(Booth et al., 2017)
Азовском море	0-9	12-112	27-130	(Глушко и др., 2021) (Глушко и др., 2021)
Черное море	$0,62 \cdot 10^{-3}$ -16,3	3-100	-	(Stanislava K. Georgieva et al., 2023; Savuca et al., 2022; Сибирцова и др., 2022)
Балтийское море	0,07-2,6	0,2-572	0-10179	(Чубаренко и др., 2021; B. Graca et al. 2017; Chubarenko et al., 2018; Esiukova, 2017)
Северное море	-	$23,4 \pm 18,9 - 69,3 \pm 30,6$	-	(Doyen et al., 2019)
Средиземное море	-	12-798	900±100	(Constant et al., 2019; Alomar et al., 2016)
Каспийское море	-	-	$13-740 \pm 105$	(Bagheri et al., 2020; Ghayebzadeh et al., 2020)
Южно-Китайское море	-	415-721	$169 \pm 48 - 221 \pm 45$	(Prarat et al., 2020; Cheang et al., 2018)
Желтое море	0,02-0,12	-	7 - 25	(Zheng et al., 2019)
Залив Тампа, Флорида	$1,2 \cdot 10^{-3}$ -7	-	30-790	(McEachern et al., 2019)
Токийский залив	-	-	1845-5385	(Matsuguma et al. 2017)
Хиросимский залив	-	5-1245	24-253	(Sagawa et al. 2018)
Большой Австралийский залив	-	-	0-13,6	(Barrett et al. 2020)
Арктический центральный бассейн	$0-7 \cdot 10^{-3}$	-	100-200	(Kanhai et al., 2018; Kanhai et al., 2019)

Исследовательская работа, осуществленная в Черном море, привела к идентификации основных зон аккумуляции частиц МП в данном регионе. Анализ показал, что такие факторы, как стоки рек, интенсивность экономической деятельности в прибрежных зонах и последствия пандемии COVID-19, оказали значительное влияние на увеличение количества микропластика. Средняя концентрация МП в пробах донных осадков составила $106,7 \text{ шт/кг}^{-1}$ (Savuca et al., 2022). Исследование проведенное в период с 2015 по 2016 год на территории прибрежной зоны лагуны Синоп Сарыкум, расположенной на юге Черного моря, выявило, что в этой области преобладают такие типы МП, как фрагменты корабельных красок, волокна, обломки твердого пластика и нейлоновые частицы (Oztekin & Bat, 2017).

Исследования в Баренцевом, Карском и Белом морях выявили значительные концентрации микропластика, причем наибольшее количество обнаружено у западного побережья архипелага Новая Земля, особенно на Гусиной банке. Характер распределения микропластика соотносится с циркуляцией океана и промысловой деятельностью, что указывает на антропогенное влияние и естественные процессы в распространении микропластика в этих водах. В частности, на более высокие концентрации в Белом море влияет сток реки Северная Двина, в то время как в Карском море наблюдаются относительно низкие концентрации, что говорит о различных источниках и механизмах переноса микропластика в этих регионах (Tošić et al., 2020).

Балтийское море, уникальная и чувствительная морская экосистема, было в центре внимания многочисленных исследований загрязнения микропластиком. Багаев и Чубаренко (2017) сосредоточили внимание на численном моделировании этого загрязнителя в Балтийском море, предложив фундаментальное понимание закономерностей распространения и потенциальных источников МП в регионе (Bagaev & Chubarenko, 2017). Исследование Болмана оценивает попадание микропластика в Балтийское море через городские воды, подчеркивая значительную роль городских стоков и сточных вод в переносе этих загрязнителей в морскую среду (Bollmann et al., 2019). Авторы Есюкова, Чубаренко в своем

исследовании использовали спектральный анализ МП и модифицированный метод NOAA для количественной и качественной оценки загрязнения МП донных отложений Балтийского моря (103–10179 шт/кг), описав степень загрязнения микропластиком за 2015-2016 годы (Есюкова, Чубаренко, 2019; Esiukova et al., 2018).

В ряде других отечественных научных трудов представлены результаты исследований, касающиеся характеристик распределения МП на песчаных пляжах Калининградской области (Балтийское море). Эти исследования были проведены специалистами Института океанологии Российской академии наук имени П.П. Ширшова (Есюкова Е.Е., Чубаренко И.П., 2018; Chubarenko et al., 2020; Chubarenko et al., 2016; Vagaev et al., 2017), которые в совокупности предоставляют обширный анализ проблемы МП загрязнения в данном районе. Исследования, проведенные Институтом биологии южных морей имени А. О. Ковалевского Российской академии наук, под руководством Сибирцовой Е. Н., сфокусированы на изучении загрязнения МП пляжей города Севастополя в летний период 2016–2017 годов (Сибирцова Е. Н., 2018). Данные исследования обеспечивают ценный вклад в понимание масштабов и особенностей распространения МП в морских и прибрежных экосистемах, подчеркивая необходимость разработки и реализации мер по снижению уровня загрязнения. В трудах О. В. Ивлиевой «Особенности осадконакопления в Азовском море» (Ивлиева, 2009) описано содержание искусственных волокон в донных осадках Азовского моря. Исследование особенностей осадконакопления в Азовском море было осуществлено на основе данных, собранных в ходе серии экспедиций, проведенных Ростовским государственным университетом в период с 1988 по 2002 год и Южным научным центром Российской академии наук с 2002 по 2007 год. Результаты указывают на широкое распространение синтетических волокон в прибрежных районах, при этом наибольшее загрязнение наблюдалось в водных взвешах западной части Таганрогского залива. В центральной части акватории концентрация синтетических волокон оказалась незначительной. Основная масса волокон сконцентрирована в прибрежных районах крупных городов, достигая

максимальных значений в районе Ейска, Мариуполя и Таганрога. Также обнаружены значительные концентрации синтетических волокон в акватории, прилегающей к меньшим прибрежным поселениям. Однако, в целом можно заключить что оценка МП загрязнения Азовского моря проводится впервые автором данного исследования.

Сегодня существует реальная угроза нанесения ущерба экосистеме Азовского моря от загрязнения пластиком. В бассейне Азовского моря расположены крупные промышленные и сельскохозяйственные центры России и Украины. Ежегодно прибрежные города сбрасывают в море тысячи тонн различных отходов. В результате чего водоем не может справиться со всем мусором, создавая обширные зоны загрязнения (мусорные районы). Под влиянием загрязнения окружающей среды происходит отравление гидробионтов, сокращение фауны, и как следствие – рыболовства, разрушение природных ландшафтов, рекреационных зон в городах-курортах, пляжей Азовского моря. Выявление степени трансформации среды обитания морских гидробионтов в результате антропогенной деятельности представляет собой актуальную задачу геоэкологии и рационального природопользования. Одним из новых направлений здесь является изучение миграции твердых антропогенных отходов (в т. ч. и микропластика), как фактора загрязнения водных экосистем.

2. ГЛАВА. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ АЗОВСКОГО МОРЯ

Азовское море представляет собой уникальную акваторию, отличающуюся рядом специфических природных характеристик. Благодаря небольшой глубине, прозрачным бирюзовым водам и протяжённым песчаным побережьям, оно пользуется значительным спросом как среди местного населения, так и у туристов из других регионов.

Расположенное в пределах степной зоны, Азовское море классифицируется как внутренний водоем. Его современный вид сформировался под воздействием длительных тектонических процессов, что обусловило характерную глубину и

форму бассейна. Участвуя в водообмене с Черным морем через цепь гидрологических связей, этот водоем опосредованно связан со Средиземным морем и далее с Атлантическим океаном. Особенности такого взаимодействия способствуют формированию сложной ландшафтной структуры морской акватории. Рельеф морского дна характеризуется преимущественно низменными равнинами и мелководными прибрежными зонами, при этом большая часть дна покрыта слоем песка и ила. Вдоль всего Азовского моря расположены многочисленные песчаные косы и отмели. Береговая линия моря отличается неровностью, включая в себя множество заливов и бухт. Структура действующих в Азовском море физико-географических процессов отражает влияние различных ландшафтообразующих факторов. На динамику вод Азовского моря в первую очередь влияют ветер, речной сток и его связь с Черным морем через Керченский пролив. Расположение Азовского моря в зоне активного функционирования индустриально развитых территориально-производственных систем юга России и Украины, на него оказывается устойчивое и многоплановое антропогенное воздействие высокой интенсивности. Это воздействие включает в себя как прямое, так и косвенное влияние человеческой деятельности на морскую среду, приводя к изменениям компонентов экосистемы.

2.1. Геологическое строение

Азовское море локализуется в Причерноморской впадине, формирование которой происходило на рубеже мезозойской и кайнозойской эр в условиях геодинамической перестройки региона. Геологическая основа данной структуры характеризуется сложным строением, обусловленным наложением разновозрастных тектонических элементов: с одной стороны – древняя докембрийская Восточно-Европейская платформа, с другой – более молодая эпигерцинская Скифская плита. В геоструктурном плане акватория Азовского моря включает ряд ключевых элементов: северную зону Причерноморской впадины, области прогибов и поднятий Причерноморского региона, а также Индоло-Кубанский прогиб (рис. 2.1) (Шнюков и др., 1974; Довгань, 1967).

Формирование Азовского моря, входящего в состав Понто-Каспийской

системы морских бассейнов, напрямую связано с геологическими изменениями, происходившими в ходе развития древнего океана Тетис. Этот океан прошел через сложный этап изменений, в результате которых происходило его постепенное сокращение, а позднее – изоляция отдельных его частей. Современное строение Азовского моря и прилегающих к нему районов – таких как Северное Приазовье, Присивашье, а также Южное и Восточное Приазовье – сформировалось в неогене и четвертичном периоде, когда завершился процесс окончательной геодинамической трансформации региона (Шнюков и др., 1974).

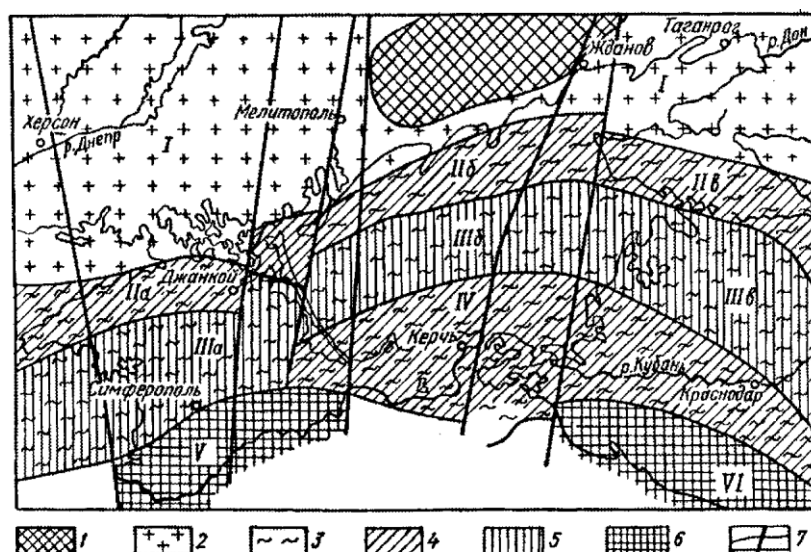


Рисунок 2.1 – Схема тектонического районирования акватории Азовского моря

«1 - выходы на поверхность древних кристаллических пород; 2 - погруженные области докембрийского кристаллического фундамента, перекрытие мезо-кайнозойскими осадками; 3 - область с эпигерцинским фундаментом; 4 - прогибы; 5 - поднятия; 6 - складчатые районы; 7 - границы геоструктур и разрывные нарушения» (Шнюков и др., 1974).

Ландшафты Азовского моря сформировались под влиянием ключевых геологических процессов, протекавших в четвертичном периоде. Эпохи континентальных оледенений и последующего таяния ледников сопровождались циклическими изменениями уровня моря – масштабными трансгрессиями и регрессиями. Во время трансгрессий границы древних морских бассейнов значительно расширялись, выходя далеко за пределы современных береговых

линий. Об этом свидетельствуют разновозрастные морские отложения, обнаруженные на Керченском и Таманском полуостровах, а также в северной части Приазовья. Во времена регрессий, напротив, значительная часть дна Азовской впадины оказывалась осушенной. В результате обширные районы дна моря в его северных, западных, южных и восточных частях оказались покрыты континентальными отложениями верхнего плейстоцена. Геологические процессы, протекающие в регионе, сыграли важную роль в формировании уникальных характеристик Азовского моря, таких как его относительно замкнутая природа и мелководность. Эти особенности, в свою очередь, ограничивают интенсивность водообмена с Черным морем. В рамках голоценовых и современных геодинамических движений наблюдаются процессы погружения, скорость которых варьирует от 1 до 2 мм в год. В центральной части акватории Азовского моря эта величина может достигать 3 мм в год (Шнюков и др., 1974).

2.2. Рельеф дна и берегов

Азовское море является примером неглубоких водных бассейнов. Максимальная глубина этого моря не превышает 15 метров, при средней глубине около 7 метров. Азовское море простирается на 360 км в длину и 180 км в ширину, береговая линия составляет около 1472 км (Экологический атлас Азовского моря, 2011).

Прибрежная зона Азовского моря определяется изобатой 10 метров и отличается высокой гидродинамической активностью. В её пределах формируются разнообразные геоморфологические структуры, включая песчаные косы, пересыпи, бары, а также сложные дельтовые, лиманные и заливные комплексы (Мамыкина, Хрусталева, 1980; Зенкович, 1958, 1962). Северное побережье Азовского моря характеризуется развитием протяжённых песчано-ракушечных кос, среди которых наиболее значительными являются Бирючья, Обиточная, Бердянская, Белосарайская, Кривая и Беглицкая. Эти аккумулятивные формы сложены преимущественно кварцевым песком с включениями биогенного материала (Матишов, 2006). Косы восточного побережья и Таганрогского залива, включая Долгую, Камышеватскую, Сазальникскую, Чумбурскую, Очаковскую,

Петрушину и Бegliцкую, отличает меньшая протяженность. Указанные косы представлены системой береговых валов, постепенно переходящих в коренной берег. Они, как правило, имеют небольшую высоту – не более 1–1,5 метра. Исключением являются отдельные возвышенные участки, например, на Ейской и Очаковской косах, где высота может достигать 2–2,5 метра (Экологический атлас Азовского моря, 2011).

Между косами и выступами побережья Азовского моря находятся несколько заливов. Среди них можно выделить Ясенский, Темрюкский, Казантинский, Арабатский, Обиточный, Бердянский и Белосарайский лиманы, включая бухту Таранья, глубины которых варьируются от 6 до 10 метров. Крупная впадина Таганрогского залива расположена к западу от устья реки Дон (Экологический атлас Азовского моря, 2011).

Арабатская стрелка, простирающаяся на 120 км, формирует естественную границу между морем и соленой лагуной Сивашского лимана. Эта узкая пересыпь, шириной от 0,3 до 4,0 км, преимущественно состоит из ракушечного материала, доля которого в некоторых местах достигает до 90% состава.

Геоморфология дна прибрежной зоны отличается наличием узких, слабо выраженных валов и гряд, сформированных под воздействием динамики ветровых, нагонных и вдольбереговых течений. В районе прибрежной полосы Азовского моря, на глубинах от 6 до 11 метров, преобладает пересеченный рельеф. Кроме того, в данной зоне широко распространены подводные плоские террасы, образующиеся в форме бенчей, которые часто ассоциируются с абразионными берегами. Например, западнее Долгой косы располагается подводная терраса, ограниченная изобатами на глубинах 6–8 метров (Матишов, 2006).

В формировании прибрежных геоморфологических структур Азовского моря участвуют: природные факторы (абразия, аккумуляция, эоловые процессы); техногенные факторы (строительство грунтовых насыпей в зонах подводных свалок, коренная перестройка береговой линии при прокладке судоходных каналов). Наиболее крупные судоходные каналы ориентированы в сторону ключевых портовых комплексов региона – Азова, Таганрога, Мариуполя и

Бердянска. Центральный сектор шельфа характеризуется обширной (порядка 5000 км²) илистой равниной с глубинами 10–13 метров (рис. 2.2) (Матишов, 2006).

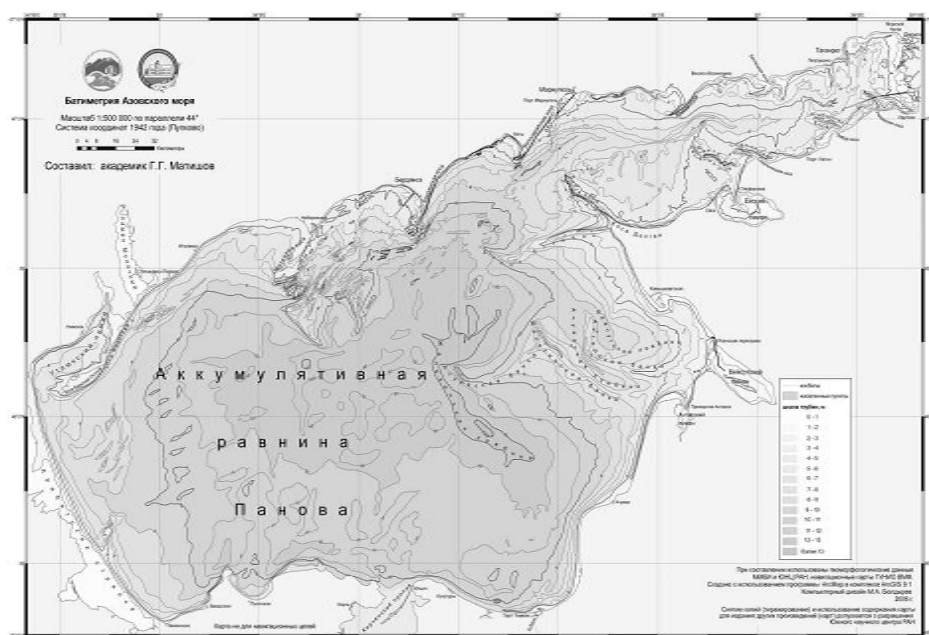


Рисунок 2.2 – Батиметрия Азовского моря (Матишов, 2006)

В подводном рельефе Азовского моря выделяется ряд крупных ложбин, среди которых особенно заметны ложбина реки Молочной, ложбина Ахтарского лимана, а также две выраженные ложбины, расположенные в акватории Темрюкского залива – одна, образованная впадением реки Кубани, и другая, связанная с Ахтанизовским лиманом. В рельефе дна моря наблюдаются отрицательные формы, которые представляют собой замкнутые понижения, которые, по предположениям, представляют собой древние озёрные котловины, находящиеся на глубине 12–13 метров (Мысливец, 2004).

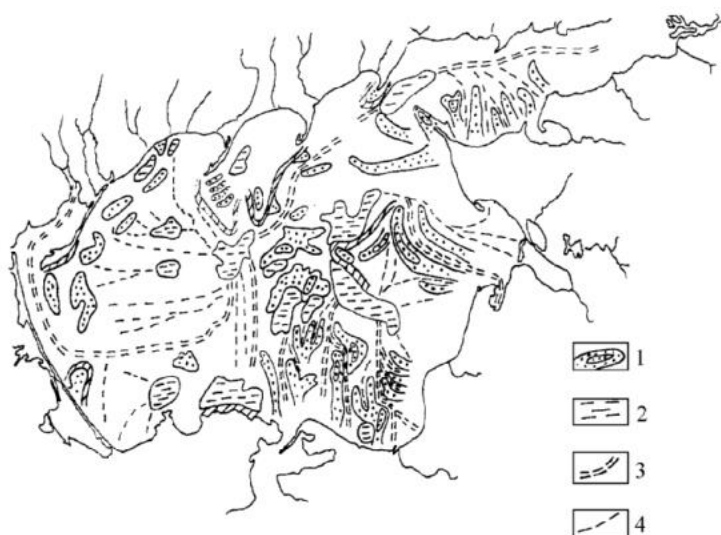


Рисунок 2.3 – Рельеф дна

«Выраженные в рельефе разломы: 1 – ограничивающие морфоструктуры; 2 – прочие; 3 – границы морфоструктур, не связанные с разломами. Региональные разломы (цифры в квадратах): 1 – Западно-Приазовский; 2 – Новотиторовский; 3 – Бердянский; 4 – Бердянско-Кальмиусский; 5 – Правдинский; 6 – Долгинский; 7 – Обиточный» (Мысливец, 2004)

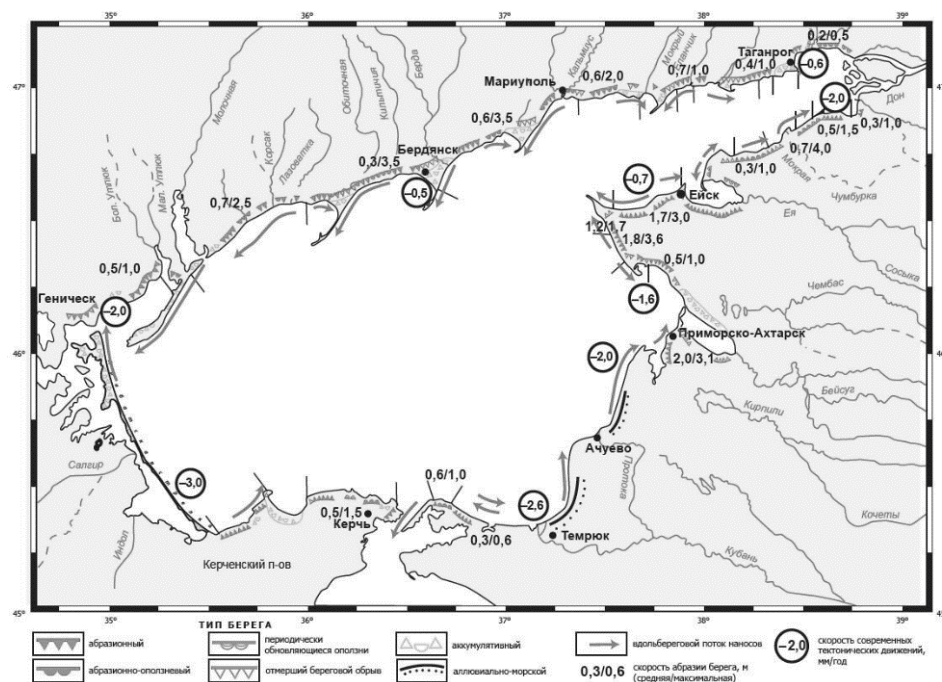


Рисунок 2.4 – Геоморфологические процессы в береговой зоне Азовского моря
(Экологический атлас Азовского моря, 2011)

2.3. Гидро климатические особенности

Температурный режим Азовского моря формируются под влиянием его небольшой глубины, расположения в глубине континента, а также атмосферной циркуляции и солнечной инсоляцией. Термический режим этого водоема характеризуется высокой пространственной однородностью и выраженной изменчивостью в течение года. При длительных ветрах средней и высокой интенсивности происходит активное перемешивание водных масс на разных глубинах, что нарушает стратификацию, установленную при спокойной погоде. В результате воды на всех глубинах становятся полностью или почти полностью гомотермальными, что подтверждается результатами многочисленных научных

исследований, проведенных в различные годы (Спичак, 1964; Бронфман, Хлебников, 1985; Куропаткин и др., 2002).

Интенсивное солнечное нагревание воды способствует поддержанию высокой средней годовой температуры воды в Азовском море, которая составляет 11,5°C. Период, в течение которого наблюдаются повышенные температуры, длится около восьми месяцев в году. В интервале между апрелем и сентябрем море получает от 65 до 70 ккал/см² в месяц солнечного тепла, а в течение всего года этот показатель достигает 85–95 ккал/см² в месяц.

Температура воды в Азовском море и его различных участках формируется под влиянием целого ряда факторов, включая степень солёности, водообмен с Чёрным морем и Сивашом, а также особенности географического расположения акватории. Минимальные значения температуры воды фиксируются в декабре и январе (от -0,7 до 2,9°C), максимальные в летние месяцы – июль и август, когда температура прибрежных мелководий может достигать 30°C (Гидрометсправочник, 1962).

В отличие от прибрежных районов, где температура подвержена резким изменениям, открытые морские воды характеризуются более плавными тепловыми процессами. Близость к берегу приводит к запаздыванию периодов нагрева и охлаждения, а также к их большей продолжительности. При этом разница между максимальными и минимальными годовыми температурами в прибрежной зоне может доходить до 28,5°C (Гидрометсправочник, 1962).

В осенне-зимний период в Азовском море наблюдается процесс охлаждения водных масс, который начинается с Таганрогского залива и постепенно распространяется в центральную часть моря. Существенные температурные колебания, достигающие 12°C и 5°C, фиксируются во 2–3 декаде октября. Первое понижение температуры воды до 0°C ежегодно наблюдается в Таганрогском заливе, обычно во второй декаде декабря (рис. 2.5) (Экологический атлас Азовского моря, 2011).

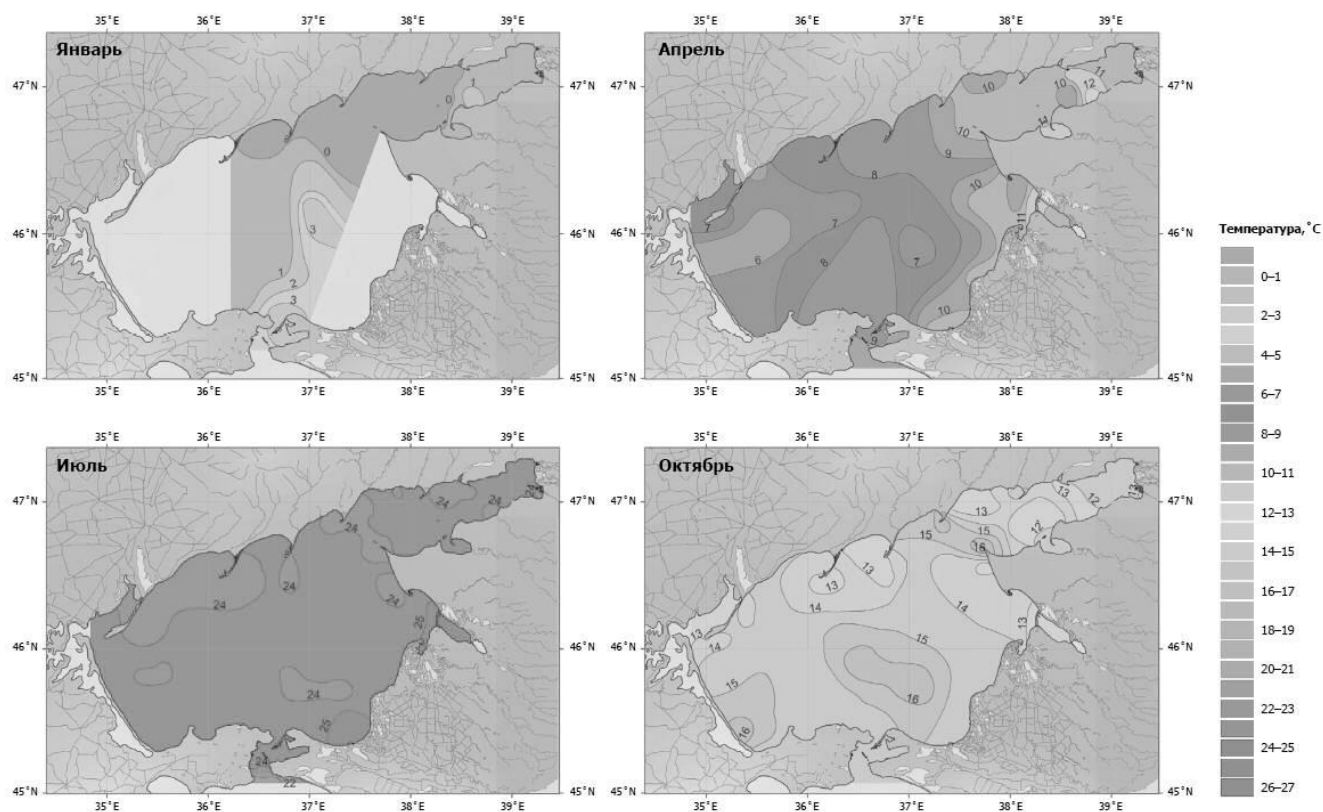


Рисунок 2.5 – Температура воды, поверхностный горизонт (Экологический атлас Азовского моря, 2011)

Изучение более чем столетнего ряда наблюдений, начиная с 1881 года, выявило, что с середины 1950-х годов XX века регион демонстрирует повышение среднего температурного фона. Это увеличение наиболее выражено в многолетних данных о весенних (начиная с 1966 г.), осенних (с 1960 г.) и особенно зимних (с 1955 г.) периодах (Воловик, 1997).

Азовское море относится к солоноватоводным бассейнам, чей гидрохимический режим определяется комплексом природных факторов. К ним относятся материковый сток, биологические процессы в водной среде, термические условия, атмосферная циркуляция, а также водообмен с Чёрным морем и Сивашом (Книпович, 1932).

Основным источником материкового стока в Азовское море являются реки Дон (68%), Кубань (27%) а также несколько малых рек, расположенных в северной и северо-восточной степной части Приазовья. Согласно установленным стандартам, общий объем естественного речного стока в Азовское море составляет 43 км³ в год (Бронфман, Хлебников, 1985, Симов, 1989).

Водный потенциал бассейна реки Дон в естественных условиях показывает значительные изменения. В годы со средней водностью объём водных ресурсов достигает 27,7 км³, в то время как в годы со средней маловодностью показатель снижается до 20,4 км³, и далее до 13,7 км³ в годы с выраженной маловодностью, при этом общий диапазон колебаний может варьироваться от 11,8 до 52 км³ в год. Вариативность годовых объёмов стока р. Кубань отмечается, с максимальным показателем в 18,3 км³ и минимальным в 8,6 км³, при этом средний многолетний составляет 11,1 км³ (Бронфман, Хлебников, 1985; Кукса, Гаргопа 2004).

История изучения солёности Азовского моря выделяет два значимых этапа: до 1952 года – периода начала использования Цимлянского гидроузла в 1952 и после этого события. Возрастание объёмов безвозвратного отбора воды из рек (до 10 км³ в год) а также на фоне неблагоприятных климатических изменений, негативно повлиявших на формирование речного стока (особенно в период с конца 1960-х до середины 1970-х годов), объём речного стока сократился до 22 км³/год. Данное уменьшение водного стока спровоцировало значительное увеличение солёности вод Азовского моря, достигшей показателя 13,8‰, в Таганрогском заливе – до 11,5‰ (Бронфман, Хлебников, 1985).

В современный период центральная часть Азовского моря в основном занята водами с солёностью 11–12‰, а Таганрогский залив преимущественно 1–9‰. Такая неоднородность обусловлена влиянием стока р. Дон и сгонно-нагонной изменчивостью уровня и характера циркуляции вод Таганрогского залива (Экологический атлас Азовского моря, 2011).

2.4. Донные осадки

Вещественный состав и генезис разнообразных осадочных формаций в Азовском море подвергались глубокому анализу в научных трудах многих исследователей (Хрусталева, Щербаков, 1974; Хрусталева, Ивлиева, 1999; Федоров, Хансигарова, Кизицкий, 1998; Ивлиева, 2009). Изучение динамичности и разнообразия седиментационных процессов в море привело к выявлению полигенного характера осадочных материалов и их специфики распределения на морском дне. Выявленные результаты указывают на изменчивость литологических

фаций, подверженных воздействию различных естественных факторов. Вопреки этой сложности, осадки морского дна можно разделить на три основные категории в зависимости от их состава и происхождения: терригенные, биогенные и смешанные терригенно-биогенные. Наиболее широкое распространение имеют терригенные осадки, представленные преимущественно крупнозернистыми песками и глинистыми илами (Хрусталеv, Щербаков, 1974). Вдоль береговой линии накапливаются осадочные отложения, в основном состоящие из алевритовых илов. В эту зону входят пляжные наносы, песчаные отложения подводных склонов, а также аккумулятивные формы рельефа, такие как косы на северном побережье и перешеек Арабатской стрелки (рис. 2.6).

Песчаные отложения берегового склона, демонстрируют ограниченную вариативность как в механическом составе, так и в качестве их сортировки. Данная характеристика свидетельствует об аналогичности гидродинамических условий, преобладающих в этом секторе. Важной особенностью осадков этой зоны, является высокое присутствие биогенных компонентов. Типичным уровнем карбонатности для отложений пляжей является значение около 15%, хотя в некоторых случаях оно может достигать 20–25%. Тем не менее, на конечных участках кос, выступающих в морское пространство, фиксируется существенный рост концентрации оболочек моллюсков, иногда увеличивающейся до 50–90% (Савельева, 1964; Щербаков, 1966; Мамыкина, Хрусталеv, 1980).

Алевритовые илы формируют кольцеобразную зону осадконакопления по периметру Азовского моря. Естественные крупнозернистые алевритовые отложения отличаются характерным желтовато-серым цветом. Наибольшие скопления таких отложений наблюдаются: в восточном секторе Таганрогского залива; в приустьевых районах реки Дон. Эти отложения демонстрируют: неоднородную гранулометрическую сортировку; средние концентрации терригенных и биогенных карбонатных компонентов. Западная граница ареала распространения крупных алевритовых отложений является динамичной и зависит от: объема поступающего осадочного материала; гранулометрических

характеристик наносов, транспортируемых рекой Дон (Мамыкина, Хрусталеv, 1980).

Мелкоалевритовые илы в естественном состоянии обладают текучей консистенцией и тёмной окраской (серой - чёрной). Процесс высушивания приводит к их осветлению (до светло-серых тонов) и существенному упрочнению. Характерной особенностью является присутствие раковинного детрита и переменная карбонатность (3-50%) (Мамыкина, Хрусталеv, 1980).

Глинистые илы доминируют в донных отложениях Азовского моря, в центральных районах с глубинами свыше 9-10 метров. Данные осадки пространственно приурочены к зонам аккумуляции, где происходит седиментация преимущественно глинистой и мелкоалевритовой фракций, поступающих с речным стоком. Для этих участков характерна минимальная гидродинамическая активность (рис. 2.6).

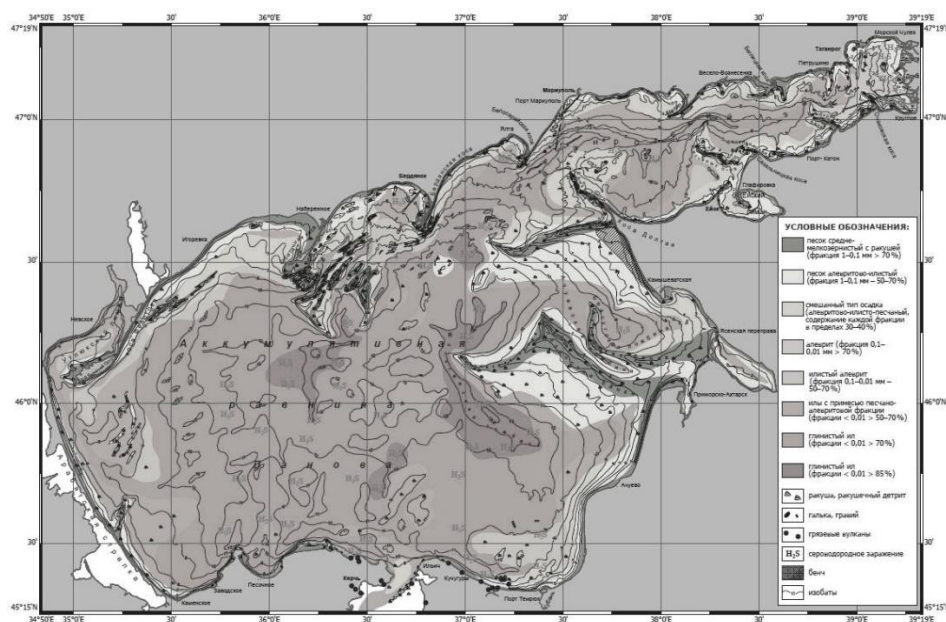


Рис. 2.6. Донные осадки Азовского моря (Матишов, 2007)

В природных условиях глинистые иловые отложения проявляют темно-серые до чёрных оттенков, сопровождаясь выраженным ароматом сероводорода. Эти осадки, как правило, демонстрируют низкую степень сортировки, что указывает на их формирование в условиях относительно спокойной гидродинамики и притока обширного количества терригенных компонентов. Подводные банки, валы и аккумулятивные формы образованы биогенными

отложениями. В восточной части моря, где зафиксированы максимальные уровни биомассы и продуктивности биоценозов, наибольшее распространение имеют ракушечники и раковинные илы. В открытой части моря аккумулятивные структуры формируются преимущественно перемещенным вдоль дна ракушечным материалом. На косах северного побережья отмечается чёткий тренд возрастания биогенной составляющей в юго-западном направлении. Мелководность акватории в сочетании с высокой гидродинамической активностью, изменчивостью поступления терригенного материала и колебаниями продуктивности бентосных сообществ обуславливают значительную динамичность осадочных процессов. В результате наблюдаются как сезонные, так и ежегодные изменения в распределении основных литологических разновидностей донных осадков (Хрусталева, Ивлиева, 1999).

2.5. Динамика вод

Азовское море, отличающееся малой глубиной и ограниченным водообменом, обладает системой течений, формирующейся преимущественно под воздействием ветров. Воздушные потоки создают дрейфовые и компенсационные движения водных масс, играя ключевую роль в их циркуляции. Хотя речные воды Дона и Кубани, а также черноморские воды через Керченский пролив вносят свой вклад, их роль остаётся локальной. Ключевой особенностью гидродинамики Азовского моря служит исключительная вариабельность течений, чьи параметры (скорость и направление) находятся в прямой зависимости от ветрового режима над акваторией. В результате формируется двухкомпонентная система, включающая: основной поток, совпадающий с преобладающим ветром; компенсационное течение, движущееся в противоположном направлении (рис. 2.7). Ещё в 1932 году Н. М. Книпович в своих работах детально изучил циркуляцию водных масс в Азовском море. Согласно его исследованиям, опреснённые воды из Таганрогского залива сначала перемещаются на запад вдоль северного берега, затем поворачивают к югу, огибая восточное побережье, и в завершение цикла возвращаются в северном направлении (Книпович, 1932).

Анализ гидродинамических условий Азовского моря свидетельствует о преобладании течений с различными диапазонами скоростей. Наиболее часто фиксируются потоки со скоростью 2–10 см/с, доля которых составляет около 60% всех наблюдений. Потоки со скоростью 10–20 см/с встречаются реже, с повторяемостью порядка 30%. Отдельно стоит отметить, что максимально зарегистрированная скорость течения в Азовском море достигает 65 см/с. С прекращением ветра, являющегося основным движущим фактором этих течений, скорость течений снижается в кратчайшие сроки, часто в пределах нескольких часов. Особое внимание заслуживают приустьевые зоны Азовского моря, где влияние стока крупных рек значительно влияет на гидродинамический режим. В этих районах зафиксированы скорости течений до 2 см/с (Гидрометеорологические условия..., 1986).

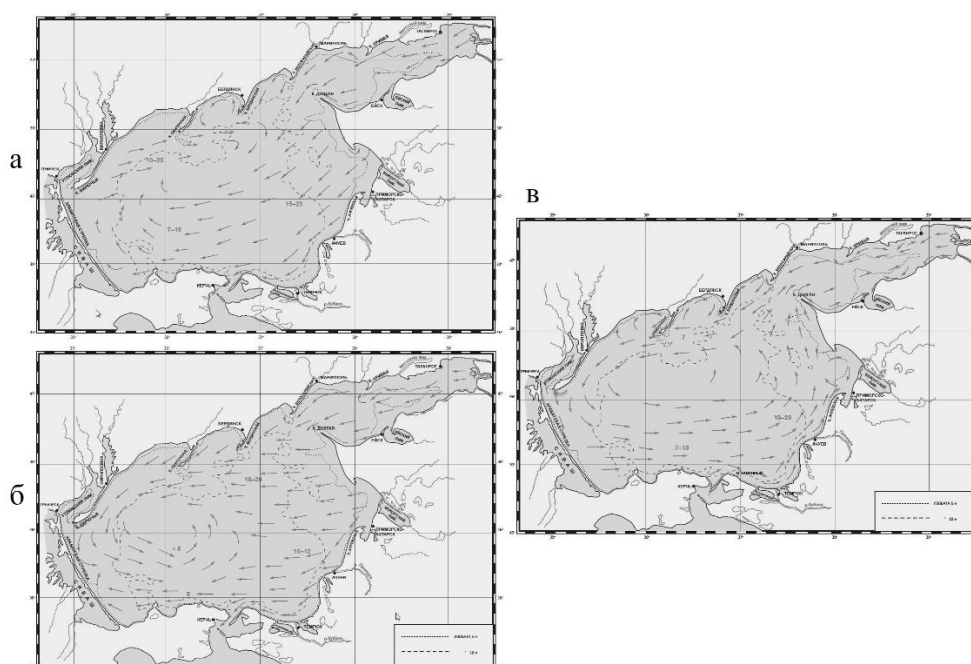


Рисунок 2.7 – Схема осредненной циркуляции вод поверхностного слоя Азовского моря при различных ветрах (Гидрометеорологические условия..., 1986): а) северо-восточном; б – восточном; в – западном

Ключевой характеристикой волнения в Азовском море является преимущественное формирование волн средней величины в условиях любой интенсивности ветрового воздействия. Это означает, что волновой режим быстро адаптируется к условиям текущего ветра, не завися от его продолжительности и

начальной энергии. Специфика волнения в этом море такова, что уже через два часа после установления ветра со скоростью 7 м/с оно устанавливается на всю акваторию моря. Особенно сильное волнение наблюдается в прибрежных районах, подверженных ветровому нагону, где высота волн может достигать наибольших значений (Гидрометсправочник..., 1962; Гидрологические условия..., 1986).

Мелководность Азовского моря обуславливает его уникальную особенность – даже при ветрах средней силы (от 7 м/с) здесь происходит активное перемешивание водных масс по всей толще с одновременным взмучиванием донных отложений песчано-илистого состава. Такие условия способствуют не только физическому взмучиванию осадков, но и к существенному уменьшению прозрачности воды из-за наличия в ней мелких взвешенных и коллоидных органических частиц. Ф.Д. Мордухай-Болтовской подчеркивал, что благодаря этим особенностям Азовское море отличается исключительно высокой степенью мутности, не обусловленной преимущественно либо планктоном, либо взмучиванием донных отложений.

Для Азовского моря характерна сезонная динамика штормовой активности: максимум приходится на зимние месяцы, минимум – на летний период, когда штормы кратковременны. В среднем за год акватория переживает 30–35 дней со штормовыми условиями, причем основная их доля регистрируется в холодное время года (Гидрометсправочник..., 1962).

2.6. Биота

Экосистема Азовского моря характеризуется наличием сложных биологических процессов, определяемых активностью таких биологических компонентов, как фито- и зоопланктон, а также фито- и зообентос. Биоразнообразие данной акватории представлено широким спектром видов, принадлежащих к разным биогеографическим группам, что свидетельствует о сложном происхождении флоры и фауны региона. Однако значительные изменения в условиях среды, такие как колебания температур и уровня солености, привели к сокращению видового разнообразия, при этом в этих условиях смогли

выжить и продолжить развитие преимущественно виды, способные адаптироваться к широким диапазонам температурных режимов и солености. (Воловик, 1985).

В Азовском море основную долю органического вещества составляет фитопланктон. Фитопланктонное сообщество представлено тремя комплексами (пресноводным, солоноватоводным и морским), включающими свыше 450 видов (Пицык, 1955; Мордухай-Болтовской, 1953; Александрова и др., 1998). Начиная с 30-х годов XX века, наблюдалось снижение биомассы фитопланктона с максимальными значениями в 13 г/м³ (Пицык, 1951).

Сезонная динамика развития фитопланктонной биомассы в Азовском море выражена довольно отчетливо, с максимальными показателями в марте-апреле, когда преобладают диатомовые водоросли. Второй, менее выраженный по объему пик фитопланктонной активности наблюдается в период с августа по октябрь и связан преимущественно с повышенной активностью *Peridinium*.

Процессы уменьшения солености Азовского моря, активизировавшиеся в 1990-х годах, создали благоприятные условия для восстановления пресноводных и солоноватоводных микроводорослевых сообществ (особенно в Таганрогском заливе). Характерной особенностью этого периода стали: эпизодические увеличения фитопланктонной биомассы; редкие случаи интенсивного "цветения" вод; стимулирование процессов образования первичного органического вещества вследствие интродукции гребневику. При этом общий уровень фитомассы остаётся низким (GEZAMP..., 1997).

Зоопланктон Азовского моря характеризуется значительным видовым богатством (98 видов), в основном представленный инфузорией, коловратками, веслоногими и ветвистоусыми раки. В экосистеме моря присутствуют как постоянно проживающие виды, так и временные, включая личинки бентосных организмов, таких как многощетинковые черви, моллюски и ракообразные. Особый интерес представляет ночное время, когда водная среда обогащается бентогипонейстоном, насчитывающим около 30 видов (Мирзоян и др, 2002). Сезонная динамика зоопланктона Азовского моря характеризуется выраженными изменениями. В зимний период: количественное обеднение сообщества;

доминирование солоноватоводных видов коловраток; наличие ограниченного числа эвригалинных веслоногих раков; в районах с пониженной солёностью преобладает солоноватоводная каланипеда (с минимальными значениями биомассы). В весенний период: сохранение основного зимнего видового состава; появление личиночных форм (ракообразных, моллюсков и полихет). В летний период (с конца июня): полное формирование зоопланктонного комплекса; интенсивное развитие веслоногих раков. В опреснённых участках фиксируется рост численности полифемид, коловраток и инфузорий, а временные формы зоопланктона становятся широко распространёнными по всей акватории. В июле и августе доминирование копепод усиливается, в то время как биомассы личинок моллюсков и полихет демонстрируют тенденцию к снижению (Мирзоян и др, 2002).

Зообентос Азовского моря представлен видами, относящимися к пресноводному, солоноватоводному, морскому и реликтовому экологическим комплексам. Согласно классификации В.П. Воробьева (1949), акватория моря подразделяется на несколько фаунистических областей: западная и восточная зоны Таганрогского залива, центральная часть моря, Утлюкский лиман и Сиваш. В своем исследовании Воробьев, отмечал, что приблизительно 90% донной поверхности этой зоны занято семью основными биоценозами. Эти биоценозы включают церастодермы (*Cerastoderma lamarkii*), абру (*Abra ovata*), балануса (*Balanus improvisus*), гидробии (*Hydrobia salinasii*), нептуса (*Nephtus homebergii*), лентидиума (*Lentidium*) и корбуломии (*Corbulomia*) (рис. 2.8).

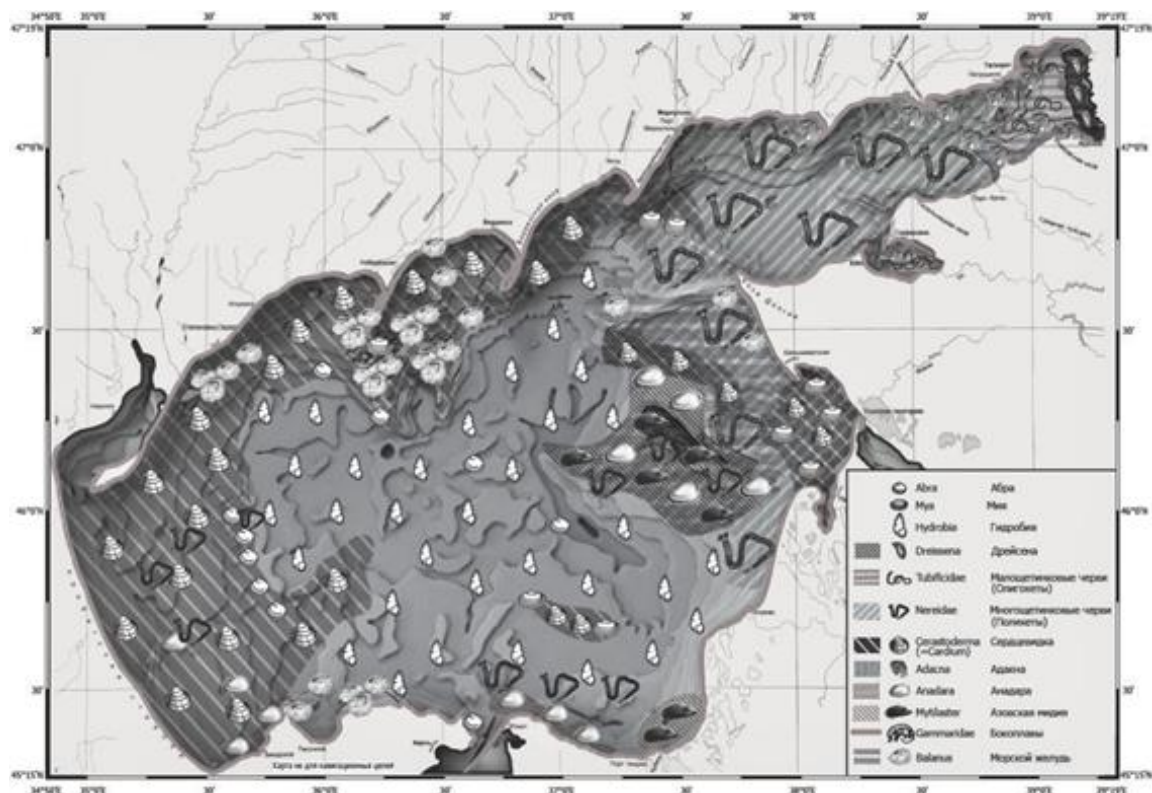


Рисунок 2.8 – Донные сообщества Азовского моря (Набоженко и др., 2010)

В текущих условиях распределение бентосных биоценозов в Азовском море тесно связано с характеристиками кислородного режима вблизи донных слоев. Исследования, проведенные в определенные годы (1995, 1997), показывают, что в периоды, когда гипоксические зоны занимают ограниченные участки в акватории моря, преобладающие биоценозы распространяются на 80% его площади, тогда как биоценоз церастодермы охватывает до 39% морского дна (Фроленко, 2000).

Современные изменения в структуре биоценозов донных сообществ свидетельствуют о значительном увеличении разнообразия биоценологических комплексов, что отражает расширение спектра условий обитания. В других участках морского дна развиваются биоценозы, в состав которых входят мидии, мии, кунearки и остракоды. Эти биоценозы отличаются как временной, так и пространственной изменчивостью и, чаще, не образуют крупных скоплений.

В бентосных сообществах Азовского моря большая часть полихет представлена видами, которые играют второстепенную или случайную роль. Исключение составляют нефтисы и нереисы, формирующие самостоятельные биоценозы, но в заморные годы их ареалы могут расширяться до 29% от общей

площади бентосных зон. Среди ракообразных преобладают сообщества остракод и баланусов (Фроленко, 2000).

В последние годы также отмечена высокая биомасса донных сообществ, включая биоценозы двустворчатых моллюсков-вселенцев, таких как мидии, мии и кунearки. Вселенцы в экосистеме Азовского моря играют амбивалентную роль, поскольку массовое расселение определенных видов, например *Mya arcuaria*, на песчано-илистых грунтах приводит к сокращению численности местных видов двустворчатых моллюсков, таких как *Lentidium mediterraneum* и *Cerastoderma lamarckii* (Фроленко, 2001).

Среди биотических факторов, оказывающих существенное влияние на экосистему Азовского моря в последние годы, выделяется пелагический инвазионный вид – гребневик *Mnemiopsis leidyi*. В районах его наибольшей концентрации фиксируется снижение оседания молоди моллюсков и ухудшение эффективности их воспроизводства (Фроленко, 2001).

В Азовском море основными типами донных отложений являются мягкие илистые, илисто-песчаные и песчаные грунты. Такие субстраты создают благоприятные условия для высших растений и харовых водорослей. В местах, где преобладают твердые грунты, более широко представлены различные группы водорослей: красные водоросли (Rhodophyta) – 41 вид, зеленые (Chlorophyta) – 18 видов, харовые (Charophyta) – 8 видов, бурые (Phaeophyta) – 5 видов, желто-зеленые (Xanthophyta) – 1 вид и сине-зеленые (Cyanophyta) – 24 вида (Громов, 2004).

3. ГЛАВА. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Микропластик представляет собой комплекс неоднородных частиц различных морфологических размеров, структурных форм, цвета, плотности, химического состава и ряда других свойств. Одна из главных проблем широкомасштабного пространственного и временного сравнения на сегодняшний день – применение разнообразных подходов как для отбора проб МП, так и их анализа.

В основе исследования, представленного в этом научном труде, лежат экспедиционные работы, проведённые с 2019 по 2023 год и лабораторный анализ, заключающийся в обработке полученных проб модифицированным методом NOAA (Национального управления океанических и атмосферных исследований, США). Для исследований использовались пробы различных сред: пляжевые отложения, донные отложения, вода и аэрозоли, вода из устьевых областей рек, почвы прибрежной зоны, моллюски – для каждой из них существует свой отдельный способ анализа. Тем не менее, базовая методология всех исследований предусматривает следующие этапы: просеивание или фильтрация образца с целью выделения частиц микропластика от основного материала пробы, отделение от органического материала и визуальный анализ с помощью микроскопа Микромед МС-1 вар.2С Digital. Дальнейший этап исследования включает в себя оценку уровня деградации фрагментов МП при помощи растрового электронного микроскопа VEGA II LMU фирмы Tescan, а также анализ химического состава частиц с применением инфракрасного Фурье спектрометра JASCO FT/IR-6800 и ИК- Фурье спектрометра ФСМ 2202.

Всего во время проведения данного научного исследования было отобрано и обработано 255 проб воды, донных и пляжевых отложений, моллюсков Азовского моря, аэрозолей, воды из устьевых областей рек, почв прибрежной зоны (табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Общее количество отобранных и проаннотированных проб

№	Виды работ	Количество
1	Отбор проб воды	51 шт.
2	Отбор проб донных отложений	27 шт.
3	Отбор проб пляжевых отложений	72 шт.
4	Отбор проб биоты (<i>Mytilaster lineatus</i> , <i>Anadara inaequalis</i>)	44 шт.
5	Отбор проб аэрозолей	11 шт.
6	Отбор проб воды устьевых областей рек	13 шт.
7	Отбор проб почв абразионных берегов	8 шт.
8	Обработка проб модифицированным методом NOAA	226 единиц проб

9	Определение морфологических и морфометрических особенностей МП оптической микроскопией	226 единиц проб
10	Растровая электронная микроскопия	59 частиц МП
11	Инфракрасная спектроскопия с Фурье-преобразованием	80 частиц МП

3.1. Методы отбора проб

Отбор проб микропластика в морской среде включает в себя различные стратегии сбора из поверхностного слоя (Pervez et al., 2021; Tamminga et al., 2019; Eriksen et al., 2014; Lusher et al., 2015); водной толщи (Desforges et al., 2014; Zobkov et al., 2019; Reisser et al., 2015; Bagaev et al., 2017; Bagaev et al., 2018); донных осадков (Claessens et al., 2011; Zobkov, Esiukova, 2017a,b) и береговых наносов (Esiukova, 2017; Chubarenko et al., 2018; Li et al., 2019; Doyen et al., 2019; Pervez et al., 2021, Zhou et al., 2018; Yona et al., 2023). Методы разнообразны: от выборочного отбора проб и отбора проб с уменьшенным объемом до полнообъемного отбора проб, при этом пробы песка обычно, но не всегда, отбираются на песчаных пляжах у линии прилива, а пробы морской воды - на поверхности моря с помощью нейстонных сетей (Hidalgo-Ruz et al., 2012).

Сравнительные исследования различных методов отбора МП выявили существенные различия в оценках количества микропластика, что подчеркивает важность соблюдения методологии. Например, прямая фильтрация воды с использованием сети с размером ячеек 0,45 мкм значительно отличается по количеству обнаруженного МП от фильтрации через сито 20 мкм с последующей фильтрацией или траления манта сетью с размером ячеек 150 мкм (Zheng, Y., et al., 2021). Так, отсутствие стандартизированных методов в разных исследованиях представляет собой серьезную проблему и подчеркивает необходимость в надежных методологиях, способных отразить неоднородность загрязнения микропластиком (Nakajima & Yamashita, 2020).

В рамках данной научной работы применяется методика отбора проб в их полном объеме, поскольку такой способ позволяет получить наиболее точные результаты загрязнения МП, и по сравнению с другими методами отбора, лучше

подходит для понимания точного количества МП в определенном объеме и его географического распределения в морской среде. Данный метод отбора подходит для небольших водных объектов с высокой концентрацией частиц.

Для данной исследовательской работы проводился отбор проб: пляжевых отложений, донных осадков, поверхностных вод моря, моллюсков, атмосферных осадков (аэрозолей), воды из устьевых областей рек, почв прибрежной зоны. Именно в таком порядке они рассмотрены далее.

В основу данной работы положены оригинальные натурные данные, которые были получены в результате проведения экспедиционных исследований. Исследования осуществлялись в период с 2019 год по 2023 год. Всего собрано и обработано 51 проба воды, 27 проб донных осадков, более 72 пробы пляжевых отложений, 44 пробы моллюсков, 11 проб атмосферных выпадений, 13 проб воды в устьевых областях рек, 8 проб почв прибрежной зоны.

3.1.1. Отбор проб пляжевых отложений

Отбор проб пляжевых отложений на содержание микропластика включает в себя различные методики, каждая из которых имеет свои преимущества и ограничения. Выбор метода часто зависит от целей исследования, типа микропластика и характеристик пляжных отложений. В связи с чем стандартизация методик отбора проб и анализа МП в пляжевых отложениях имеет ключевое значение для получения сопоставимых данных.

Большинство исследователей предпочитают отбирать пробы на линии прилива, где обычно откладывается морской мусор (Hidalgo-Ruz et al., 2012). Глубина отбора проб может варьироваться от поверхности до 10 см ниже поверхности, поскольку микропластик преимущественно находится в верхних слоях осадка (Besley et al., 2016).

Оборудование, используемое для отбора проб, включает совки из нержавеющей стали, лопаты для более глубоких проб и керны для получения вертикального профиля слоев осадка (Vermeiren et al., 2021). Выбор инструмента часто зависит от требуемой глубины и точности пробы.

Стандартная практика предполагает сбор проб из заранее определенных квадратов, обычно площадью от 0,25 до 1 м², чтобы обеспечить последовательность отбора проб в различных исследованиях (Lots et al., 2017). Объем собранного осадка варьируется, при этом в некоторых исследованиях для облегчения сравнения используется стандартный объем в 1 кг осадка (Fisner et al., 2017).

В процессе проведения научных исследований методика отбора образцов может производиться посредством продвижения параллельно береговой линии, где сбор материалов происходит с использованием различных инструментов, таких как ложки, совки или непосредственно руками. Количественные показатели, применяемые для оценки объема собранных проб, находятся в прямой зависимости от характеристик и типов использованных для их отбора инструментов. В случаях, когда для сбора данных применяются специализированные рамки, концентрация измеряемых веществ рассчитывается относительно занимаемой этими рамками площади, что позволяет достигнуть высокой точности и объективности получаемых результатов.

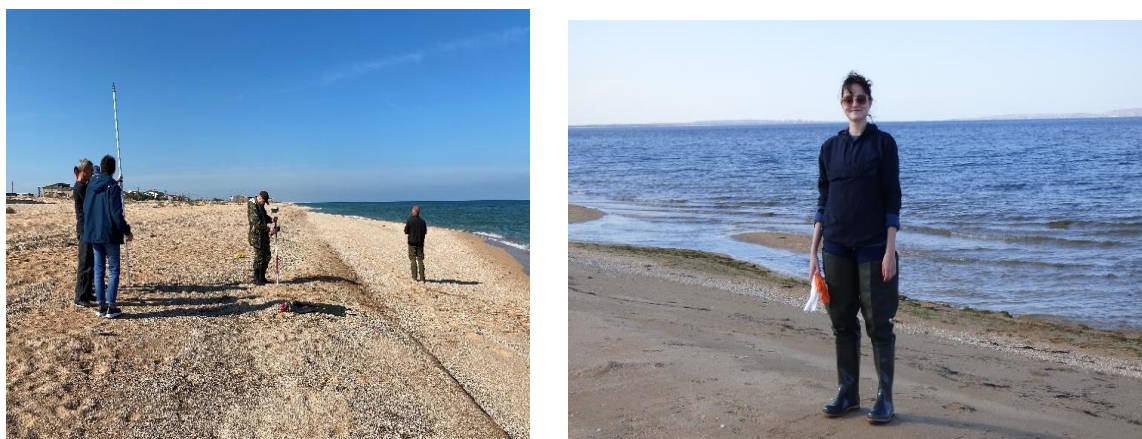


Рисунок 3.1 – Отбор проб в береговой зоне Азовского моря.

В проведенном исследовании, для сбора образцов пляжевых отложений был применен метод использования рамок (рис. 3.2), основывающийся на процедуре определения ширины анализируемого сегмента пляжа и его последующего деления на три идентичные секции, включающие в себя тыльную сторону пляжа, линию максимального штормового заплеска и урез. Этот подход позволил систематизировать процесс отбора проб и обеспечил унифицированную методику

для изучения различных участков пляжа, способствуя повышению точности и сопоставимости получаемых данных. В каждой из этих частей проводился отбор пробы с поверхности пляжа (с квадрата площадью 50 x 50 см).

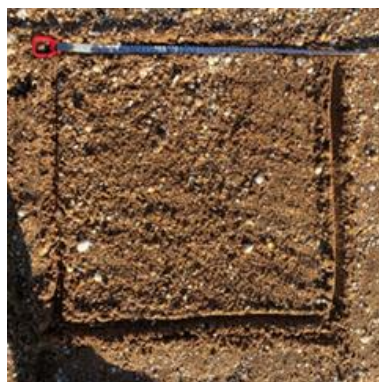


Рисунок 3.2 – Применение рамочного метода отбора проб на пляжах Азовского моря

В процессе отбора образцов применялся металлический совок, с отметкой 1 см, что обеспечивало высокую степень точности при отборе верхнего слоя. Для надлежащего хранения и транспортировки собранных материалов использовались новые, специально предназначенные для этой цели, мешки с соответствующей маркировкой. В общей сложности, было собрано более 72 образцов, представляющих 24 различных пляжных зоны побережья Азовского моря.

3.1.2. Отбор проб донных осадков

Донные отложения выступают в качестве основного накопителя микропластика, что обуславливает необходимость применения эффективных и точных методик отбора проб для его анализа. Различные методы такого отбора, направлены на выявление пространственного и вертикального распределения микропластика в слоях осадка.

Методики, применяемые для экстракции образцов донных отложений с целью исследования наличия в них микропластиковых частиц (Lorenz et al., 2019; Wu et al., 2019; Li et al., 2020; Peng et al., 2017; Bergmann et al., 2017), совпадают с методами, используемыми для сбора донных осадков в целях анализа их химического состава и содержания биологических элементов (рис.3.3).

Глубина отбора проб микропластика в донных отложениях обычно варьируется в зависимости от целей исследования и предполагаемого

распределения микропластика. Большинство исследований сосредоточено на самых верхних слоях осадка, где, как считается, микропластик накапливается из-за своей низкой плотности. Зобков и Есюкова (2017) представили данные о распределении микропластика в донных отложениях Балтийского моря, подчеркнув важность отбора проб на разных глубинах для понимания вертикального распределения микропластика (Zobkov & Esiukova, 2017).

Приборы, используемые для отбора проб донных отложений, включают дночерпатели (Экмана-Берджа, Ван Вина, Петерсона, Смита-Макинтайра) (Глушко и др., 2021; Browne et al., 2011; Claessens et al., 2011; Thompson et al., 2004; Zobkov, Esiukova, 2017b; Sagawa et al., 2018), бокс-кореры (Zhang et al., 2019), донный трал (Van Cauwenberghe et al., 2013; Zobkov, Esiukova, 2017a,b), многоконтейнерные пробоотборники (Bergmann et al., 2017), и т.д., каждый из которых подходит для различных типов отложений и требований исследования. Например, грейфер Ван Вина обычно используется для отбора проб на мелководье, в то время как коробчатые керны предпочтительнее для более глубоких и нетронутых проб. Метод отбора проб играет решающую роль в точности количественного определения микропластика, при этом каждый прибор обладает определенными преимуществами с точки зрения репрезентативности проб и простоты использования.

Объем и площадь отобранной пробы осадка могут существенно повлиять на обнаружение и количественное определение микропластика. Стандартная практика предполагает сбор заранее определенного объема осадка, обычно от 500 мл до 1 л, для обеспечения единообразия проб. Хэнви и др. (2017) подчеркивают необходимость согласования подходов к отбору проб и единиц измерения численности пластика для облегчения сравнения результатов исследований (Hanvey et al., 2017).

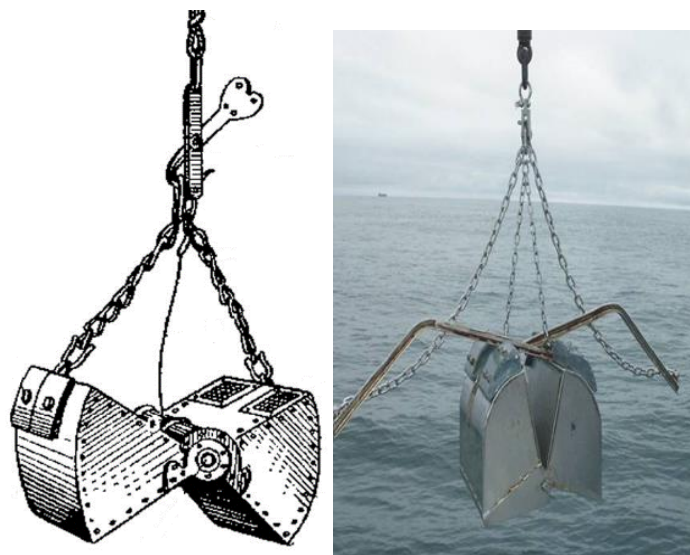


Рисунок 3.3 – Отбор проб донных отложений с помощью дночерпателя Петерсена

Правильное хранение образцов донных отложений после их сбора имеет первостепенное значение для предотвращения загрязнения или потери микропластика. Образцы хранятся в чистых, герметичных контейнерах из стекла, алюминия, ткани, чтобы избежать возможного загрязнения от материалов самих контейнеров. Использование пластиковых контейнеров избегается, так как из них могут поступать частицы микропластика. Каждый контейнер четко маркируется с указанием места взятия пробы, глубины, даты взятия и любых других важных данных. Если пробы не могут быть обработаны немедленно они хранятся при низкой температуре, например, 4°C в темноте (Desforges et al., 2014; Rocha-Santos, Duarte, 2017), замораживаются при температуре -20°C в морозильной камере для более длительного хранения (Mu et al., 2019; Lusher et al., 2015), чтобы минимизировать разложение органических веществ и потенциальные химические изменения в осадке, которые могут повлиять на целостность микропластика (Crawford & Quinn, 2017).

В контексте проведенного научного исследования осуществлялась процедура отбора образцов донных осадков (июль 2020 г.) объемом 3 литра каждый, посредством дночерпателя Петерсена. Отбор проводился с различных глубин, варьирующихся от 3,4 метра до 12,3 метров. В итоге было получено и обработано 27 проб донных отложений. Для минимизации риска изменения характеристик проб в процессе их транспортировки они хранились в условиях

пониженной температуры и отсутствия света. Важным аспектом во время транспортировки было предотвращение вероятного попадания искусственных загрязнителей. В качестве предупредительной меры было решено исключить использование любых пластиковых элементов, таких как лабораторная посуда, сита, заменив их на альтернативные материалы. Транспортировка образцов осуществлялась в металлических ведрах и мешках из натурального текстиля, после чего они перемещались в стеклянную или фарфоровую лабораторную посуду. Для обеспечения однородности образцов и точности дальнейшего анализа проводилась их гомогенизация путем тщательного перемешивания с использованием фарфоровой ложки. Разделение полученного материала позволяло проводить как качественный и количественный анализ содержимого на МП, так и определение гранулометрического состава проб. Контроль за чистотой процесса осуществлялся через внедрение эталонных проб без реального образца (контрольные пробы), что позволяло исключить влияние факторов внешнего загрязнения, как это было отмечено в работах Норена (Noren, 2007).

3.1.3. Отбор проб с поверхности воды

Отбор проб МП с поверхности воды в морской среде может осуществляться различными методами, каждый из которых соответствует конкретным целям исследования.

В контексте морских исследований практика сбора проб поверхностных вод обычно сосредоточена на верхнем слое водной толщи. Эта зона представляет особый интерес из-за повышенного уровня биологической активности и склонности к накоплению загрязняющих веществ. В своем исследовании 2012 года Идальго-Руз и его коллеги выделяют три основные методологии сбора проб: выборочный отбор проб, который предполагает выбор конкретных типов проб на основе заранее установленных критериев; отбор проб с уменьшением объема, направленный на минимизацию количества собираемой воды при максимальном сохранении значимости пробы; и массовый отбор проб, предполагающий сбор больших объемов воды. Большинство проб воды с поверхности моря отбирается с помощью нейстонных сетей (Hidalgo-Ruz et al., 2012).

Для отбора проб поверхностных вод морской среды используется множество методик и устройств, начиная от простых ручных методов и заканчивая сложными автоматизированными механизмами. Традиционные методики включают использование ведер или специализированных контейнеров для непосредственного забора воды с поверхности. Сети Нейстона особенно распространены при исследовании микропластика, поскольку они специально разработаны для извлечения проб с самой поверхности. Тем не менее, эффективность нейстоновых сетей снижается в регионах, изобилующих мусором, что приводит к образованию препятствий и потенциальному нарушению целостности образцов из-за загрязнения. Кроме того, использование такого метода отбора, не дает четкого понимания географической привязки отбора пробы, и имеет большую вероятность загрязнения пробы. Также в исследованиях поверхностных вод, используется метод, манта-трала, который проходит по поверхности воды, захватывая частицы на сетчатый фильтр.

В данном исследовании отбор воды осуществлялся металлическим батометром Руттнера в виде полнообъемных проб. Для фильтрации на месте отбора частицы МП не могли быть визуально определены ввиду его небольшого размера. Все пробы были отобраны в объеме 1 л. С целью минимизации риска возможного загрязнения пробы отбирались в исключительно стеклянные емкости (рис.3.4). Всего было отобрано 51 проба воды: 27 проб в открытом море и 24 пробы в береговой зоне на урезе. А также были отобраны 10 проб поверхностных вод в устьевых областях рек: Дон (4 пробы), Кубань, Протока, Бейсуг, Челбас, Ея, Мокрая Чумбурка, Миус, Мелек-Чесме, Мокрый Еланчик.

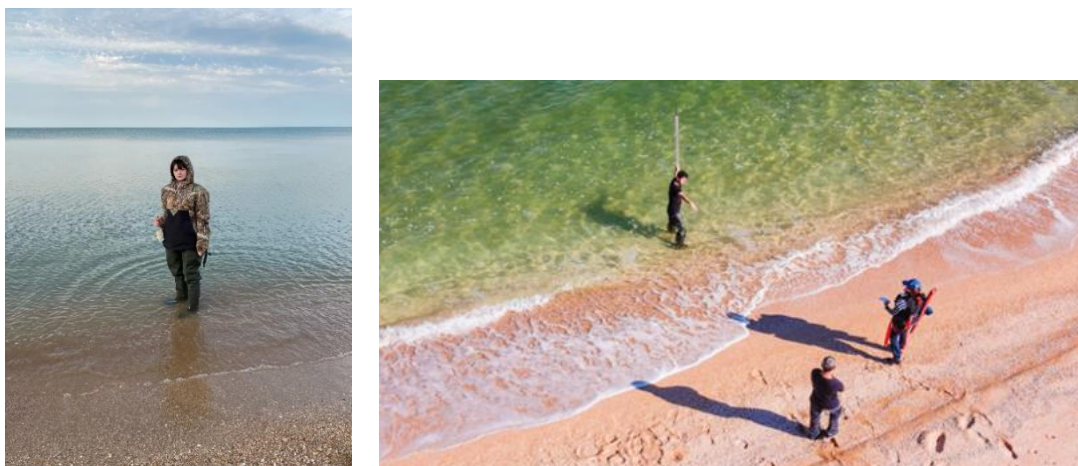


Рисунок 3.4 – Отбор проб воды в Азовском море во время береговой экспедиции 2020 г.

3.1.4. Отбор проб моллюсков

Увеличение количества микропластика в морской среде представляет значительную опасность для морских обитателей, в том числе моллюсков. Являясь фильтраторами, моллюски особенно восприимчивы к поглощению микропластика. Инструменты и методологии отбора проб моллюсков в разных исследованиях существенно различаются, часто с учетом конкретных условий окружающей среды и исследуемых видов. Традиционные методы включают ручной сбор, дночерпание и траление. Например, при изучении зеленых мидий (*Perna viridis*) на Южном Сулавеси (Индонезия) использовался метод выборочного случайного отбора. Метод заключается в том, что зеленые мидии на веревке для выращивания морских водорослей вытягиваются вручную (R. Ramli et al., 2021).

В контексте проведенного научного исследования осуществлялась процедура отбора моллюсков, с помощью дночерпателя Петерсена, на различных глубинах, во время отбора донных осадков, и ручным сбором. Всего было отобрано 36 образцов *Mytilaster lineatus* и 8 образцов *Anadara inaequalis*.

В процессе транспортировки образцы находились при отрицательных температурах, поддерживаемых в холодильниках, гарантируя их сохранность. После доставки в лабораторию, пробы моллюсков, хранились при температуре -10 °С, до начала проведения аналитических процедур. Этот подход к хранению образцов способствует сохранению их первоначального качества и состояния, что

является критически важным для обеспечения надежности и точности научного анализа.

3.1.5. Отбор проб атмосферных выпадений

Процесс отбора проб аэрозолей для обнаружения микропластика предполагает сбор твердых частиц, находящихся в воздухе. Методы, часто используемые для оценки микропластика в атмосфере, включают в себя использование высокообъемных пробоотборников воздуха, которые улавливают твердые частицы на фильтрующие подложки для последующего изучения (Guanglong Chen et al., 2020). Альтернативная стратегия включает анализ микрофизических свойств аэрозолей, используя как данные AERONET (Aerosol Robotic Network), так и наземных наблюдений. Этот метод подчеркивает сложный характер анализа микропластика в атмосфере (Ü. Kikas et al., 2004). Высота, на которой производится отбор проб, также может варьироваться - от уровня земли до нескольких метров над уровнем моря, чтобы захватить различные слои атмосферы.

В рамках данного научного исследования процедура отбора атмосферных выпадений (аэрозолей) происходила путем их улавливания в экспонированных стеклянных кюветах с дистиллированной водой площадью 196 см² в течение 24 часов на 11 различных станциях: расположенных по периметру Азовского моря (г. Ростов-на-Дону, г. Таганрог, г. Приморско-Ахтарск, г. Керчь, г. Ейск, ст. Тамань, коса Сазальникская).

3.1.6. Отбор проб почв прибрежной зоны

Методики, используемые для отбора микропластика в прибрежных почвах, разнообразны: от отбора керна до поверхностного соскабливания, в зависимости от целей исследования и уникальных характеристик почвы (Chia et al., 2023). Томас и соавторы (2020) отметили сложность почвы как материала для анализа микропластика, подчеркнув необходимость тщательного отбора проб, гомогенизации и рассеивания скоплений для обеспечения репрезентативности образцов (Thomas et al., 2020). Как правило, пробы почвы берутся из самого верхнего слоя 0–10 см (иногда 30 см) – зоны, в которой происходит значительное

накопление микропластика, что в значительной степени объясняется механизмами поверхностного стока и атмосферного осаждения (Gui et al., 2021).

Для данного исследования пробы почв были отобраны у края обрыва в прибрежной зоне Азовского моря на участках активной абразии, в объеме 1 кг каждая, глубиной 0–20 см. В процессе отбора образцов применялись металлическая лопатка и совок. Пробы были отобраны в районе кос Беглицкая и Сазальникская, г. Таганрог, дельта Дона, коса Павло-Очаковская, г. Ейск, г. Приморско-Ахтарск, г. Керчь.

3.2. Лабораторные методы анализа микропластика

В процессе проведения лабораторных анализов на определение содержания частиц МП использовались методологии, разработанные Национальным управлением океанических и атмосферных исследований (NOAA). Эти методики, описанные в исследованиях Masura et al. (2015), служат руководством для исследователей и ученых по стандартизации методов, используемых при анализе микропластика, обеспечивая сопоставимость и надежность данных в разных исследованиях (Masura et al., 2015). Одной из ключевых особенностей применяемой методологии является её универсальность, позволяющая анализировать пробы различного происхождения – от водных до донных и пляжевых отложений – что обеспечивает возможность получения взаимосвязанных данных и анализа перемещения микропластика между разными зонами морской среды.

До проведения лабораторных исследований критически важным является процесс подготовки проб. Согласно методике NOAA, данный этап включает в себя несколько ключевых операций: просеивание, плотностное разделение, фильтрацию и жидкое окисление (рис. 3.5). Каждый из этих этапов ориентирован на отделение частиц микропластика от основной массы пробы и устранение внешних загрязнений, преимущественно органической природы (Masura et al., 2015; Зобков, Есюкова, 2018). Такая тщательная подготовка проб является фундаментальной для обеспечения достоверности последующего количественного и качественного анализа.

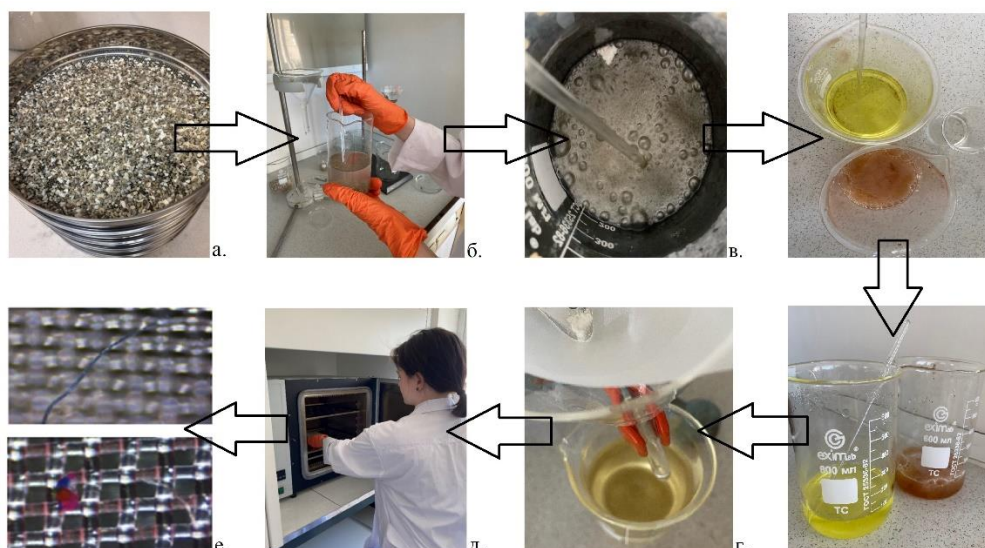


Рисунок 3.5 – Лабораторный метод анализа микропластика в морской среде (программа исследования морского мусора NOAA): а – просеивание, б – плотностное разделение, в – жидкое окисление в перекиси водорода, г – фильтрование, д – сушка, е – анализ микропластика с помощью микроскопа

Просеивание. Метод NOAA рекомендует просеивать отобранные образцы, чтобы отделить микропластик от более крупного мусора. Извлечение частиц МП из анализируемых проб осуществляется методом фракционированного просеивания, при котором материал пропускается через сита с ячейками различного диаметра. Фракции, задерживаемые на поверхности сит, подвергаются последующей детальной сортировке, в то время как материалы, проходящие сквозь минимальные ячейки, удаляются из дальнейшего анализа. Данная процедура позволяет эффективно классифицировать частицы МП по размерным категориям. В процессе просеивания применяется система сит, собранная в каскад, количество которых может варьироваться от одного до шести. Сита производятся из устойчивых к коррозии материалов – например, нержавеющей стали или меди, благодаря чему они обладают повышенной износостойкостью и не подвержены разрушению в морской воде. Просеянные материалы, как и сами сита, сушат при комнатной температуре (Norén, 2007), что позволяет сохранить первоначальные физико-химические характеристики микропластика. В некоторых случаях для ускорения процесса сушки используются сушильные шкафы (Doyle et al., 2011; Collignon et al., 2012), температура в которых не должна превышать 80°C. Это

требование обусловлено необходимостью предотвратить термические изменения в структуре и свойствах МП.

Разделение по плотности. После просеивания применяется плотностное разделение для выделения микропластика из природных материалов на основе разницы в плотности. Плотность пластиков может колебаться в широких пределах – от 0,8 до 1,70 г/см³, но встречаются и макс. значения: менее 0,05 г/см³ у пенополистирола и до 2,1–2,3 г/см³ у политетрафторэтилена (Chubarenko et al., 2016). Для сравнения, плотность песка и других донных осадков составляет примерно 2,65 г/см³. Такая разница в плотностях создаёт естественные условия для эффективного разделения лёгких пластиковых частиц и более тяжёлых минеральных фракций. Процесс разделения осуществляется путем погружения пробы в насыщенный солевой раствор и её интенсивного перемешивания в течение определенного времени. Для обеспечения однородного перемешивания раствора используются разнообразные инструменты, включая мешалки (Hanvey et al., 2017), сепараторы (Zobkov, Esiukova, 2019), а также стеклянные палочки (Zhang et al., 2019). Продолжительность процесса перемешивания может значительно варьироваться, в зависимости от объема и состава пробы от десятков секунд (Thompson et al., 2004) до нескольких часов (Reddy et al., 2006). В данном исследовании проба подвергалась многократному перемешиванию стеклянной палочкой в течение 20 минут перед помещением в сепаратор. После активного взбалтывания тяжёлые фракции (песок и донные осадки) быстро осаждаются, тогда как лёгкие пластиковые фрагменты либо удерживаются во взвеси, либо всплывают на поверхность жидкости. Данные частицы затем осторожно собираются для последующего изучения. В качестве флотационных растворов могут быть использованы пресная или водопроводная вода, морская вода, а также насыщенные растворы NaCl с плотностью 1,15 г/см³, а также ZnCl₂ (плотность 1,6 г/см³), NaI (1,6–1,8 г/см³) и т.д. (Чубаренко и др., 2021). Дополнительно, проводится повторная экстракция из осадка, что существенно увеличивало эффективность выделения МП из исследуемой пробы, обеспечивая более высокую достоверность получаемых результатов.

Фильтрация. Отделенный в ходе процесса плотностного разделения микропластик отфильтровывается из раствора. Фильтрация включает в себя использование фильтров с соответствующим размером ячеек для собирания микропластика и пропускания через них раствора. Для максимизации эффективности и уменьшения времени обработки иногда применяется вакуумная фильтрация (Thompson et al., 2004). В качестве фильтрующего материала выбираются фильтры различного типа, включая стекловолоконные, как указывается в исследовании (Lusher et al., 2015), мембранные поликарбонатные (Von Friesen et al., 2020), а также фильтры из целлюлозы (Kanhai et al., 2019), нитроцеллюлозы (Song et al., 2014), и нейлона (Ryan et al., 2020). Диапазон размеров ячеек фильтров охватывает значения от менее 1 мм до 0,1 мм, что позволяет отделять МП различных размеров (Zhang et al., 2019). Этот этап обеспечивает извлечение микропластика для дальнейшего анализа.

Жидкое окисление. К последним этапам подготовки проб для исследования МП относится удаление органических материалов, присутствующих в значительных количествах. Эти органические компоненты включают водоросли, зоопланктон, фитопланктон, остатки экзоскелетов и оболочек морских организмов и т.д. (Зобков, Есюкова, 2018). Важно учитывать, что поверхность микропластиковых частиц часто колонизируется различными микроорганизмами, включая водоросли и бактериальные биопленки, что в свою очередь приводит к существенному искажению измерения ряда физических характеристик, таких как удельная плотность (Andrady, 2011). Для минимизации или полного исключения влияния органических компонентов на аналитические результаты применяются методы разложения данных веществ. Среди наиболее распространенных подходов выделяют использование щелочей и кислот (Desforges et al., 2014), а также окислителей или ферментов (Cole et al., 2014). Эти подходы позволяют достичь высокой степени очистки проб от биологического материала.

3.2.1. Метод анализа микропластика в пробах пляжевых отложений

В проведенном исследовании для анализа микропластика в пляжевых отложениях, был применен описанный ранее модифицированный метод NOAA.

Спектр анализируемых форм пластика по данному методу охватывает твердые и мягкие пластики, пленочные материалы, леску, волокна и листовые пластики. Важной частью методики является процесс просеивания образцов через сито с размером ячеек 5 мм, что позволяет исключить из анализа крупный мусор (рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Просеивание образцов пляжевых отложений Азовского моря

Для эффективного отделения микропластика от органического материала в образцах использовался процесс окисления с применением 30 % раствора перекиси водорода (H_2O_2) при температуре $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ и введением катализатора (раствор $Fe(II)$). Эта стадия обработки позволяла добиться полного растворения органических компонентов, в то время как фрагменты пластика оставались без изменений (рис.3.7).



Рисунок 3.7 – Очистка проб от органического материала путем жидкого окисления в растворе перекиси водорода и катализатора

Для квалификации частиц как микропластик по данной методике они должны соответствовать определенным критериям: размер частиц должен находиться в диапазоне от 5 до 0,1 мм; частицы не должны подвергаться разложению в среде перекиси водорода; обязаны успешно проходить флотацию в растворе $ZnCl_2$ (плотность 1,6 г/см³) (рис. 3.9) и подлежать идентификации при визуальном микроскопическом анализе.

3.2.2. Метод анализа микропластика в донных отложениях и почвах.

Данная методика была применена для изучения загрязнения МП донных осадков, собранных с дна Азовского моря, и почв прибрежной зоны. Процесс анализа начинался с предварительного этапа сушки. Следующий шаг предполагал взвешивание донных осадков (рис.3.8) и их последующее просеивание или промывание через сита с ячейками размером 5 мм и 0,1 мм, расположенные последовательно одно над другим.



Рисунок 3.8 – Взвешивание высушенной пробы донных осадков

Дальнейший анализ производился над осадком, задерживаемом на ситах 0,1мм. Он подвергался флотации в нескольких растворах $ZnCl_2$ (удельная плотность 1,6 г/см³) (рис.3.9), затем на фильтровальной воронке производилась фильтрация раствора (размер ячеек фильтра 0,1 мм). Прошедшая фильтрацию взвесь

подвергалась процессу жидкого окисления раствором перекиси водорода с использованием катализатора на основе Fe (II) при температуре 75° C, что способствовало растворению лабильных органических веществ, при этом микропластик остался неизменным (рис. 3.7). Далее после удаления ракушечного материала путем добавления раствора HCl, этот раствор с МП снова фильтровался и подлежал процедуре плотностного разделения в делителе в растворе ZnCl₂ (плотность 1,6 г/см³), что позволило осуществить более эффективное отделение пластиковых частиц методом флотации.

Частицы микропластика, всплывшие на поверхность в процессе плотностного разделения, отделились от тяжелых минеральных компонентов, оставшихся в осадке. Для сбора МП из плотностного делителя использовались фильтры с ячейками 0,1 мм. После сбора частицы высушивались и подготавливались к детальному количественному и качественному анализу.

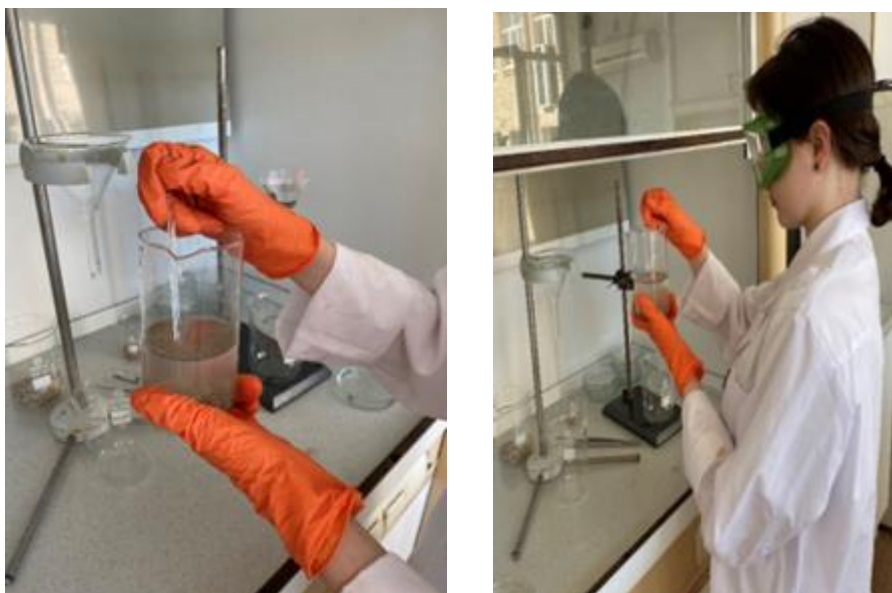


Рисунок 3.9 – Плотностное разделение отобранных проб Азовского моря

Указанный подход применим к идентификации широкого спектра пластиков, включая полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид и полистирол, с учетом их удельной плотности (0,91–0,97 г/см³; 0,94 г/см³ и 1,05 г/см³ соответственно). Критерии отнесения частиц к категории микропластика те же, что и описанные ранее для методов анализа в других средах.

3.2.3. Метод анализа микропластика в пробах воды.

Описанный в данном разделе метод был использован для оценки МП, находящегося во взвешенном состоянии в пробах воды Азовского моря и рек, впадающих в него. Данный этап методики предусматривал фильтрацию воды через фильтр с размером пор до 0,1 мм, что позволило выделить частицы, соответствующие целевой размерной категории (рис.3.10). Твердые фрагменты, задержанные на таком фильтре, подвергались процессу жидкого окисления и плотностного разделения, описанного ранее. После процедуры сепарации частицы МП собирались на фильтр с размером пор 0,1 мм, сушились, после чего их идентификация и детальное описание осуществлялось с использованием микроскопии.



Рисунок 3.10 – Фильтрация проб воды Азовского моря и рек, впадающих в него

3.2.4. Метод анализа микропластика в пробах моллюсков

Обычно начальный этап анализа микропластика в моллюсках включает окисление органических веществ для выделения микропластика из биологических тканей. Например, Йона и соавторы (2023) осуществляли окисление органики путем добавления в стакан с тканями мидий 30 % H_2O_2 и 0,05 М раствора $Fe(II)$ и оставляли на ночь для последующей вакуумной фильтрацией и микроскопического анализа (Yona et al., 2023).

В данном научном исследовании для экстракции частиц МП из тела моллюсков Азовского моря, так же был применен описанный в предыдущих разделах метод NOAA. Первым этапом было разделение образцов по видам. Для

исследования были использованы только образцы моллюсков с закрытыми створками. После извлечения тела моллюсков оно перемещалось в лабораторный стакан, к которому добавляли 30% перекись водорода (H_2O_2) с катализатором раствора Fe (II) (0,05 М молярный). Стакан накрывали чашкой Петри и оставляли на несколько часов. Затем лабораторный стакан нагревался при температуре до 75 °С для удаления оставшегося органического материала. После полного остывания раствора он профильтровывался согласно методическим указаниям, описанным ранее, высушивался, и подвергался дальнейшему визуальному анализу.

3.2.5. Метод анализа микропластика в пробах атмосферных выпадений

Во время проведения анализа, образцы, собранные из дистиллята, были подвергнуты процедуре фильтрации через фильтр с порами размером 0,1 мм. Дальнейший этап обработки проб соответствует ранее описанным методам (Masura et al., 2015; Zobkov, Esiukova, 2017a). Процесс сушки осуществлялся под защитным мелкоячеистым фильтром с ячейками 0,1 мм для предотвращения загрязнения образцов (рис. 3.11). Дальнейший анализ полученного МП анализировался посредством микроскопа с возможностью увеличения до 40х, что позволяло провести количественное и качественное описание обнаруженного МП, включая оценку его количества, размеров, цвета и морфологических характеристик.



Рисунок 3.11 – Сушка отобранных проб в лабораторном сушильном шкафу при температуре 80°C

Стандартное оборудование из стекла, фарфора и металла применялось на всех этапах отбора и обработки проб из всех сред. Перед применением всё оборудование промывалось дистиллированной водой и проверялось под микроскопом (Courtene-Jones et al., 2017). При работе с образцами применялась одежда из хлопка, а все инструменты промывались дистиллированной водой и высушивались перед экспериментами. При каждой обработке экспонировались чаши Петри с фильтровальной бумагой для осуществления проверки на фоновое загрязнение (воздух, одежда, инструменты для отбора проб, сосуды и т. д.), и исследовались холостые пробы с дистиллированной водой, проходящие все этапы анализа.

3.3. Идентификация микропластика

В исследовании разнообразных групп пластика, классифицированного по размеру, необходимо применение методологий, специально адаптированных для анализа данных категорий (Hidalgo-Rus et al., 2012). Существующий арсенал инструментов для идентификации охватывает широкий спектр техник: визуальное распознавание, пиролиз-газовая хроматография с масс-спектрометрией и др. В то же время недавние исследования выделяют спектроскопические методы как наиболее перспективные для получения качественных результатов идентификации, демонстрируя их высокую эффективность и точность (Shim et al., 2017).

3.3.1. Визуальное исследование. Оптическая микроскопия.

Изучение визуальных характеристик объектов, проводимое как невооруженным взглядом (Reisser et al., 2015), так и при помощи микроскопов (Morét-Fergusson et al., 2010; Bagaev et al., 2018; Kroon et al., 2018), обычно предшествует процессам идентификации и сортировки. На этом этапе происходит разделения пластиковых материалов от естественных компонентов, включая органические остатки (например, фрагменты раковин морских животных), а также от других видов непластиковых отходов, к которым относятся частицы краски, смолы, минералы, стекло и другие подобные материалы.

Исследование морфологических и структурных характеристик синтетических полимеров часто осуществляется с применением методов оптической микроскопии. Принципы данной методики базируются на изучении морфологии объектов путём анализа их способности различным образом отражать и поглощать световые лучи, а также на различии показателей преломления между разными частицами объекта и окружающей средой. Эти особенности обуславливают изменения в амплитуде или фазе световых волн после прохождения через образец, что, в свою очередь, определяет контрастность получаемого изображения.

В зависимости от специфических свойств изучаемого объекта и поставленных целей исследования, могут применяться разнообразные методики наблюдения, каждая из которых предоставляет уникальные визуализации объекта. Среди них выделяют:

1. Метод светлого поля в проходящем свете - этот метод наиболее эффективен для анализа прозрачных объектов с включениями. Свет равномерно проходит через непоглощающие зоны, освещая их, в то время как любые включения на пути светового пучка частично поглощают и рассеивают свет, что делает их видимыми как тёмные пятна на светлом фоне.
2. Метод темного поля в проходящем свете - применяется для визуализации прозрачных, неабсорбирующих объектов, которые остаются невидимыми при использовании метода светлого поля. Изображение формируется благодаря свету, рассеянному элементами структуры образца, отличающимися по показателю преломления от окружающей среды, создавая контраст между светлыми деталями на тёмном фоне.
3. Метод светлого поля в отраженном свете - используется для исследования непрозрачных объектов, когда свет направляется на объект под определенным углом, позволяя анализировать морфологию объекта на основе различий в отражательной способности его составных элементов.

В современной научной практике применяется множество видов микроскопов, работающих по принципу светлого поля, каждый из которых адаптирован для выполнения специфических задач в области изучения морфологии и структуры синтетических полимеров.

Для данных исследований морфологии и структуры обнаруженных в пробах воды, донных и пляжевых отложениях, аэрозолях, устьевых областях рек, моллюсков, почв прибрежных зон, Азовского моря, частиц микропластика был использован метод светового поля в прямом и отраженном свете, а также стереоскопическая микроскопия (при помощи стерео микроскопа Микромед МС-1 вар.2С Digital) (рис. 3.12).

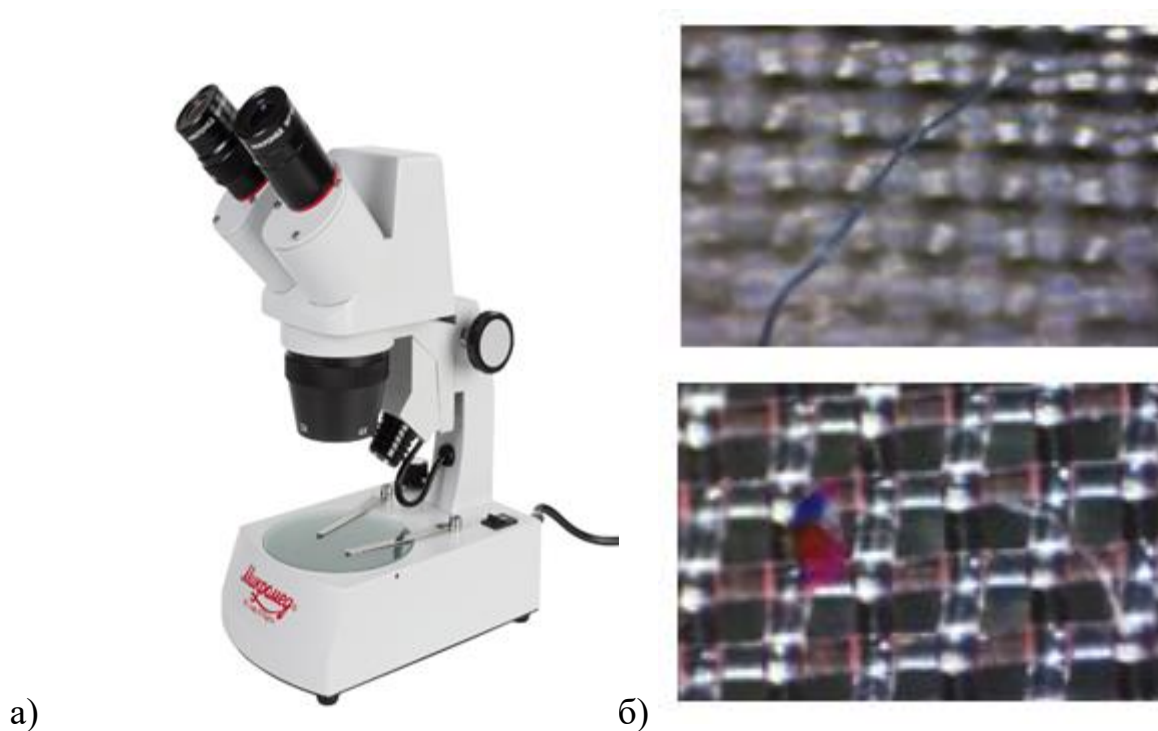


Рисунок 3.12 – а) микроскоп Микромед МС-1 вар.2С Digital; б) примеры, обнаруженных путем применения метода оптической микроскопии, частиц микропластика в Азовском море

В контексте визуального анализа признание обнаруженных фрагментов микропластиком обычно осуществляется на основе ряда субъективных признаков, включая блеск, яркость, или наличие нестандартных цветовых оттенков (Kroon et al., 2018; Hidalgo-Ruz et al., 2012). Аналогично, форма и структура частиц, а также размеры, являются важными для их визуального определения под микроскопом,

согласно определенным нормативам (Norén, 2007; Lusher et al., 2014; Barrows et al., 2018; Kroon et al., 2018). Среди таких критериев выделяются отсутствие клеточной структуры и других органических форм у анализируемых частиц; наличие у волокон равномерной окраски и постоянства толщины по всей длине. Для точной идентификации прозрачных или белых частиц целесообразно применять флуоресцентную микроскопию с высоким уровнем увеличения, что значительно повышает достоверность анализа.

МП, обнаруживаемый в морской среде, подлежит классификации по ряду ключевых параметров, включающих в себя размер, форму, удельную плотность, цветовую гамму, химический состав и, в итоге, его концентрацию в среде. В связи с этим, процесс исследования микропластика делится на две категории: морфологический и физико-химический анализ частиц, а также количественное определение химической природы полимеров, составляющих микропластик (Prata et al., 2019; Rocha-Santos, Duarte, 2017; Wang, Wang, 2018; Shim et al., 2017). Среди прочих характеристик размер частиц является одним из наиболее значимых аспектов, уступающим только их химическому составу. При характеристике микропластика под размером частицы традиционно подразумевают её максимальный линейный размер. Для определения размерного распределения применяют несколько подходов: инструментальные методы (микроскопия с калибровочной шкалой, цифровая микроскопия, микрометрические измерения); механическое фракционирование с использованием сит; комбинированные методики. Классификация частиц по фракциям в значительной степени обусловлена выбранной стратегией отбора проб и пределом фильтрации используемых сепарационных устройств. Морфология микропластических частиц демонстрирует значительное разнообразие - от сферической формы до вытянутых волокон, что отражает как исходные свойства материала, так и степень его деградации в природных условиях (Чубаренко и др., 2021).

Цвет является одним из ключевых параметров для визуальной идентификации МП, как подчеркивается в ряде исследований (Hidalgo-Ruz et al., 2012; Frias et al., 2018; Matsuguma et al., 2017). Среди преобладающих оттенков

чаще всего выделяются белый или прозрачный, близкий к белому, выцветший желтый и кремовый (рис. 3. 13) (Matsuguma et al., 2017).



Рисунок 3.13 – Частицы микропластика белого и прозрачного цвета обнаруженные в Азовском море (фото со стереомикроскопа Микромед МС-1 вар. 2C Digital)

Цветовая характеристика частиц вносит неопределенность во время их обнаружения и извлечения, особенно когда они смешиваются с обильным количеством биологического материала. Цветовой анализ позволяет оценить такие аспекты, как степень фотодегradации, время нахождения частицы на водной поверхности, а также степени их обрастания и выветривания (Matsuguma et al., 2017; Kowalski et al., 2016; Frias et al., 2018).

Несмотря на свою эффективность, одной оптической микроскопии часто недостаточно для полного анализа микропластика. Распространенной проблемой является ошибочная идентификация, поскольку некоторые частицы микропластика могут напоминать под микроскопом природные материалы. Для подтверждения пластиковой природы частиц необходимы такие методы, как например Рамановская спектроскопия, но она сопряжена с определенными трудностями, включая длительное время измерений и вероятность спектральных искажений (Araújo et al., 2018).

3.3.2. Растровая электронная микроскопия

Понимание механизмов деградации микропластика имеет решающее значение для оценки продолжительности его существования. Растровая электронная микроскопия (РЭМ), также известная как сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), играет ключевую роль в этих исследованиях, позволяя детально изучить морфологию поверхности и структурные изменения

микропластика в процессе деградации. РЭМ позволяет получить детальные изображения поверхности микропластика, что дает возможность исследователям наблюдать такие процессы деградации, как образование трещин, пор и других структурных изменений, фрагментацию на нанопластик, однако методики, позволяющей определить, в течение какого времени частица находилась в морской среде, на настоящий момент не существует.

Выделяется несколько причин влияющие на деградацию микропластика в природной среде. Деструкция и эрозия поверхности МП являются результатом воздействия биологических процессов, фоторазрушения, химического выветривания и физических факторов, таких как действие волн, ветра и абразивного износа (Andrady, 2011). Эти механизмы приводят к формированию трещин и иных поверхностных дефектов МП, вызывая значительные изменения в их форме и размерах (Shaw et al., 1994). Большие фрагменты микропластика обычно характеризуются более длинной и изогнутой формой, тогда как мелкие частицы чаще всего приближаются к сферической (Gilfillan et al., 2009). В процессе пребывания в окружающей среде МП постоянно подвергается разрушению и фрагментации, что подтверждается множеством исследований (Andrady, 2011; Doyle et al., 2011).

В рамках анализа процессов деградации обнаруженных фрагментов микропластика, извлеченных из Азовского моря, было проведено электронно-зондовое исследование. Для этой цели использовался растровый электронный микроскоп VEGA II LMU, произведенный компанией Tescan (рис.3.14).

Растровая электронная микроскопия основывается на методике сканирования поверхности исследуемого образца при помощи направленного электронного зонда. В процессе взаимодействия электронного зонда с образцом возникает широкий спектр излучений, которые используются для генерации детализированного изображения. Ключевые сигналы, лежащие в основе формирования изображений в РЭМ, включают вторичные электроны, отраженные электроны и электроны, поглощенные образцом.

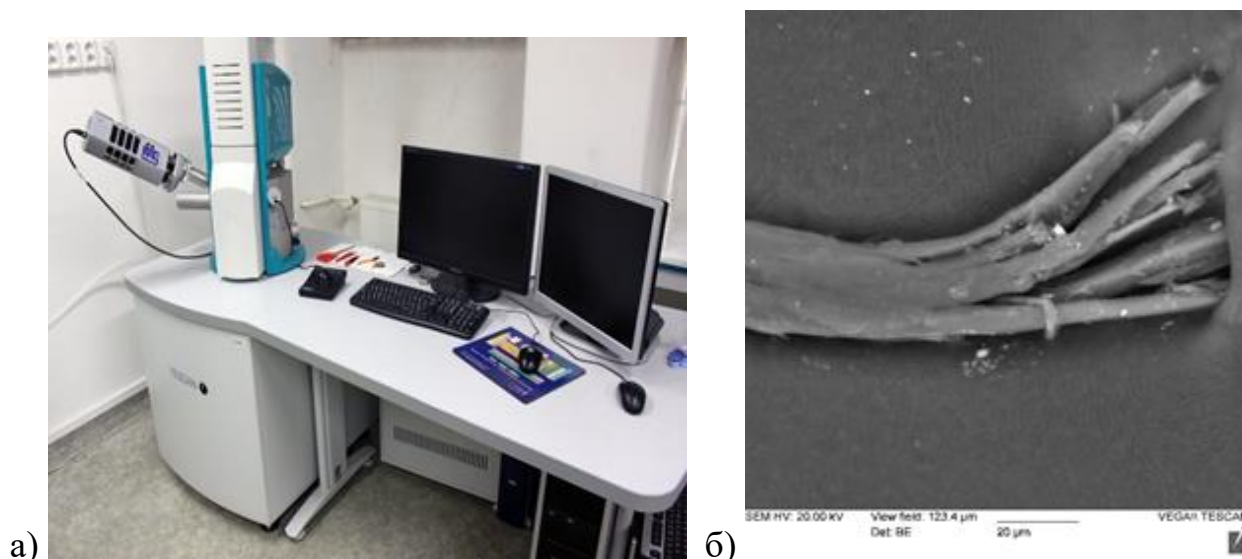


Рисунок 3.14 – а) растровый электронный микроскоп VEGA II LMU производства фирмы Tescan; б) пример частицы МП, обнаруженной в Азовском море, исследуемой методом растровой электронной микроскопией

3.3.3. Определение химического состава микропластика. ИК-Фурье спектроскопия

Для идентификации частиц МП используются различные аналитические методы. Среди спектроскопических методов анализа микропластика инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье и её технологические вариации занимают лидирующее положение, предлагая быстрый, надежный и наименее разрушающий подход к его анализу (Lusher et al., 2015; Kroon et al., 2018; Von Friesen et al., 2020). При выполнении данного исследования также было принято решение использовать метод ИК- Фурье спектроскопии (рис. 3.15, 3. 16).



Рисунок 3.15 – Исследование типа полимера частиц МП, обнаруженных в Азовском море (ИК-Фурье спектрометр JASCO FT/IR-6800).

Инфракрасная спектроскопия представляет собой мощный аналитический инструмент для исследования полимерных материалов, основанный на сопоставлении спектральных характеристик образца с референсными базами данных ИК-спектров синтетических соединений. Данная методика реализуется с помощью различных типов спектрометрического оборудования, включая: классические ИК-спектрометры; Фурье-спектрометры; аппараты для ближней ИК-области спектра (NIR) и другие. В ходе работы поток инфракрасного излучения направляется на анализируемый образец, при этом часть излучения поглощается материалом, а часть - проходит сквозь него. Сформированный таким образом инфракрасный спектр обладает уникальными характеристиками для каждого типа полимера (Вишу, 2009). Результаты визуализируются в виде графика, при этом каждая полимерная структура генерирует уникальный спектр, что позволяет провести его сравнение с эталонными спектрами из базы данных ранее изученных материалов для точной идентификации полимера. Такой подход обеспечивает идентификацию широкого спектра полимеров, включая полипропилен (ПП), полиэтилен (ПЭ) и полиэстеры. Тем не менее, анализ МП с использованием стандартных ИК-спектрометров сталкивается с проблемами, связанными с их мелким размером. Для решения этих задач применяются методы микро-ИК-Фурье спектроскопии и спектроскопии с нарушенным полным отражением (ATR).

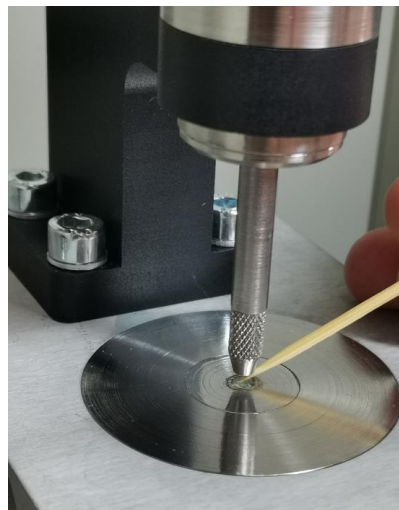


Рисунок 3.16 – Исследование типа полимера частиц МП, обнаруженных в Азовском море (Инфракрасный Фурье-спектрометр ФСМ 2202, рабочая площадка приставки «НПВО-Алмаз»)

Заключительным результатом выполнения различного типа лабораторных исследований, основанных на методиках, изложенных в данном разделе, стало описание качественных и количественных характеристик микропластика в Азовском море.

4. ГЛАВА. ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ МИКРОПЛАСТИКОМ СРЕДЫ И БИОТЫ АЗОВСКОГО МОРЯ

Морской мусор присутствует повсеместно в морской среде: от городских пляжей до самых отдалённых уголков в океане (Pham et al., 2014). Он может наносить физический вред морским организмам, например, при проглатывании или запутывании в нем (Moore et al., 2001). Изделия из пластика классифицируются как основной источник морского мусора во всем мире (Aniansson et al., 2007), и Азовское море не является исключением. Изначально потенциально плавающие в воде частицы МП в скором времени подвергаются биообращению и тонут (Chubarenko et al., 2016). Так в результате анализа донных отложений обнаруживается присутствие частиц МП, первоначально изготовленного из различных материалов, с плотностью как больше, так и меньше плотности морской воды (Claessens et al., 2011; Van Cauwenberghe et al., 2015). Тем не менее механизмы переноса с поверхности на дно неизвестны, наблюдения за их погружением недоступны, и сообщений о концентрациях антропогенных микрочастиц в воде всё ещё очень мало. Полузакрытые акватории, в частности Азовское море, демонстрируют повышенную уязвимость вследствие ограниченного водообмена, что способствует длительной аккумуляции загрязняющих веществ.

Азовское море сталкивается с комплексом экологических проблем, среди которых выделяются загрязнение нефтепродуктами, полиароматическими углеводородами, пестицидами, а также тяжелыми металлами, что напрямую коррелируют с поступлением в морскую экосистему разнообразных отходов, промышленного, аграрного и бытового происхождения. Проблема пластиковых

отходов, обнаруживаемых как в воде, так и на пляжах, выходит за рамки визуальной непривлекательности, также представляя собой источник как механического, так и химического загрязнения. Вопреки широкому распространению феномена пластикового загрязнения, данный аспект остается недостаточно исследованным в научном сообществе. Для Азовского моря анализ загрязнения его сред микропластиком проводится впервые.

4.1. Оценка уровня концентрации микропластика, его морфологических и морфометрических особенностей

4.1.1. Микропластик в пляжевых отложениях

Пляжи и косы Азовского моря, включены в границы городских и сельских поселений, подвергаясь интенсивному использованию в рекреационных целях, что приводит к значительному уровню загрязнения этих территорий продуктами человеческой деятельности, среди которых особо выделяются пластиковые отходы различного состава. В ходе проведенного исследования в прибрежной зоне Азовского моря были обнаружены многочисленные очаги свалок мезо и макропластика (рис.4.1). Вопрос о том сколько пластика, не видимого не вооруженным глазом, присутствует на берегах, остается открытым.



Рисунок 4.1 – Свалки в береговой зоне Азовского моря (к. Должанская).

Пляжи признаны местами интенсивной гидродинамической активности, в которых происходит трансформация не только естественно отложенных

материалов, но и пластика до уровня микрочастиц. Находясь в зоне влияния атмосферных выпадений, речного стока, течений из других акваторий, они служат местами аккумуляции значительных объемов этого загрязнителя. В связи с этим, данное научное исследование направлено на детальную оценку уровней микропластика в пляжевых отложениях Азовского моря, включая в себя анализ его морфологического разнообразия, изучение размерного спектра и особенностей, а также исследование процессов его деградации и разрушения.

Пляжи Азовского моря формируются в разных геологических и литодинамических условиях. Аккумулятивные берега, включая пляжи и косы, составляют более 25% общей протяженности побережья. Доминирующими в составе песчаных пляжей являются мелкозернистые и среднезернистые фракции песка. Аккумулятивные формы Таганрогского залива сложены в основном терригенными песками, доля биогенного материала не превышает 15–20%. Этот состав характерен и для кос Очаковской, Чумбурской. В пределах Северного берега Таганрогского залива в местах выхода известняков присутствует галечно-гравийные примеси этой горной породы. В собственно море увеличивается доля ракуши и детрита. На косах Долгой Камышеватской, Ясенской, Тузла, Чушка, Арабатской Стрелки, пляжах Казантипского и Арабатского заливов доля карбонатных отложений достигает 70–90%. Основным источником поступления терригенного материала – это абразия берегов, речной сток, переотложенный материала со дна. Биогенный материал поступает с ракушечных банок и других донных биотопов.

Для осуществления данного исследования были выбраны районы, отличающиеся антропогенной нагрузкой: 1. отдаленные пляжи Чумбурской и Ясенской кос; 2. малопосещаемые пляжи у п.г.т. Приазовское и ст. Камышеватская и др.; 3. самые крупные и популярные в регионе курортные районы г. Таганрог и г. Ейск (Глушко, Беспалова, 2021).

В ходе проведения экспедиционных исследований было обнаружено (особенно в районах заплеска) значительное количество мусора различной природы, в том числе пластика всех размерных диапазонов (Глушко, 2020). В

дополнение к природным материалам, таким как ветки деревьев, морские водоросли, перья птиц, а также останки морских животных и рыб, на пляжах береговой зоны Азовского моря обнаруживалось большое количество пластиковых бутылок, этикеток, фрагментов одноразовой утвари, сигаретных фильтров, элементов рыболовного снаряжения, строительных отходов и других видов мусора.

К основным источникам загрязнения МП данных районов относятся морское судоходство, рекреационная деятельность и туризм, бытовые и промышленные сбросы из прибрежных поселков и городов, работы по укреплению береговой линии, а также рыболовство.

Отбор образцов песка, выполнялся с поверхности пляжей в трех зонах, а именно: 1) на тыльной стороне пляжа; 2) на линии максимального штормового заплеска; 3) на урезе. Всего было отобрано более 72 проб, представляющие 24 различных участка береговой зоны Азовского моря.

Проведенные исследования показали, что пластиковый мусор присутствует в 100% проб пляжевых отложений (Глушко и др, 2020). Согласно результатам исследования, среднее количество фрагментов МП в одном килограмме составляет 45,2 частицы (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Среднее содержание частиц микропластика в пляжах Азовского моря, шт./кг

Результатом проведенного анализа, стало выявление территорий с наивысшими уровнями загрязнения. Пляжи, расположенные в крупном промышленном и портовом городе Таганрог, демонстрировали концентрацию частиц МП в количестве 112 шт./ кг. Аналогично, поселок Ильич (рис. 4.3), находящийся в зоне влияния черноморского течения из Керченского пролива, показал значительные показатели загрязнения в объеме 105 шт./ кг. Высокий уровень концентрации микропластика зафиксирован также в пляжах косы Павло-Очаковской – рекреационного объекта прилежащих городов Ростова-на-Дону и Азова (Глушко, Беспалова, 2021). В то же время наименьшее загрязнение было обнаружено на пляжах Ясенской косы и Сазальникской косы, где количество частиц МП составляло 12 и 14 шт./ кг соответственно, что отражает более низкий уровень антропогенного воздействия в данных сельских поселениях.

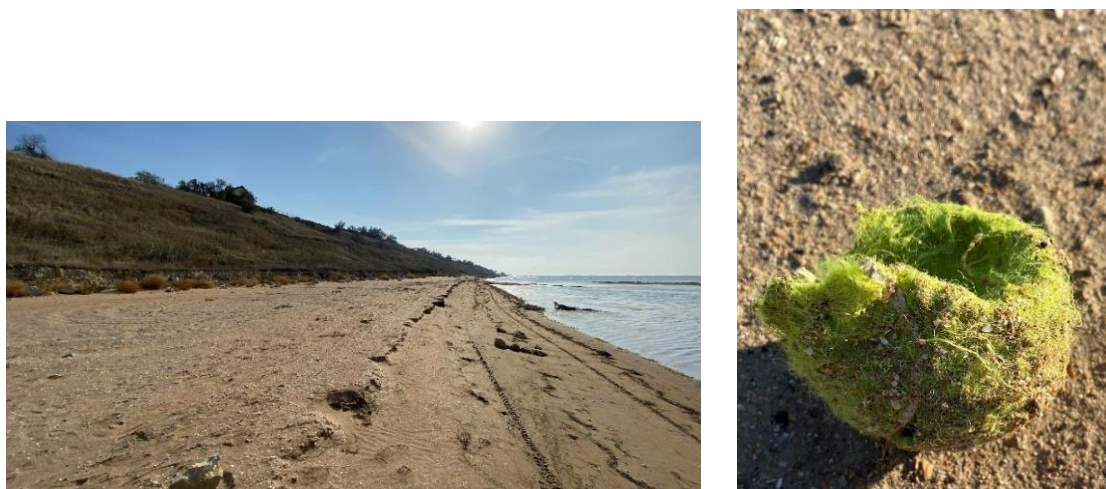


Рисунок 4.3 – Пляж пос. Ильич

Анализ распределения микропластика по профилю пляжей выявил значительную аккумуляцию этих частиц в тыльной части пляжей, что, как предполагается, напрямую связано с антропогенными источниками загрязнения, такими как мусорные свалки. Кроме того, заметное увеличение концентрации микропластика обнаруживается в зонах штормового заплеска, что указывает на влияние океанографических процессов на динамику распределения МП. Примером может служить пляжная зона с. Соляное, где средняя концентрация частиц МП, определенная по всем точкам отбора, составила 17 шт./кг в тыльной части пляжа, 23 шт./кг в зоне штормового заплеска и 11 шт./кг на урезе (рис. 4.4).

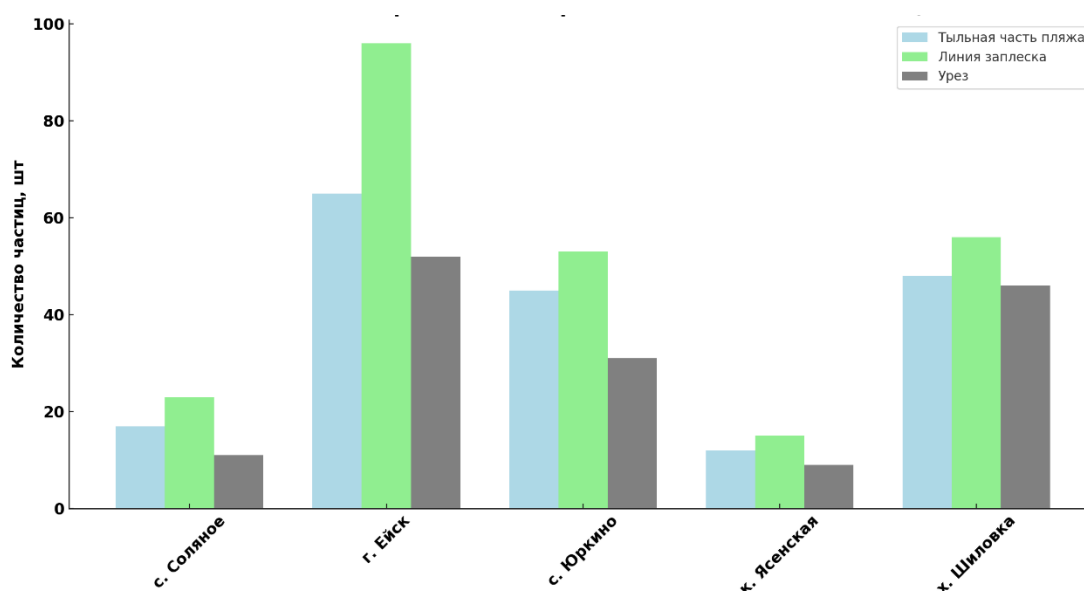


Рисунок 4.4 – Распределение пластика по профилю пляжа (с. Соляное, г. Ейск, с. Юркино, к. Ясенская, х. Шиловка)

Подобная тенденция наблюдается в большинстве исследованных районов, подчеркивая, что распределение микропластика в значительной степени определяется естественными океанографическими процессами. Такие результаты полностью согласуются с результатами исследований Чубаренко и соавторов (2021) по берегам Балтийского моря (Чубаренко и др., 2021).



Рисунок 4.5 – Распределении пластика по профилю пляжа. (1 - тыльная сторона пляжа, 2 - линия максимального штормового заплеска, 3 – урез)

Морфология микропластика обнаруженного в пляжах Азовского моря характеризуется довольно однородным составом (Глушко и др., 2020; Беспалова, Глушко, 2021). На данных пляжах преобладают синтетические волокна – как прямые, так и изогнутые, обладающие разнообразной цветовой палитрой (70,6 %),

а также фрагменты пленок (17,8 %) и поломанные куски пластика различных длины и толщины (11,6 %) (рис.4.6, рис.4.7). Станции с большим общим количеством МП имеют тенденцию к большому разнообразию форм и цветов микропластика.

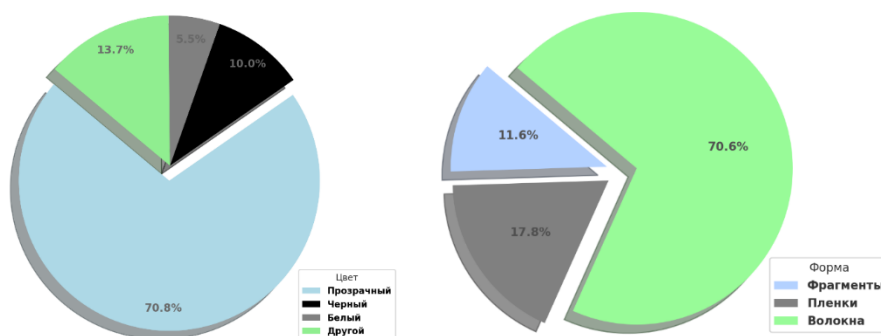


Рисунок 4.6 – Цветовая гамма и форма микропластика в пляжевых отложениях Азовского моря, %

Спектр цветов обнаруженных частиц микропластика является достаточно широким (рис.4.6, рис.4.7). Доминирующими являются полупрозрачные, обесцвеченные элементы, составляющие 70,8% от общего числа обнаруженных частиц. Черные и белые непрозрачные частицы встречаются сравнительно реже – их доля составляет по 10 и 5,5 % соответственно. Кроме того, были зафиксированы редкие случаи обнаружения частиц синего, зеленого, красного, розового, фиолетового, коричневого, оранжевого, и желтого цветов, совокупный процент которых составляет 13,7 %.

Максимальное разнообразие микропластика по цвету зафиксировано в пляжах города Таганрог и поселка Ильич, что может свидетельствовать о наличии множественных источников его поступления в морскую среду

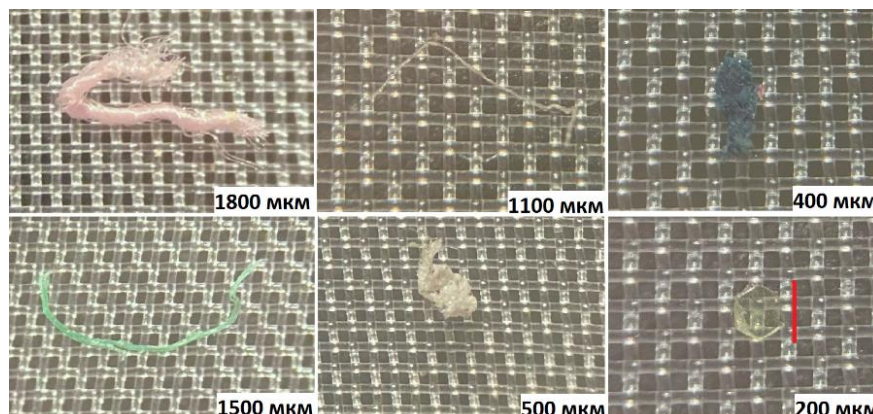


Рисунок 4.7 – Морфология и цвет обнаруженных частиц в пляжевых отложениях (фото со стереомикроскопа Микромед МС-1 вар.2С Digital)

Для оценки размерного ряда частиц МП были применены методы статистического анализа, что позволило получить среднестатистические показатели для различных пляжей. Анализ был направлен на вычисление основных статистических характеристик: среднего арифметического значения ($\bar{X}$), моды (M_o), медианы (M_e) и стандартного отклонения (σ). Эти параметры были определены как для общей выборки частиц микропластика, обнаруженных на пляжах, так и для частиц отдельных пляжей береговой зоны Азовского моря (табл. 4.2).

Таблица.4.1 – Среднее содержание обнаруженных частиц микропластика в пляжах Азовского моря и их характеристики, шт./ кг

№	Пляж	Тип осадка	Кол- во МП шт.	Среднестатистическ е значения ряда, мм /				Форма, шт.			Цвет, шт.			
				$\bar{x}$	Mo	Me	(σ) Σ	Фрагмент ы	Пленк и	Волокна	обесцвеченны е	чёрны е	белы е	други е
1	п. Приазовский	мелкозернистые пески	29	0,4	0,4	0,4	0,3	6	9	14	20	4	2	3
2	х. Рожок	мелкозернистые пески	41	0,9	0,8	0,8	0,7	3	8	30	30	5	3	3
3	г. Таганрог	крупно и среднезернистые пески	112	0,7	0,4	0,6	0,5	14	27	71	78	10	5	19
4	коса Павло- Очаковская	мелкозернистые пески	78	0,5	0,4	0,4	0,4	8	8	62	63	3	2	10
5	х. Чумбур-коса	мелкозернистые пески	37	0,4	0,3	0,4	0,3	2	10	25	29	2	4	2
6	г. Ейск	крупно и среднезернистые пески	71	0,7	0,4	0,6	0,7	4	7	60	49	11	3	8
7	коса Должанская (вост.берег)	ракуши и крупнозернистые пески	57	0,7	0,6	0,6	0,4	4	5	48	45	8	1	3
8	коса Должанская (зап.берег)	ракуши и мелкозернистые пески	65	0,8	0,3	0,7	0,7	7	14	44	47	5	4	9
9	ст-ца Камышеватская	мелкие ракушки и крупнозернистые пески	38	0,6	0,3	0,6	0,3	2	6	30	30	2	1	5
10	коса.Ясенская	среднезернистые пески	12	0,4	0,7	0,4	0,2	0	4	8	11	0	1	0
11	г. Приморско-Ахтарск	ракуши	57	0,5	0,4	0,4	0,3	2	7	48	31	9	7	10

12	пос. Ильич	мелкозернистые пески	105	0,6	0,2	0,5	0,6	25	12	68	67	11	6	21
13	с. Нижнезаморское	мелкозернистые пески и крупные алевриты	67	0,7	0,2	0,5	0,5	5	10	52	56	5	1	5
14	с. Яковенково	крупные ракушки и крупнозернистые пески	24	0,4	0,2	0,4	0,3	3	9	12	11	4	3	6
15	с. Юркино	мелкозернистые пески	43	0,7	0,4	0,7	0,6	7	7	29	23	6	3	11
16	с. Семеновка	среднезернистые пески	27	0,6	0,3	0,5	0,4	3	9	15	20	1	1	5
17	х. Шиловка	среднезернистые пески	50	0,8	0,2	0,5	0,8	8	9	33	26	7	5	12
18	с. Золотое	мелкозернистые пески	32	0,3	0,2	0,2	0,2	6	11	15	30	1	0	1
19	г. Щёлкино	крупные алевриты и мелкозернистые пески	41	0,6	0,1	0,3	0,8	12	11	18	34	3	1	3
20	с. Соляное	крупнозернистые пески	17	0,8	0,3	0,5	0,9	0	2	15	15	1	1	0
21	с. Каменское	крупнозернистые пески и ракуши	16	0,5	0,2	0,5	0,3	0	1	15	12	2	1	1
22	х. Красный Десант	мелкозернистые пески	20	0,6	0,3	0,4	0,6	1	3	16	11	3	1	5
23	коса Сазальникская	мелко и среднезернистые пески	14	0,5	0,3	0,5	0,3	2	0	12	11	1	0	2
24	с. Глафировка	крупные алевриты и мелкозернистые пески	32	0,7	0,1	0,3	1,0	2	4	26	19	4	4	5

Так, $\bar{x}$ частиц микропластика достигает 0,7 мм, при σ 0,6 мм. Самые часто встречающиеся частицы 0,2 мм. Ме ряда составляет 0,5 мм. Наиболее крупные частицы микропластика обнаружены на пляжах хутора Рожок в Таганрогском заливе ($M_o = 0,8$ мм), и с. Соленое ($M_o = 0,8$ мм) (табл.4.2). График распределения частиц микропластика по крупности соответствует естественному распределению (рис.4.8).

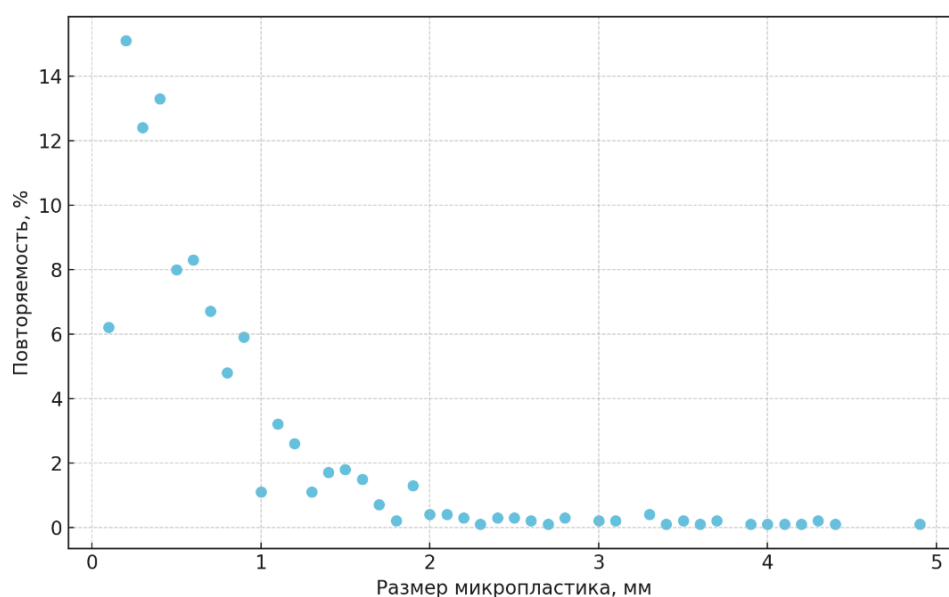


Рисунок 4.8 – Распределение частиц микропластика по крупности в пляжах Азовского моря

Из графика видно, что наибольшее количество частиц МП наблюдается в категории с наименьшим размером, и процент содержания уменьшается с увеличением размера частиц. Такая тенденция может указывать на то, что более мелкие фрагменты микропластика чаще распространены в исследуемой среде или что их легче переносить водными потоками. Диапазон размеров от 0 до 1 мм показывает относительно высокий процент содержания, который заметно убывает при увеличении размера частиц до 2 мм и продолжает падать по мере дальнейшего увеличения размера.

4.1.2. Микропластик в донных отложениях

Микропластик накапливается в донных отложениях благодаря сочетанию физических, химических и биологических процессов. На осаждение и захоронение микропластика на морском дне влияют такие факторы, как биообращение,

объединение с природными твердыми частицами, деградация и участие микроорганизмов (Lobelle, 2011; Morét-Ferguson et al., 2010).

Во время исследования были отобраны и проанализированы 27 проб донных отложений, в которых было выявлено присутствие частиц МП в разнообразных концентрациях. Содержание микропластика в донных осадках варьировало от 27 до 130 частиц на 1 кг сухого осадка при среднем содержании 69 шт./кг (Глушко и др., 2021). В пространственном распределении микропластика заметно увеличение его концентраций от центра моря к прибрежным зонам, что может указывать на источники поступления (рис. 4.9).

Анализ пространственного распределения выявил три зоны с повышенной концентрацией микропластика в донных отложениях. Первая – это восточная часть Таганрогского залива (80–97 шт./кг), которая связана с влиянием антропогенной деятельности в городе Таганрог и стока р. Дон. Вторая – Восточное Приазовье (70–130 шт./кг), где загрязнение обусловлено влиянием стока р. Кубань, а также наличием здесь городов-курортов, таких как Приморско-Ахтарск и Ейск. Третья зона фиксируется в Керченском предпроливье (более 80 шт./кг) – в районе плюма черноморских вод (Глушко и др., 2021).

Согласно полученным данным, к относительно чистым, с содержанием микропластика меньше средних для акватории значений (69 шт./кг), относятся центральные районы моря, занятые мелкоалевритовым и пелитовыми илами, и акватории Казантипского и Арабатского заливов (рис. 4.9) (Глушко и др., 2021).

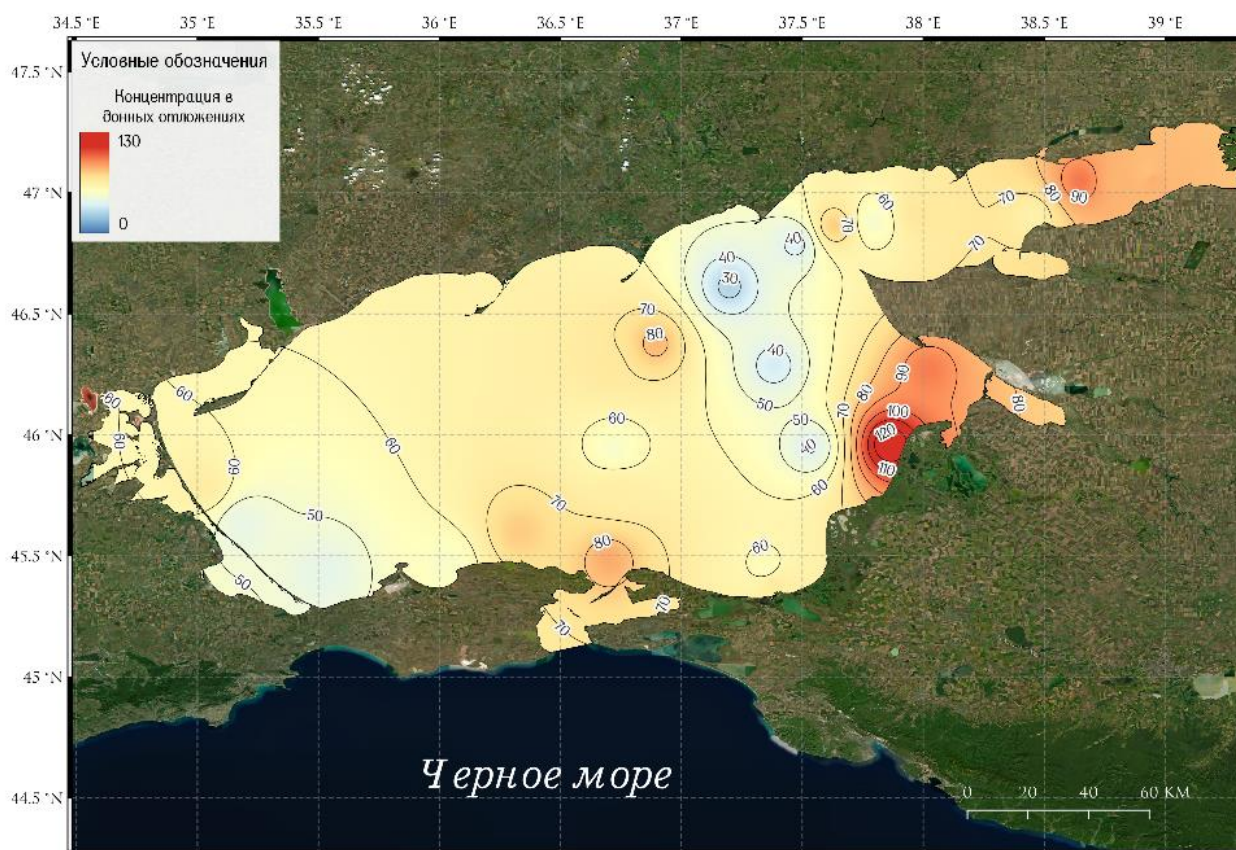


Рисунок 4.9 – Содержание частиц микропластика в донных отложениях
Азовского моря шт./кг

Проведенное морфологическое исследование обнаруженного МП (всего идентифицировано 1851 частица) выявило, что нитевидные волокна являются преобладающей формой микропластика, составляя 92,65% от общего количества идентифицированных частиц (рис. 4.10). Пленочные материалы занимают второе место по частотности встречаемости, составляя 6,1%, тогда как обломки более крупных пластиковых элементов составляют 1,25%. Отмечено отсутствие первичного пластика в форме гранул (Глушко и др., 2021). Цветовая гамма микропластика также не отличается разнообразием – преобладают прозрачные и черные частицы, 90 и 7,5 % соответственно (рис. 4.10). Тем не менее встречаются и синие (0,5 %), белые, красные, желтые, розовые, фиолетовые частицы, но на их долю приходится в целом около 2 % частиц (Глушко и др., 2021).

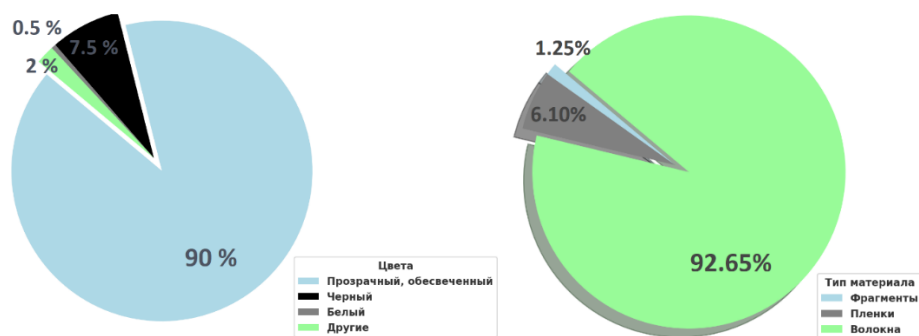


Рисунок 4.10 – Цветовая гамма и форма микропластика в донных осадках Азовского моря, %

Из всех просмотренных проб наиболее разнообразен микропластик (как по цвету, так и по морфологическим особенностям) в донных отложениях Восточного Приазовья, а также в зоне Керченского пролива, то есть там, где он был обнаружен в наибольших количествах (рис. 4.11, 4.12).

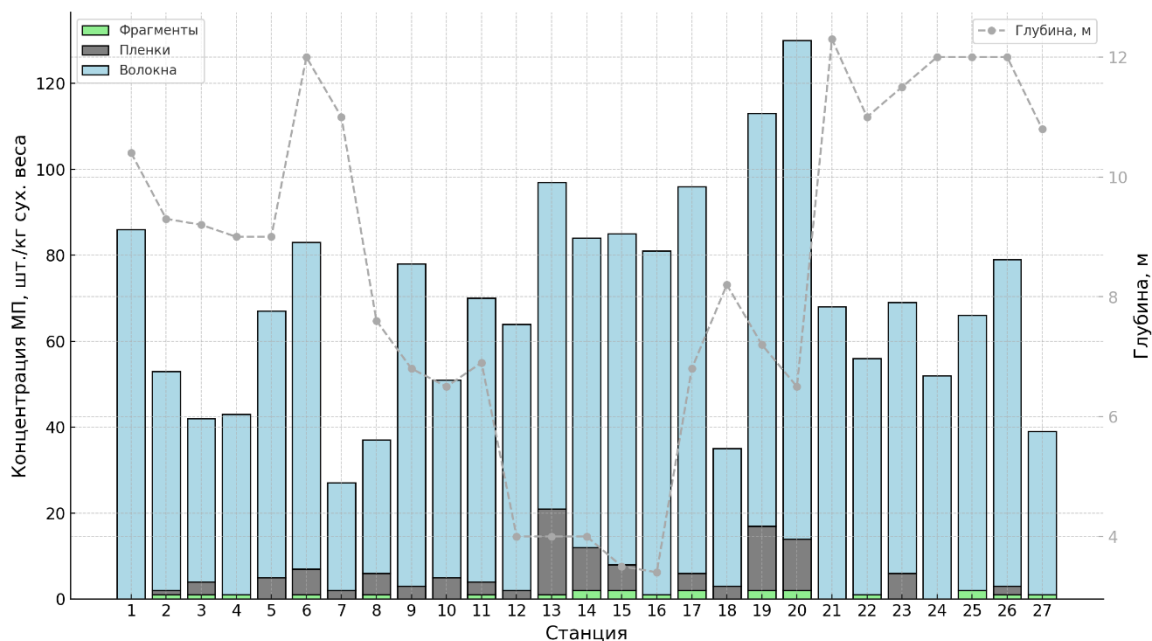


Рисунок 4.11 – Количество частиц МП (волокон, пленок и фрагментов) в пробах донных отложениях Азовского моря в соответствии с глубиной и номерами станций отбора, шт./кг сух. веса

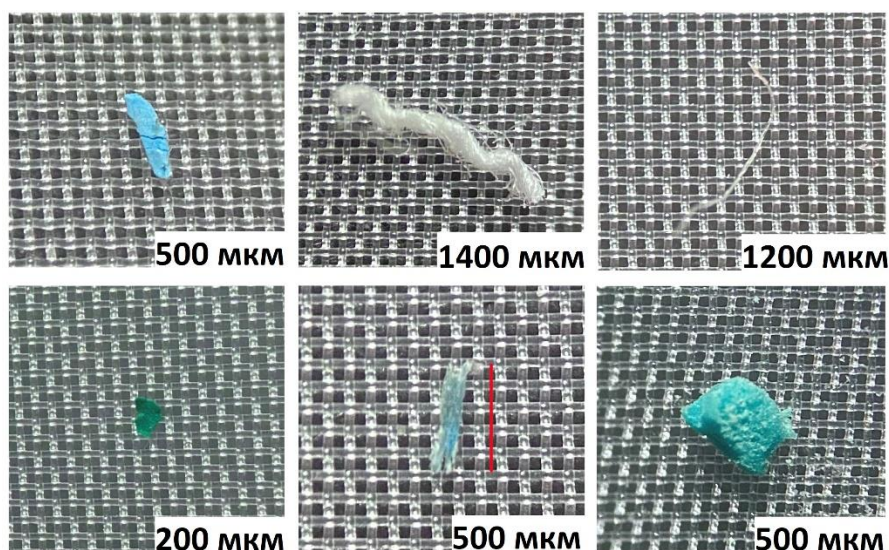


Рисунок 4.12 – Морфология и цвет обнаруженных частиц (фото со стереомикроскопа Микромед МС-1 вар.2С Digital)

Детальный анализ размерного ряда частиц МП показал, что 32,12 % обнаруженных частиц имеют размер 0,4–0,5 мм (рис. 4.13). Наиболее крупные частицы размером 1,2 и 3,1 мм составляют от 1,5 до 0,05 % от общего количества частиц соответственно (Глушко и др., 2021). Во время анализа были рассчитаны среднестатистические характеристики ряда частиц микропластика: среднее арифметическое значение ряда ($\bar{x}$), мода (M_o) и медиана (Me) ряда, и стандартное отклонение (σ) (табл. 4.2).

Анализ представленной таблицы показывает, что высокие концентрации микропластика могут быть в любых типах донных осадков (Глушко и др., 2021). Однако чаще всего сильно загрязнены алевритовые осадки и пески, то есть грунты, залегающие ближе к берегу (табл. 4.2).

Таблица 4.2 – Размеры обнаруженных частиц микропластика и тип донных осадков (Глушко и др., 2021)

Станция	Координаты станции		Глубина	Тип осадка				Количество МП шт.	Среднестатистические значения ряда			
	N	E		Пелиты 0,005	Илы 0,01	Алевриты 0,05-0,1	Пески 0,35 - >0.5		$\bar{x}$, мм	M ₀ мм	M _e , мм	(σ) мм
1	45°29'3"	36°42'8"	10,4	41	18	41	-	86	0,6	0,4	0,5	0,3
2	45°28'2"	36°02'3"	9,3	5	8	31	55	53	0,6	0,4	0,5	0,2
3	45°26'4"	35°32'1"	9,2	55	15	30	-	42	0,7	0,7	0,7	0,5
4	45°38'1"	35°11'5"	9,0	21	9	21	50	43	0,6	0,4	0,5	0,3
5	45°47'4"	35° 02'7"	9,0	36	17	47	-	67	0,6	0,4	0,6	0,3
6	46°22'3 3.2"	36°53'34 .8"	12,0	48	12	40	-	83	0,7	0,7	0,6	0,4
7	46°36'4 1.6"	37°11'55 .3"	11,0	4	3	4	89	27	0,5	0,5	0,5	0,2
8	46°47'1 1.5"	37°28'29 "	7,6	6	7	34	53	37	0,4	0,4	0,4	0,2
9	46°51'4 3.8"	37°37'58 .9"	6,8	17	11	59	13	78	0,6	0,2	0,6	0,4
10	46°52'5 2.1"	37°47'44 .9"	6,5	36	19	45	-	51	0,5	0,4	0,4	0,2
11	46°54'3 5.7"	37°58'31 .6"	6,9	40	14	46	-	70	0,7	0,4	0,6	0,4
12	46°54'9"	38°27'4"	4,0	41	14	45	-	64	0,6	0,8	0,7	0,3
13	47°2'56. 4"	38°38'56 .4"	4,0	20	13	67	-	97	0,7	0,5	0,6	0,4
14	47°03'3"	38°48'2"	4,0	10	13	77	-	84	0,6	0,5	0,5	0,3
15	47°03'6"	38°57'4"	3,5	15	12	73	-	85	0,6	0,5	0,4	0,3
16	47°5'17. 5"	38°55'51 .4"	3,4	34	11	36	-	81	0,6	0,4	0,5	0,2

17	46°16'7"	38°01'7"	6,8	44	16	40	-	96	0,7	0,7	0,7	0,5
18	46°17'7"	37°23'0"	8,2	-	2	7	91	35	0,5	0,2	0,4	0,3
19	45°06'8"	37°53'0"	7,2	6	3	18	74	113	0,7	0,5	0,6	0,5
20	45°57'3 7.6"	37°51'37 "	6,5	-	-	4	96	130	0,7	0,3	0,6	0,6
21	45°23'2"	37°23'1"	12,3	33	18	49	-	68	0,6	0,4	0,5	0,4
22	45°27'3"	37°21'7"	11,0	35	30	35	-	56	0,5	0,4	0,5	0,2
23	46°17'9. 5"	36°41'50 .9"	11,5	24 _M	60	13	-	69	0,7	0,5	0,5	0,4
24	45°56'3 8.2"	36°43'36 .4"	12,0	24 _p	60	15	-	52	0,8	0,5	0,6	0,5
25	45°46'6"	36°44'2"	12,0	24 _T	15	37	26	66	0,7	0,4	0,6	0,5
26	45°36'8"	36°20'7"	12,0	45	23	32	-	79	0,6	0,5	0,5	0,3
27	45°57'3"	37°32'0"	10,8	1	2	7	90	39	0,5	0,2	0,5	0,3

Средний размер ($\bar{x}$) частиц микропластика достигает 0,6 мм при стандартном отклонении (σ) 0,4 мм. Самые часто встречающиеся частицы (M_o) – 0,4 мм, медиана (M_e) ряда составляет 0,6 мм (рис. 4. 13). Самые крупные частицы микропластика ($M_o = 0,7–0,8$ мм) обнаружены на глубоководье в центральных районах моря, так как на больших глубинах гидродинамика ослаблена и фактор механического воздействия на пластик снижается (Глушко и др., 2021).

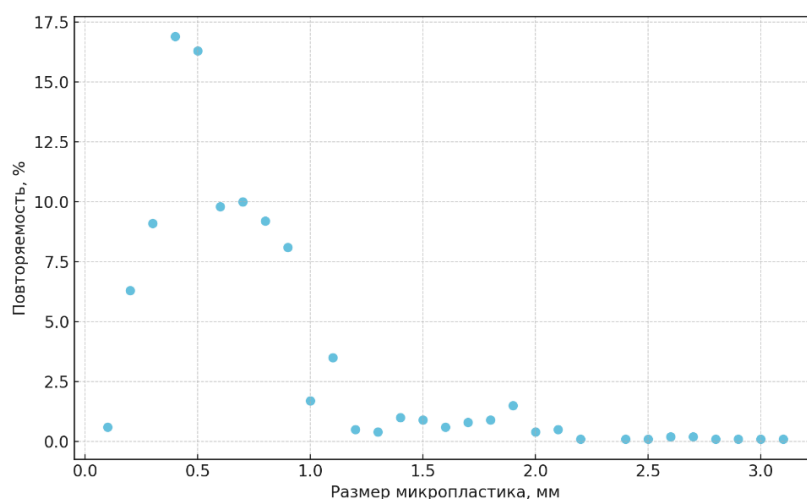


Рисунок 4.13 – Распределение частиц микропластика по крупности в донных осадках Азовского моря

4.1.3. Микропластик в поверхностных водах

Микропластик более распространен на поверхности водоемов по сравнению с толщей воды из-за целого ряда физических и химических факторов. Поверхностные течения, воздействие ветра и плавучесть некоторых видов пластика способствуют их накоплению на поверхности. Кроме того, физико-химические свойства микропластика, такие как тип полимера и площадь поверхности, могут влиять на его распределение и плавучесть. Такие факторы, как биообрастание, которое может увеличить плотность МП, зачастую приводят к тому, что некоторые частицы в итоге затонут, что повлияет на их вертикальное распределение в толще воды (Eerkes-Medrano, Thompson, & Aldridge, 2015).

Проведенные исследования показали, что пластиковый мусор присутствует в 98 % проб воды. Согласно полученным результатам, среднее содержание микропластика на поверхности воды составляет 2,8 шт./л. Максимальный уровень концентрации приурочен к зоне влияния р. Дон, р. Кубань и г. Таганрог (9 шт./л).

Наименее загрязнены МП воды центральной и южной части Азовского моря – 0–1 шт./л. (Казантипский и Арабатский заливы). В некоторых центральных районах моря, в исследуемом количестве воды, микропластик обнаружен не был. (рис.4.14).

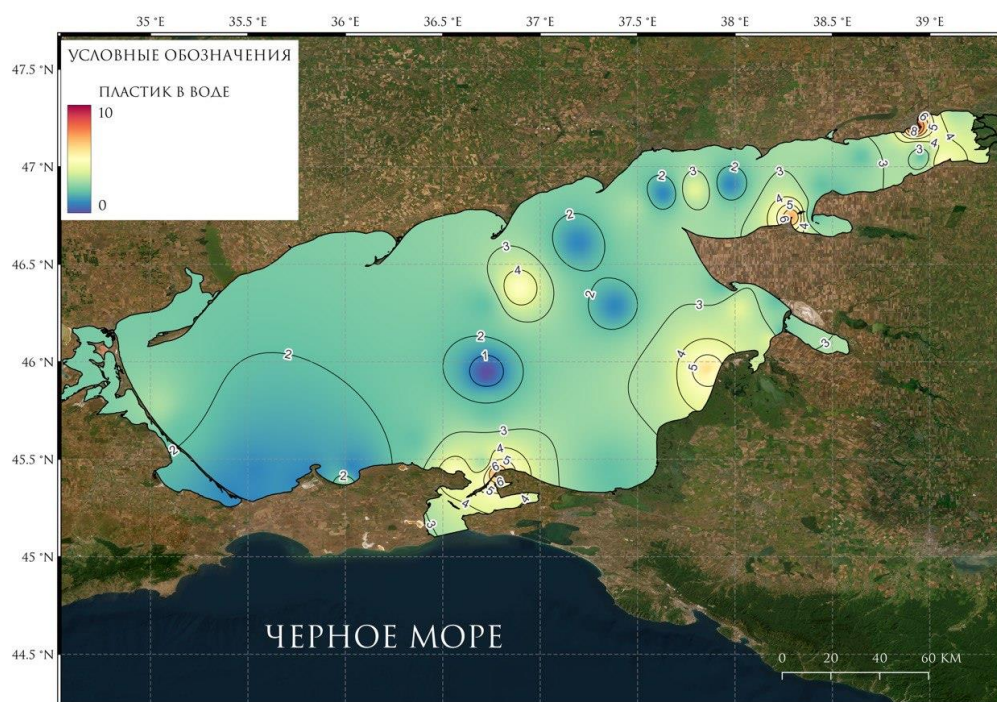


Рисунок 4.14 – Содержание микропластика в поверхностных водах Азовского моря, шт./л

Изучение морфологических характеристик частиц МП, встречающихся на поверхности вод Азовского моря, выявило преимущественное наличие прямых и изогнутых синтетических волокон, составляющих 76,76% от общего числа. Кроме того, встречаются частицы пленочного типа, занимающие 14,79%, и отломанные фрагменты пластика различной толщины, которые составляют 8,45% от всего объема МП (рис.4.15, рис. 4.16).

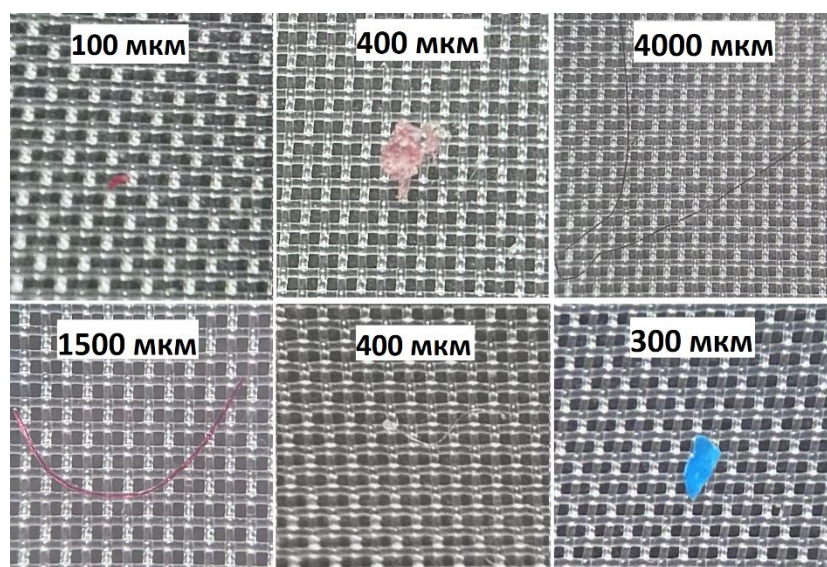


Рисунок 4.15 – Морфология и цвет обнаруженных частиц (фото со стереомикроскопа Микромед МС-1 вар.2С Digital)

Анализ цвета исследованных частиц выявил относительную однородность в распределении цветов, но большее разнообразие в сравнении с МП, обнаруженном в других средах. Полупрозрачные бесцветные частицы преобладают и составляют 68,31%, за ними следуют черные частицы с долей в 13,38%. Белые непрозрачные частицы встречаются значительно реже – всего 2,82%. Доля частиц синего, зеленого, красного, розового, фиолетового и коричневого, и других цветов составляет 15,49%, что указывает на их относительную редкость в общей массе микропластика (рис. 4.16). Наибольшее разнообразие микропластика по цвету зафиксировано в восточной части моря, что может указывать на существование многочисленных путей поступления данных частиц в акваторию.

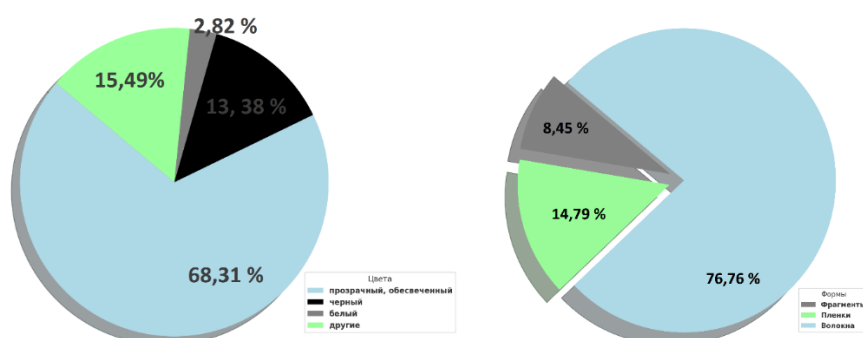


Рисунок 4.16 – Цветовая гамма и форма микропластика в поверхностных водах Азовского моря, %

В процессе проведения исследования размеры обнаруженных частиц микропластика были измерены и проанализированы с применением статистических аналитических методов. Вычисленные показатели демонстрируют, что средний размер ($\bar{x}$) частиц составляет 1,3 мм при стандартном отклонении (σ) в 1,2 мм. Наибольшую частоту встречаемости среди всех размеров имеют частицы с размером 0,4 мм. Медианное значение (Me) размерного ряда частиц установлено на уровне 0,9 мм. Коэффициент корреляции Пирсона между размером и повторяемостью составляет примерно -0,607, что указывает на умеренную отрицательную корреляцию. Это означает, что с увеличением размера микропластика процент повторяемости имеет тенденцию к снижению, что согласуется с тенденцией, наблюдаемой на графике (рис.4.17).

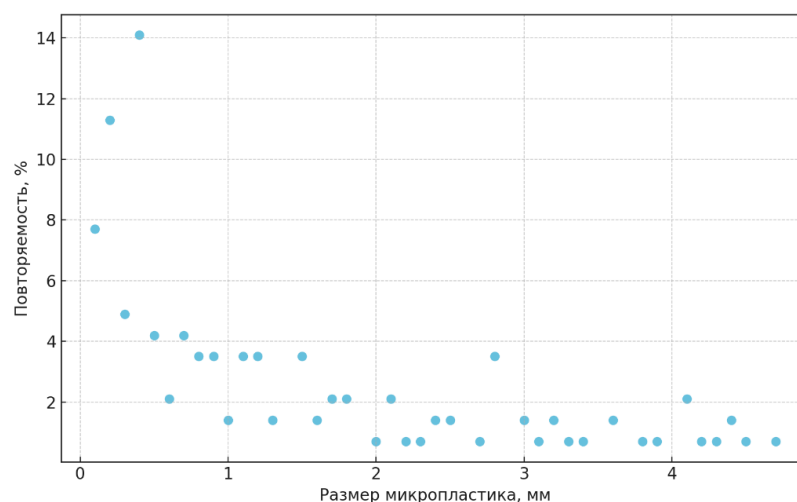


Рисунок 4.17 – Распределение частиц микропластика по крупности в поверхностном слое воды Азовского моря

4.1.4. Микропластик в моллюсках Азовского моря

Микропластик попадает в морскую среду различными путями, включая сброс сточных вод, атмосферные осаднения и прямое загрязнение. Моллюски, являясь фильтраторами, пропускают микропластик, присутствующий в воде, что приводит к его накоплению в их тканях. Концентрация и тип микропластика, обнаруженного в моллюсках, зависят от места их обитания и уровня загрязнения окружающей среды.

В ходе проведенного исследования осуществлялся отбор и аналитический анализ 44 экземпляров моллюсков Азовского моря. Изучение было направлено на два вида: 36 экземпляров мидий (*Mytilaster lineatus*) и 8 экземпляров Анадары (*Anadara inaequalis*) (рис. 4.18). В результате анализа было установлено наличие частиц микропластика в тканях исследуемых моллюсков, причем концентрации данных частиц демонстрировали значительную вариабельность, колеблясь от 0–3 шт./особь в Анадаре и от 0 до 6 шт./особь в мидиях, с усредненным значением составляющим 3 частицы на одну особь. Особенно высокие показатели концентрации микропластика были обнаружены у образцов, собранных в юго-восточной части Азовского моря, что коррелирует с общим высоким уровнем загрязнения этой акватории микропластиком.

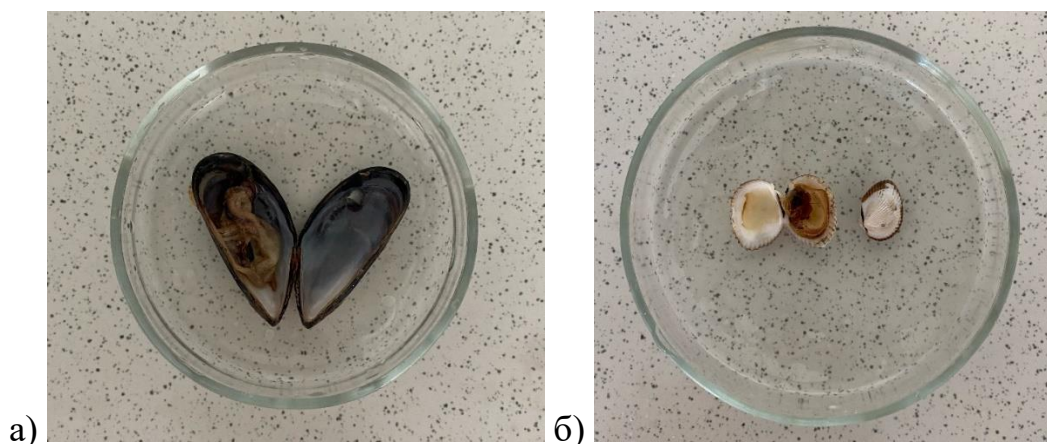


Рисунок 4.18 – Исследуемые моллюски Азовского моря: а – *Mytilaster lineatus*, б – *Anadara inaequalis*

Детальный анализ, проведенный для изучения частиц МП, обнаруженных в образцах моллюсков (103 частицы МП), обитающих в водах Азовского моря, выявил, что доминирующей формой микропластика являются нитевидные волокна, которые составляют значительную долю – 86,4% от общего количества выявленных частиц. Второй по распространенности категорией микропластика являются пленки, занимающие 12,6% от общего числа частиц (рис. 4.19). Фрагменты, представляющие собой обломки более крупных пластиковых элементов, встречались в единичных экземплярах и составляют незначительную часть – около 1%, при этом первичный МП в форме гранул, обнаружен не был (рис. 4.19).

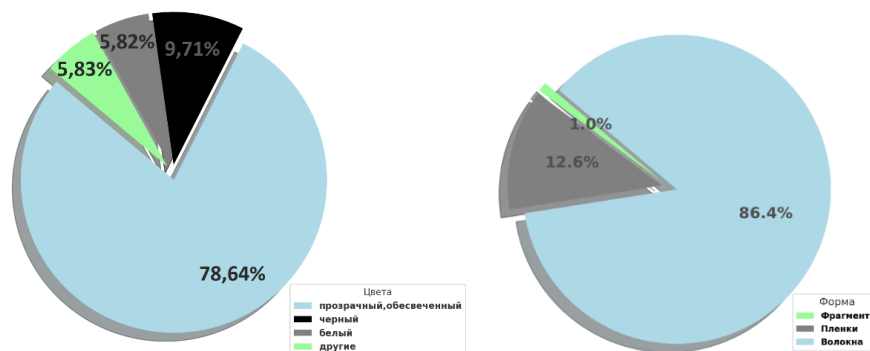


Рисунок 4.19 – Цветовая гамма и форма микропластика в моллюсках, Азовского моря %

Анализ цвета идентифицированных частиц микропластика также показал ограниченное разнообразие. Прозрачные и обесцвеченные частицы занимают доминирующее положение, составляя 78,8% от всего спектра идентифицированных частиц, в то время как доля черных составляет 9,71%. Частицы белого цвета – 5,8%, МП других цветов, включая серый, красный, желтый, розовый, синий и фиолетовый, в совокупности так же составляют приблизительно 5,8% от общего числа идентифицированных частиц (рис. 4.20, 4.21).

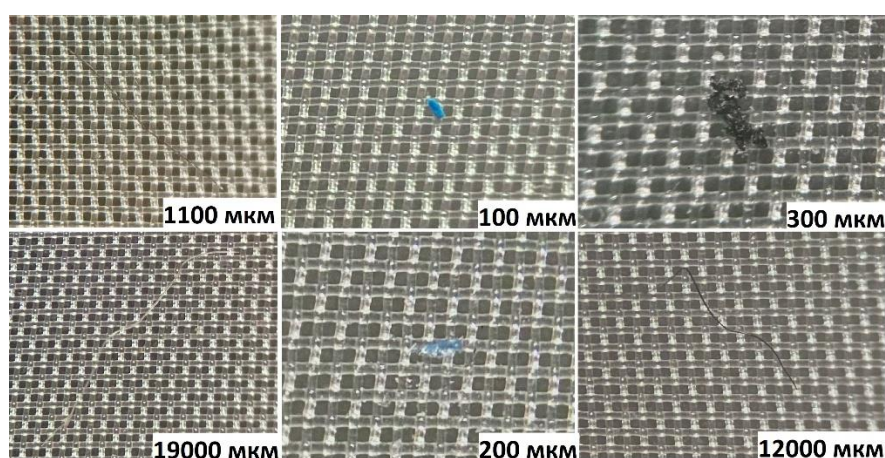


Рисунок 4.20 – Морфология и цвет обнаруженных частиц (фото со стереомикроскопа Микромед MC-1 вар.2С Digital)

Из всех просмотренных проб наиболее разнообразен как по морфологическим характеристикам, так и по цветовой гамме, оказался МП, обнаруженный в мидиях в восточной части моря, размер частиц МП так же оказался наибольшим в этом районе (рис.4.20).

Применение статистических методов анализа позволило более детально исследовать размерный спектр микропластиковых частиц. В результате было

установлено, что средний размер ($\bar{x}$) частиц микропластика составляет 0,8 мм при стандартном отклонении (σ) в 0,8 мм. Анализ распределения размеров выявил, что наибольшую частоту встречаемости имеют частицы размером 0,2 мм. Медиана (Me) размеров частиц составила 0,5 мм. Значительно выделяются частицы микропластика, обнаруженные в тканях мидий из восточной части моря, средний размер которых достигает 1,9 мм. Коэффициент корреляции Пирсона для размера частиц и их повторяемости составляет примерно -0,62. Это указывает на наличие умеренной обратной линейной зависимости между размером частицы и её повторяемостью (рис.4.21).

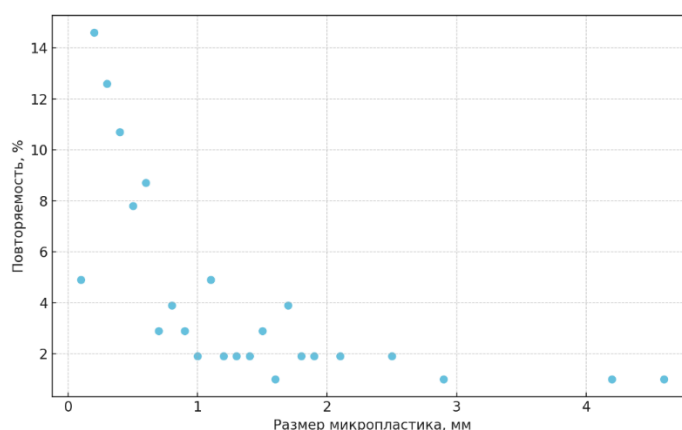


Рисунок 4.21 – Распределение частиц микропластика по крупности в моллюсках Азовского моря

4.2. Анализ источников поступления микропластика

4.2.1. Микропластик в атмосферных выпадениях над акваторией моря

Проблема присутствия микропластика в атмосфере на сегодняшний день не получила столь широко изучения, как в случае с другими средами. Тем не менее, актуальные международные научные исследования указывают на то, что микропластик, переносимый по воздуху, был обнаружен в воздушном пространстве далеко от побережий, что подчеркивает возможность глобального переноса и необходимость всестороннего понимания его воздействия на окружающую среду (Trainic et al., 2020). Согласно исследованию, проведенному группой ученых под руководством Прата, основными источниками микропластика в атмосфере являются синтетические волокна, износ шин из синтетической резины, а также эрозия и пыль городских и сельских поселений. Кроме того, значительное

количество частиц МП в атмосферу поступает с территорий строительных объектов, мест сжигания отходов, с дорожного полотна, полигонов твердых бытовых отходов и промышленных предприятий (Dris et al., 2016; Sommer et al., 2018, Prata, 2018).

В контексте проведенного научного исследования методология сбора образцов заключалась в экспонировании специальных кювет, наполненных дистиллированной водой, в различных локациях по периметру Азовского моря, включая города Ростов-на-Дону, Таганрог, Приморско-Ахтарск, Керчь, Ейск, а также станицу Тамань и на косу Сазальникская (рис. 4. 22).



Рисунок 4.22 – Расположение станций отбора проб аэрозолей

Таганрог, занимающий второе место по величине среди городов Ростовской области и расположенный на берегу Азовского моря, представляет собой значимый промышленный, транспортный и рекреационный узел в данном регионе. Согласно данным, представленным Ростовским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (филиал ФГБУ «Северо-Кавказская УГМС»), уровень атмосферного загрязнения в Таганроге остается в пределах допустимых норм. Однако фиксируется слабый рост концентрации взвешенных частиц (аэрозолей) в атмосфере города, причем источники данных аэрозолей имеют как природное, так и антропогенное происхождение. Основная доля антропогенных выбросов приходится на сектор транспорта, который создает приблизительно 80%

всех вредных выбрасываемых веществ, а также на крупные промышленные предприятия, расположенные на территории города, в числе которых металлургический комбинат, Таганрогский авиационный научно-технический комплекс им. Бериева и Таганрогский морской торговый порт. В городе также функционирует муниципальный полигон твердых бытовых отходов (рис. 4.23) и обнаружено около сотни несанкционированных свалок (Анциферова, Глушко, 2021).



Рисунок 4.23 – Мусорный полигон в г. Таганрог

В окрестностях г. Приморско-Ахтарска, расположенном на берегу Азовского моря, наблюдается низкий уровень рекреационного использования территории. Экономика этого района основывается преимущественно на сельском хозяйстве, где основными направлениями являются выращивание зерновых культур, развитие многоотраслевого животноводства, птицеводство и рыбководство. Промышленный комплекс Приморско-Ахтарского района характеризуется наличием восьми крупных и около 250 меньших предприятий, преимущественно ориентированных на переработку сельскохозяйственной продукции и строительную индустрию. Особое место в структуре промышленности занимает рыбохозяйственный сектор с такими предприятиями, как ООО «Красные пруды», ООО «Цефей» и ООО «Азовские зори» (Промышленность Краснодарского края, 2006).

Станица Тамань, благодаря своему стратегическому расположению, играет важную роль в морской транспортной инфраструктуре России. Основными

экономическими отраслями являются виноделие, а также культивирование бахчевых культур. Среди ведущих предприятий станицы можно выделить кампанию «Шампанское Тамани» и агрофирму «Южная». Туристическая инфраструктура станицы Тамань представлена разветвленной сетью гостиниц, баз отдыха, ресторанов и кафе, а также яхт-клубом, что подчеркивает стратегическую ориентацию региона на развитие курортной индустрии.

Город Ейск, расположенный на южном берегу Таганрогского залива, представляет собой сочетание курортной, промышленной, портовой и аграрной сфер деятельности. Промышленный комплекс города включает авиаремонтные и судостроительные заводы. Аграрный сектор характеризуется развитым производством винограда, кукурузы, подсолнечника и зерновых культур. Морской порт Ейска является ключевым способом для связи между промышленностью и сельским хозяйством региона с Волжским бассейном, обслуживая маршруты в порты многих стран. С течением времени зона обслуживания порта расширяется, включая регионы СНГ и страны дальнего зарубежья, при этом объемы и направления грузопотоков увеличиваются. Вместе с тем, как это характерно для активно развивающихся портов, Ейск сталкивается с экологическими проблемами, обусловленными загрязнением от припортовых промышленных объектов.

В экономике г. Керчь выделяются несколько ключевых секторов: судостроение и судоремонт, добыча и обработка морепродуктов, и т. д. В секторе судостроения выделяются предприятия, такие как завод «Залив», верфь «Фрегат» и компания «Трал», специализирующиеся на производстве пассажирских судов, буксиров, паромов и танкеров. В отрасли рыбопереработки на переднем плане стоят такие предприятия, как Керченский рыбокомбинат и завод «Пролив». Основа транспортной сети города представлена Керченским морским торговым портом, через который осуществляется экспорт аграрной продукции Крыма, в частности зерна, а также импорт бензина, строительных материалов и минеральных удобрений. Еще одним потенциальным источником загрязнения региона является предприятие «Алгеал», производящее пластмассовые изделия, включая ручки для посуды, пробки для вина и полиэтиленовые мешки.

Во время отбора проб на всех перечисленных станциях, длительность экспонирования каждой кюветы достигала 24 часов, при этом условия во время отбора проб характеризовались как тихая и ясная погода с колебаниями температуры воздуха от 16 до 27 °С. Результаты проведенного лабораторного анализа образцов атмосферных осадков, собранных в рамках исследования, демонстрируют наличие частиц МП в каждом из изученных образцов. Данный факт подтверждает, что атмосферные аэрозоли играют значительную роль в переносе микропластика в акваторию Азовского моря.

Анализ показал, что среднее количество частиц, оседающих в течение суток по всем станциям на 1 м² составляет 371 шт. в сутки (Глушко и др., 2023). Высокий уровень концентрации микропластика зафиксирован в аэрозолях г. Ростова-на-Дону (540 шт./м² /сут.), г. Таганрога (561 шт./м² /сут.), наименьший – в районе косы Сазальникская – 153 шт./м² /сут. (удалена от промышленных центров) (табл. 4.3). Так как пробы отбирались в тихую погоду, то в период сильного ветра эти цифры могут существенно возрасть (Глушко и др., 2023).

Таблица 4.3 – Характеристика обнаруженных частиц микропластика в атмосферных выпадениях над акваторией моря (в прибрежных урбатерриториях)

Станция	Темп. возд, С°	Ветер		Кол-во МП шт./м ² /с.	$\bar{x}$	Тип частиц	Цвет частиц
		скор., м/с	Напр.				
г. Таганрог	+26	2	св	561	0,8	фрагменты, волокна, пленки	прозрачный, черный, белый, бордовый, голубой
г. Ростов-на-Дону	+28	1	св	510	2	волокна, пленки	прозрачный, синий, белый, коричневый, красный
г. Ейск	+28	2	с	255	0,6	волокна, пленки	прозрачный, белый, оранжевый
г. Приморско-Ахтарск	+16	1	сз	306	1,3	волокна	прозрачный, черный, зеленый

г. Керчь	+17	2	в	459	0,8	волокна, пленки	прозрачный, черный, розовый
ст. Тамань	+24	1	сз	357	1,5	волокна	прозрачный
коса Сазальникская	+27	1	3	153	2,2	волокна	прозрачные

Обнаруженные частицы микропластика не отличались большим морфологическим разнообразием. Во всех пробах преобладали нити различных цветов (84,8%), редко попадались пленки различных размеров (14,7%) а присутствие фрагментов пластика было единично (0,5 %) (рис.4.24).

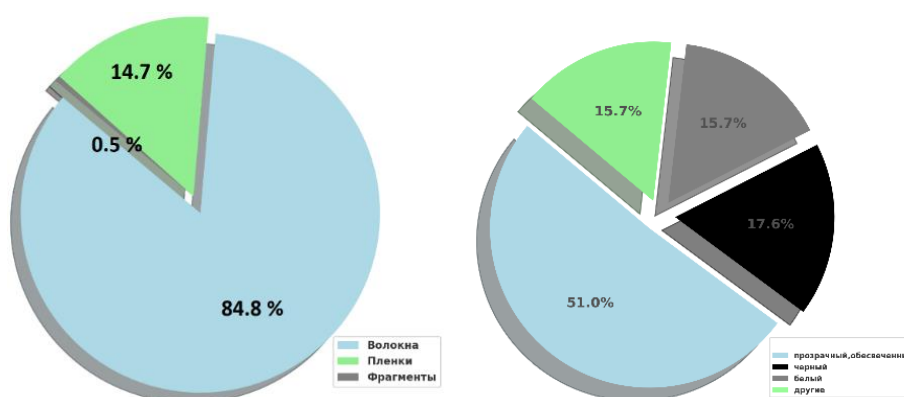


Рисунок 4.24 – Цветовая гамма и форма микропластика в атмосферных выпадениях, %

Среди обнаруженных частиц нитевидные волокна черного и обесцвеченного цветов были наиболее часто наблюдаемой формой микропластика (рис.4. 24). Подробный анализ выявил относительное разнообразие в распределении цветов. Так, прозрачные бесцветные фрагменты преобладали, составляя 51% от общего числа, за ними следовали черные частицы с долей в 17,6%. Белые непрозрачные частицы составляли 15,7 %, так же, как и совокупность частиц МП, таких цветов как синий, фиолетовый, желтый, голубой, бордовый, зеленый, красный (рис. 4.25). Максимальное разнообразие микропластиков по цвету было зафиксировано в городах Таганрог и Ростов-на-Дону, что может свидетельствовать о многочисленности источников поступления.

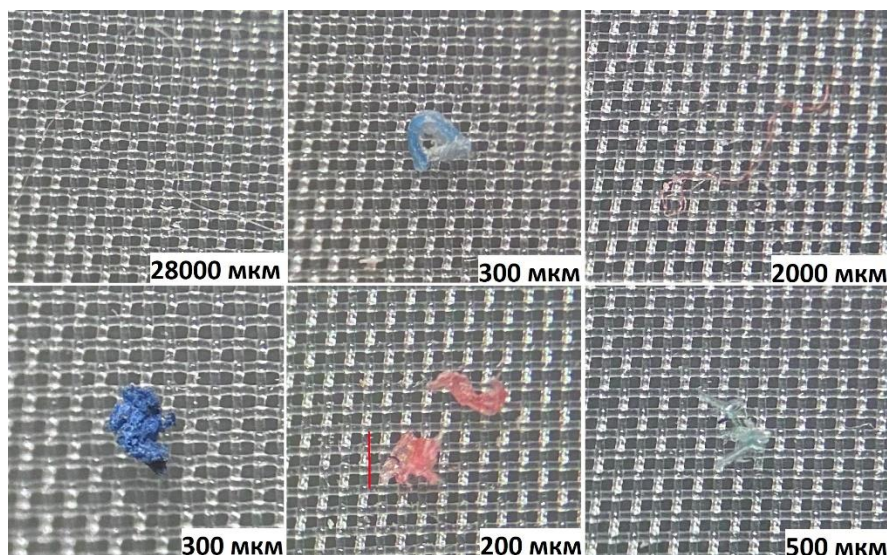


Рисунок 4.25 – Морфология и цвет обнаруженных частиц (фото со стереомикроскопа Микромед МС-1 вар.2С Digital)

Морфометрические особенности аэрозолей микропластика, рассчитанные для данного ряда показали, что их средний размер ($\bar{x}$) равен 1,2 мм, при стандартном отклонении (σ) 0,9 мм, медиана (Me) ряда составляет 0,8 мм, а наиболее часто встречающимися являются частицы размером 0,4 мм. (Mo). Коэффициент корреляции Пирсона между размером микропластика и его процентной встречаемостью составляет примерно -0,61. Это указывает на умеренную обратную зависимость между этими переменными. То есть, с увеличением размера микропластика процент его встречаемости, как правило, уменьшается (рис.4.26).

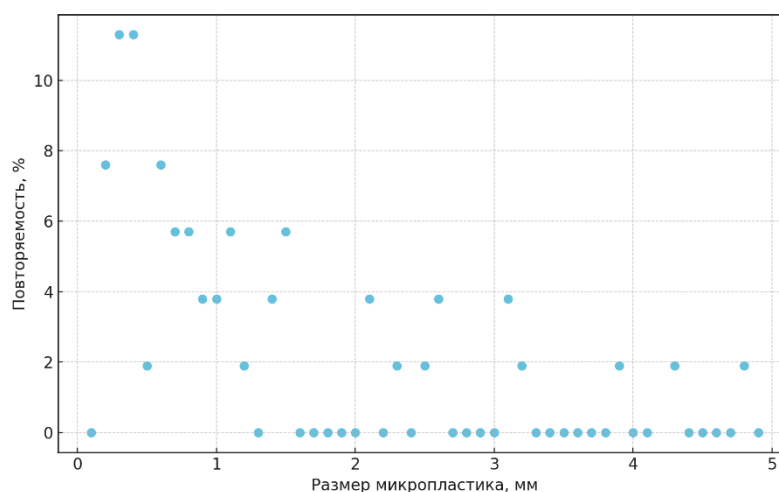


Рисунок 4.26 – Распределение частиц микропластика по крупности в атмосферных выпадениях

4.2.2. Микропластик в устьевых областях рек

Микропластик попадает в речные системы несколькими путями, включая сточные воды очистных сооружений, поверхностный сток и атмосферные осадки. Исследования показали, что очистные сооружения являются значительными точечными источниками микропластика, поскольку он не полностью удаляется в процессе очистки и попадает в реки вместе с очищенной водой (McCormick et al., 2014; McCormick et al., 2016). Так, например, согласно исследованиям, проведенным группой ученых под руководством Брауна и соавторов, одна единица текстильных изделий в процессе стирки способна высвобождать до 2000 частиц МП, большинство которых, в итоге может оказаться в реке (Browne et al. 2011). Городские районы из-за более интенсивного использования и утилизации пластика вносят значительный вклад в увеличение количества микропластика в реках (Liu et al., 2020). Являясь основными путями, по которым загрязняющие вещества из наземных экосистем попадают в различные водные объекты, можно предположить, что вместе с речным стоком, в морскую среду поступает значительный объем МП.

Перенос частиц МП в речных системах подчиняется комплексу физических параметров, таких как плотность, морфология и размер частиц, а также гидродинамикой, как например условиями ламинарного и турбулентного течения. Образцы микропластика с высокой плотностью обычно локализуются в непосредственной близости речного русла, тогда как фрагменты с меньшей плотностью плавают на поверхности (Rakesh et al., 2021).

Отбор поверхностных вод для анализа содержания МП в речных стоках Азовского моря и Керченского пролива проводился в устьевых областях р. Дон, р. Кубань, р. Протока, р. Бейсуг, р. Челбас, р. Ея, р. Мокрая Чумбурка, р. Миус, р. Мелек-Чесме, р. Мокрый Еланчик (рис.4.27).



Рисунок 4.27 – Расположение станций отбора проб в речных стоках
Азовского моря и Керченского пролива

Устьевая область р. Дон выделяется как зона с высокой концентрацией хозяйственной деятельности в регионе Нижнего Дона, где наблюдается особенно активное развитие морского и речного транспорта. Эта территория характеризуется наличием значительных транспортных узлов, включая морские порты Азова и Ростова-на-Дону. В виду текущего антропогенного воздействия экологическое состояние данной области подвергается влиянию ряда региональных факторов, включая транзитный перенос загрязнителей вниз по течению, сбросы недостаточно очищенных сточных вод от промышленных объектов, эрозию почв в результате сельскохозяйственной деятельности, судоходство («Экосистема Нижнего Дона», 2006). Основными источниками загрязнения поверхностных вод являются предприятия пищевой и рыбоперерабатывающей отраслей, расположенные, в частности, в таких населённых пунктах, как Азов, Раздорская и Багаевская, а также машиностроительные, энергетические и строительные объекты, действующие в Ростове-на-Дону, Азове и Таганроге. Кроме того, негативное воздействие оказывает сельское хозяйство и жилищно-коммунальная сфера. Сброс сточных вод с этих объектов сопровождается поступлением в водоёмы различных загрязняющих компонентов включая микропластик.

Устьевая область р. Кубань состоит из малорукавной дельты и прилегающего открытого приглубного взморья. Дельтовая система формируется несколькими водными потоками: главным образом, это рукава р. Кубань, протяженностью 118,5 км, средней шириной 92 метра, и р. Протока, длиной 135,5 км, шириной также 92 метра, а также ряд мелких водотоков и каналов. Река Кубань характеризуется значительным потенциалом гидроэнергетических ресурсов. Кубанский каскад гидроэлектростанций является ключевым элементом в обеспечении региона электроэнергией. Эта энергетическая инфраструктура необходима не только для бытовых нужд населения, но и для обеспечения деятельности промышленных предприятий региона. Кроме того, в нижней части реки находится Краснодарское водохранилище. Данный водоем выполняет множество функций, в том числе обеспечивает орошение сельскохозяйственных угодий, способствует предотвращению наводнений и создает условия для отдыха и рекреации населения.

Река Ея занимает исключительное положение в гидрографической системе Азово-Кубанской низменности, являясь наиболее многоводным водотоком данной территории и занимая второе место по длине после реки Кубань в пределах Краснодарского края (рис. 4. 28). Ея служит местом для промысловой рыбалки. В прилегающих к реке лиманах создаются благоприятные условия для организации промышленной рыбной ловли. Обширный водосборный бассейн реки Ея стимулирует активное развитие сельскохозяйственной деятельности на ее берегах.



Рисунок 4.28 – Отбор воды в устьевой области р. Ея

Среди водных ресурсов Северного Приазовья река Миус выделяется как наиболее значительный водный поток, ее длина составляет 258 км. На различных участках реки и ее притоков реализована конструкция многочисленных водохранилищ и прудов, предназначенных для различных нужд местного хозяйства. Ольховское водохранилище, расположенное на р. Ольховая, левом притоке Крынки, является крупнейшим из них. Промышленное водопользование в бассейне р. Миус характеризуется деятельностью небольших предприятий, важных для местной экономики, таких как маслозаводы, бумажные фабрики, мясокомбинаты и прочие, которые осуществляют ограниченный безвозвратный отбор воды, оказывая при этом существенное влияние на качество водных ресурсов (рис.4. 29). В рамках водного обеспечения сельскохозяйственных территорий, осуществляемого в бассейне реки Миус, особое внимание уделяется обеспечению водными ресурсами сельского населения, животноводческих ферм, а также предприятий, занимающихся первичной переработкой аграрной продукции.



Рисунок 4.29 – Отбор воды в устьевой области р. Миус

Исследование распределения частиц МП в устьевых областях рек Азовского моря выявило их присутствие во всех отобранных пробах воды. Среднее количество обнаруженных частиц МП составило 8 шт./л. Наибольшее скопление микропластика было зарегистрировано в водах реки Дон, где показатель достиг 14 шт./л, за ним следует река Кубань с количеством 11 шт./л. В пробах воды из реки Ея количество МП составило 7 шт./л, аналогичные показатели наблюдались в реках Протока (8 шт./л), Бейсуг (8 шт./л), Челбас (7 шт./л), Мокрая Чумбурка (7 шт./л), Миус (8 шт./л), Мелек-Чесме (7 шт./л) и Мокрый Еланчик (7 шт./л) (табл. 4.4).

Таблица 4.4 Содержание микропластика в устьевых областях рек (по данным съемки 2020 г.)

Река	Объем стока/ год, км ³ (2020 г)	Кол-во МП шт./л	$\bar{x}$	Тип частиц	Цвет частиц
р. Ея	1,37	7	1,4	Волокна, пленки, фрагменты	Прозрачный, зеленый, голубой
р. Мелек-Чесме	0,001	8	1,5	Волокна	Прозрачный, черный, белый
р. Кубань	13	11	0,7	Волокна, пленки, фрагменты	Прозрачный, черный, синий, оранжевый, красный
р. Бейсуг	0,2	8	0,7	Волокна	Прозрачный
р. Мокрая Чубурка	0,04	7	1,4	Волокна	Прозрачный, белый
р. Дон	9,73	14	1,3	Волокна, пленки, фрагменты	Прозрачный, черный, синий, зеленый, желтый
р. Миус	0,13	8	0,9	Волокна	Прозрачный, черный
р. Протока	0,1	8	1,1	Волокна, пленки	Прозрачный
р. Мокрый Еланчик	н/д	7	0,9	Волокна	Прозрачный
р. Челбас	0,16	7	1,3	Волокна, пленки	Прозрачный, черный

Анализ МП, найденного в речном стоке, выявил значительное разнообразие в цветовой палитре, что вероятно так же указывает на разнообразие предметов, из которых он был образован. Установлено, что доминирующими являются прозрачные частицы, составляющие 58% от общего числа, за ними следуют черные частицы с долей в 13,6%, белые – 3,4%, и прочие цвета, включая синий, зеленый, красный, оранжевый и желтый, которые в совокупности занимают 25% (Глушко и др., 2023). Данные фрагменты представлены в различных формах и размерах (рис. 4.30, р. 4.31). Максимальная цветовая вариабельность частиц МП наблюдается в р. Кубань и р. Дон.

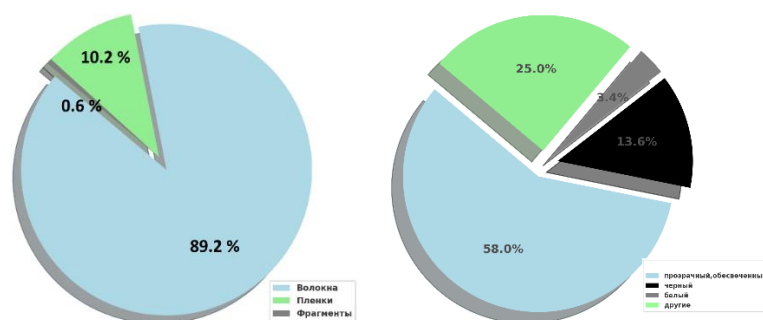


Рисунок 4.30 – Цветовая гамма и форма микропластика в устьевых областях рек,
%

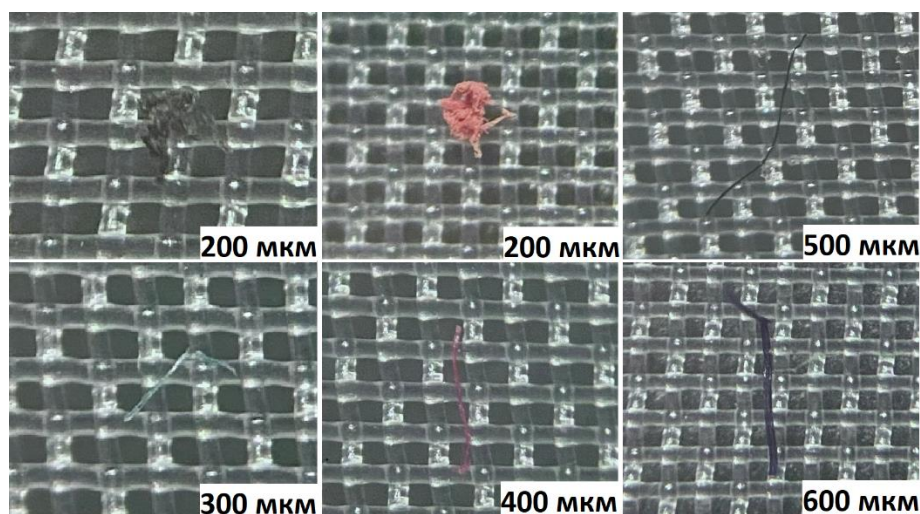


Рисунок 4.31 – Морфология и цвет обнаруженных частиц (фото со стереомикроскопа Микромед МС-1 вар.2С Digital)

Статистический анализ размерных характеристик частиц, обнаруженных в речном стоке, указывает на то, что средняя длина ($\bar{x}$) составляет 1,1 мм при стандартном отклонении (σ) в 0,7 мм. Медианное значение (Me) размера частиц равно 0,4 мм, что свидетельствует о том, что половина всех частиц имеет размер менее 0,4 мм. При этом наиболее часто встречающимся размером частиц в речном стоке является 0,4 мм (Mo).

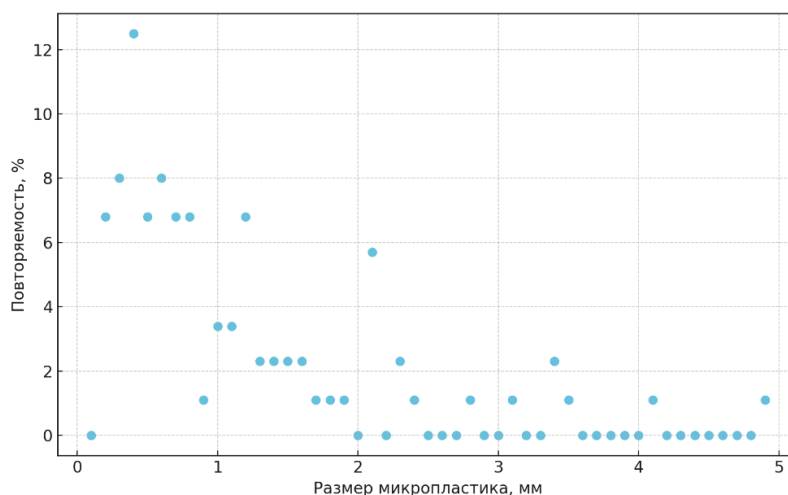


Рисунок 4.32 – Распределение частиц микропластика по крупности в устьевых областях рек

Из представленного графика (рис.4.32) видно, что нет частиц размером 0,1 мм, а процент встречаемости частиц увеличивается с ростом их размера до 0,4 мм,

где достигает максимума в 12,5%. Затем процент встречаемости снижается для частиц размером 0,5 мм до 6,82%, и далее. Коэффициент корреляции Пирсона между размером микропластика и процентом его встречаемости составляет примерно -0,691, что подтверждает наличие умеренной обратной зависимости между этими двумя параметрами.

4.2.3. Микропластик в почвах прибрежной зоны

Согласно исследованиям последних лет, микропластик повсеместно распространен в почвах, причем его концентрация значительно варьируется в зависимости от региона. Особую тревогу вызывают концентрации в сельскохозяйственных почвах, где в некоторых исследованиях они достигали 13 000 шт./кг⁻¹ (F. Büks & M. Kaupenjohann, 2020). Источники загрязнения почвы микропластиком разнообразны: от сельскохозяйственной деятельности, орошения, сточных вод, атмосферных осадков до фрагментации более крупных пластиковых изделий на свалках (Wenfeng Li, Yongming Luo, & Xiangliang Pan, 2020; Wainkwa Chia et al., 2021). А сами почвы прибрежных территорий являются потенциальным вторичным источником микропластика, переносимого в воздухе за счет ветровой эрозии, поверхностного стока (Michael et al., 2023), а также с абразией берегов.

Почвы побережья Азовского моря формируются в условиях уникальной геоморфологической, гидрологической и климатической обстановки, присущей данному региону (Безуглова, 2008). Основным зональным типом почв на Доно-Кагальницком водоразделе являются обыкновенные карбонатные черноземы. Эти почвы отличаются темно-серым цветом с бурым оттенком в верхней части профиля, который по мере углубления светлеет до серо-бурого и бурого тонов. Продолжительная обработка почв привела к утрате первоначальной зернистой структуры верхнего горизонта, который в настоящее время в пахотном слое имеет пылевато-комковатую или порошисто-комковатую структуру, а в подпахотном – зернисто-комковатую. Микро- и мезорельеф Доно-Кагальницкого водораздела обуславливает присутствие и других типов почв, таких как лугово-черноземные, луговые и лугово-болотные почвы, а также почвы балок (Хитров, 2006; Хрусталеv 2002).

Черноземы обыкновенные карбонатные, имеющие малый и слабый уровень содержания гумуса, представляют основу почвенного покрова равнин вдоль берегов Таганрогского залива. Эти почвы характеризуются различной мощностью и формируются на лёссовидных тяжелых суглинках или глинах. В понижениях с лиманами, типичными являются соровые солончаки (Безуглова, 2002; Минкина и др., 2004).

Древняя дельта р. Кубань характеризуется в основном наличием аллювиальных отложений, обладающих разнообразным гранулометрическим составом, который варьируется от супесей до тяжелых глин. Почвенный покров данной территории в основном представлен лугово-черноземными, луговыми, лугово-болотными и болотными почвами, большая часть которых засолены и солонцеваты. Кроме того, в низменных участках распространены солонцы различной степени глинистости, а также луговые солонцеватые почвы, формирующиеся на аллювиальных глинах (Хитров и др., 2015).

Современная динамика береговой линии Азовского моря определяется преобладанием абразивных процессов, особенно на восточном побережье, которое отступает наиболее интенсивно. Особенно высокая интенсивность абразии наблюдается в тех районах побережья, где волны усиливаются нагонами, вызванными береговыми ветрами, при этом пляжи либо узкие, либо совсем отсутствуют (Матишов и др., 2006). Песчаные и другие пляжеобразующие фракции в размываемых грунтах составляют лишь малую часть, в то время как основная масса абразионного материала в виде взвеси переносится в глубинные части моря. Таким образом, вместе с почвой в акваторию Азовского моря попадает и накопленный в ней пластик.

Отбор проб для анализа содержания МП в почвах абразионных берегов Азовского моря проводился в районе кос Беглицкая и Сазальникская, г. Таганрог, дельта Дона, коса Павло-Очаковская, г. Ейск, г. Приморско-Ахтарск, г. Керчь (рис. 4.33). Данные, полученные в результате анализа, показали, что 87,5% изученных проб почв содержат микропластик,



Рисунок 4.33 – Расположение станций отбора проб почв абразионных берегов

Средний показатель количества МП составил 7 шт./кг. Особенно высокие концентрации были обнаружены в почвах, отобранных в дельте р. Дон, где их количество достигло 16 шт./кг. Следующий по степени загрязненности регион – г. Таганрог, где количество микропластика составило 14 шт./кг., за ним следует г. Керчь – 8 шт./кг. Города Ейск и Приморско-Ахтарск показали схожие результаты с концентрацией в 6 шт./кг. В почвах кос Павло-Очаковская содержание МП составило 4 шт./кг., к. Беглицкая – 2 шт./кг. В почвах косы Сазальникская МП обнаружен не был.

В рамках исследования частиц МП в почвах абразионных берегов Азовского моря было выявлено, что большинство из них (61,12%) представлены прозрачными или обесцвеченными фрагментами. Также обнаружены черные частицы, составляющие 9,83%, и белые, насчитывающие 8,54%. Доля других цветов (зеленый, красный, желтый, молочный, голубой, синий и т. д.) составила 20,51% (рис. 4.34, 4.35).

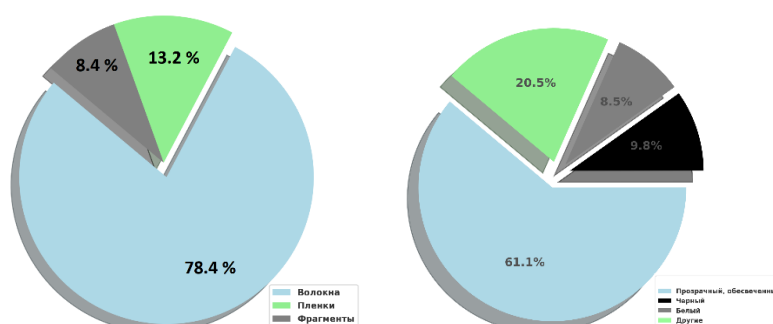


Рисунок 4.34 – Цветовая гамма и форма микропластика почв абразионных берегов, %

Что касается форм микропластика, то они не отличались большим разнообразием: волокна преобладали, составив 78,4% от общего числа частиц. Пленки были найдены в 13,2% случаев, а фрагменты составили всего 8,4% (рис 4.34, 4.35).

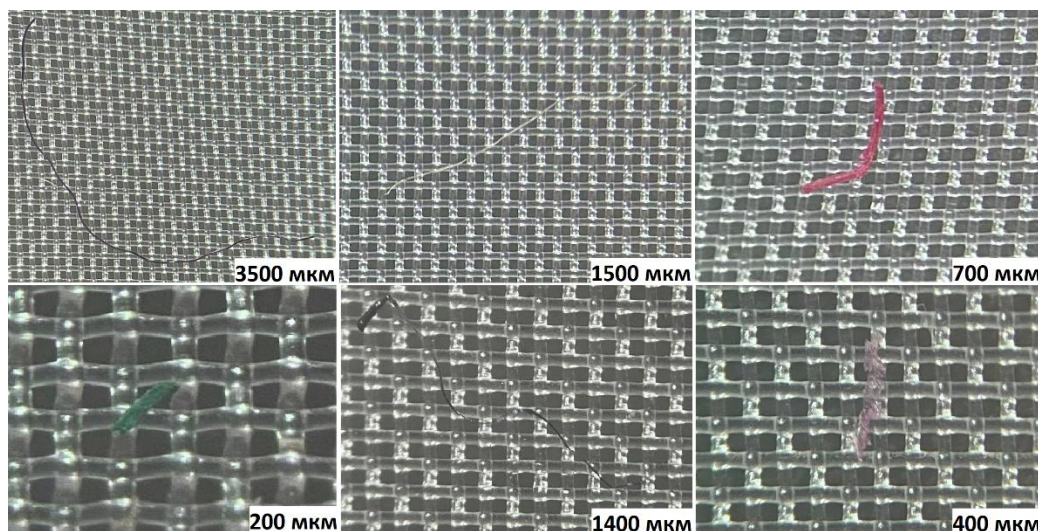


Рисунок 4.35 – Морфология и цвет обнаруженных частиц (фото со стереомикроскопа Микромед МС-1 вар.2С Digital)

Анализ, проведенный для оценки размерных характеристик частиц МП, обнаруженных в почвенных образцах, установил, что средний размер частиц ($\bar{x}$) составляет 0,9 мм, при этом стандартное отклонение (σ) равно 0,8 мм. Данные показывают, что медианное значение размера частиц (Me) равно 0,6 мм, что указывает на превышение размера половиной обнаруженных частиц 0,4 мм. Анализ распределения размеров выявил, что наиболее часто встречаемый размер частиц в образцах составляет 0,4 мм (Mo).

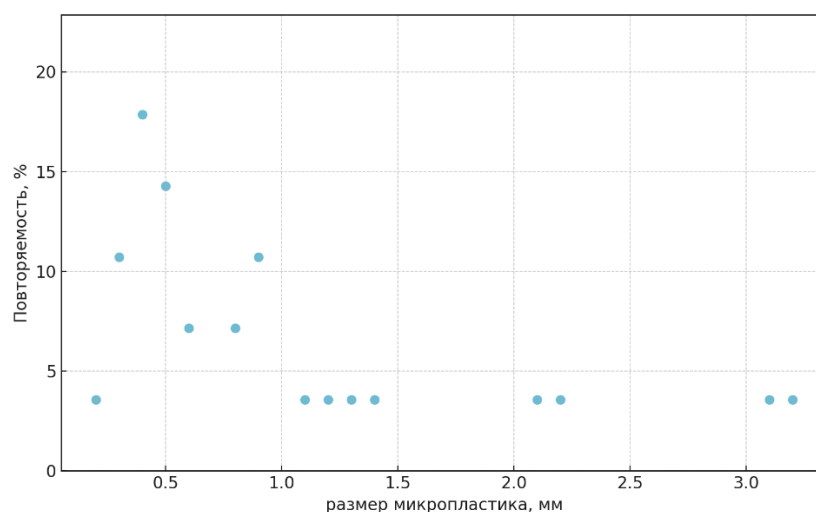


Рисунок 4.36 – Распределение частиц микропластика по крупности в почвах абразионных берегов

Исходя из анализа данных обнаруженных частиц (рис. 4.36), можно сделать вывод, что МП варьирует в размерах с небольшим количеством очень мелких и очень крупных частиц, в то время как большинство размеров сконцентрированы вокруг среднего значения. Почти половина значений размера МП находится в пределах от 0,55 мм до 1,75 мм. Коэффициент корреляции между размером МП и процентом его встречаемости составляет примерно – 0,56. Это указывает на умеренно отрицательную корреляцию между этими двумя переменными. То есть с увеличением размера микропластика, вероятность его встречаемости имеет тенденцию к снижению.

4.3 Деградация частиц микропластика

В процессе длительного пребывания пластиковых предметов в окружающей среде наблюдается постепенная потеря их первоначальных характеристик. Скорость этого изменения зависит от ряда факторов, включая физические, химические и биологические условия нахождения. Конкретная степень изменений свойств пластика коррелирует с продолжительностью и интенсивностью воздействия на него окружающей среды. Эта динамика отражает комплексное взаимодействие между пластиковым объектом и многообразием экологических условий.

Среди многочисленных факторов УФ-излучение является одним из главных, вызывая относительно быстрые изменения за счет механизма термоокисления, который значительно модифицирует свойства материала (Andrady, 2017). Так, процесс окисления, вызванный УФ-излучением на суше, протекает значительно быстрее по сравнению с другими деструктивными факторами воздействия на пластик (Wang et al., 2016). Наибольшее УФ-старение пластика наблюдается на пляжах, в то время как в водной среде этот процесс идет медленнее, что объясняется более низкой температурой воды по сравнению с температурой на поверхности песка (Andrady, 2011, 2017). В водных условиях деструктивное действие УФ-излучения может снижаться за счет биообрастания частиц, что делает результат зависимым от особенностей вида обрастающего пластика (Andrady, 2017). По данным Веинштейн и соавторов (2016), биоплёнка на поверхности плавающих объектов может снижать эффект солнечной радиации до уровня почти полного экранирования (Weinstein et al., 2016), однако пластик, находящийся на поверхности, все же подвергается прямому воздействию солнечного света (Ter Halle et al., 2017).

Физическое истирание, такое как воздействие волн и песка, механически разрушает пластиковый мусор на более мелкие частицы. Постоянное движение и трение, вызываемое волнами, и абразивная природа песка вносят значительный вклад в уменьшение размера пластикового мусора, в дальнейшем превращая его в микропластик (Andrady, 2011). Процесс механической фрагментации пластика в прибойной зоне, особенно интенсивен в периоды штормов.

Микроорганизмы играют важнейшую роль в биодegradации пластика. Некоторые бактерии и грибы продемонстрировали способность колонизировать и разрушать определенные типы пластмасс. Однако эти биологические процессы, как правило, протекают медленнее, чем физические и химические механизмы деградации, и часто ограничиваются поверхностью пластиковых частиц, хотя некоторые механизмы до сих пор до конца не изучены (Oberbeckmann & Labrenz, 2020; Othman et al., 2021).

В проведенном исследовании были осуществлены анализы процессов деградации пластиковых материалов с использованием растрового электронного микроскопа VEGA II LMU фирмы Tescan (поверхность всех образцов напылялась углеродом в напылительной установке «Emitech K450»). Данный инструмент, благодаря возможности многократного увеличения, позволяет детально изучить стадии разрушения пластика и характеристики процесса деградации. В результате анализа типичных образцов микропластика, обнаруженного в Азовском море были идентифицированы основные виды деградации, включая расслаивание, растрескивание и расщепление. Специфические для различных форм пластика процессы также были выявлены: для пластиковых нитей типичны раскосмачивание и расщепление, тогда как пластиковые пленки часто подвергаются расслаиванию, растрескиванию и набуханию (рис. 4. 37., 4.38).

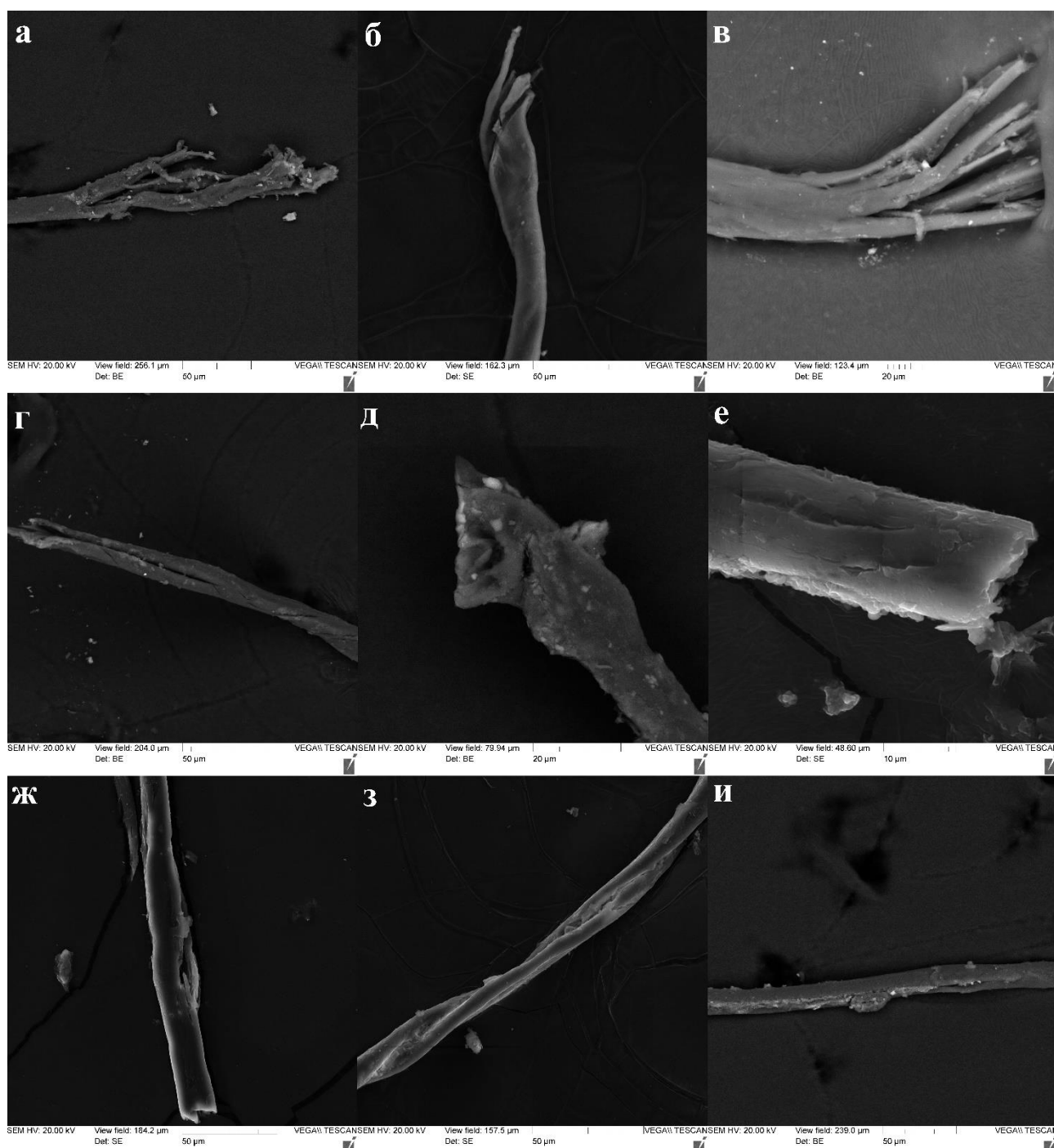


Рисунок 4.37 – Виды деградации частиц микропластика (фото с растрового электронного микроскопа VEGA II LMU производства фирмы Tescan): а-в – раскосмачивание, расщепление; г-и – расщепление, растрескивание

В научной литературе принято рассматривать морфологические характеристики частиц как важный критерий их времени пребывания в акватории. Актуальные исследования указывают на то, что острые грани частиц могут служить доказательством их относительно недавнего попадания в морскую среду или же недавнего процесса фрагментации более крупных структур. С другой

стороны, наличие гладких и закругленных краев у частиц обычно указывает на их продолжительное пребывание в морской среде. Такие морфологические особенности являются результатом постоянного воздействия абразивных процессов, в ходе которых частицы полируются о другие фрагменты или песчаные отложения (Carpenter, Smith, 1972; Doyle et al., 2011).

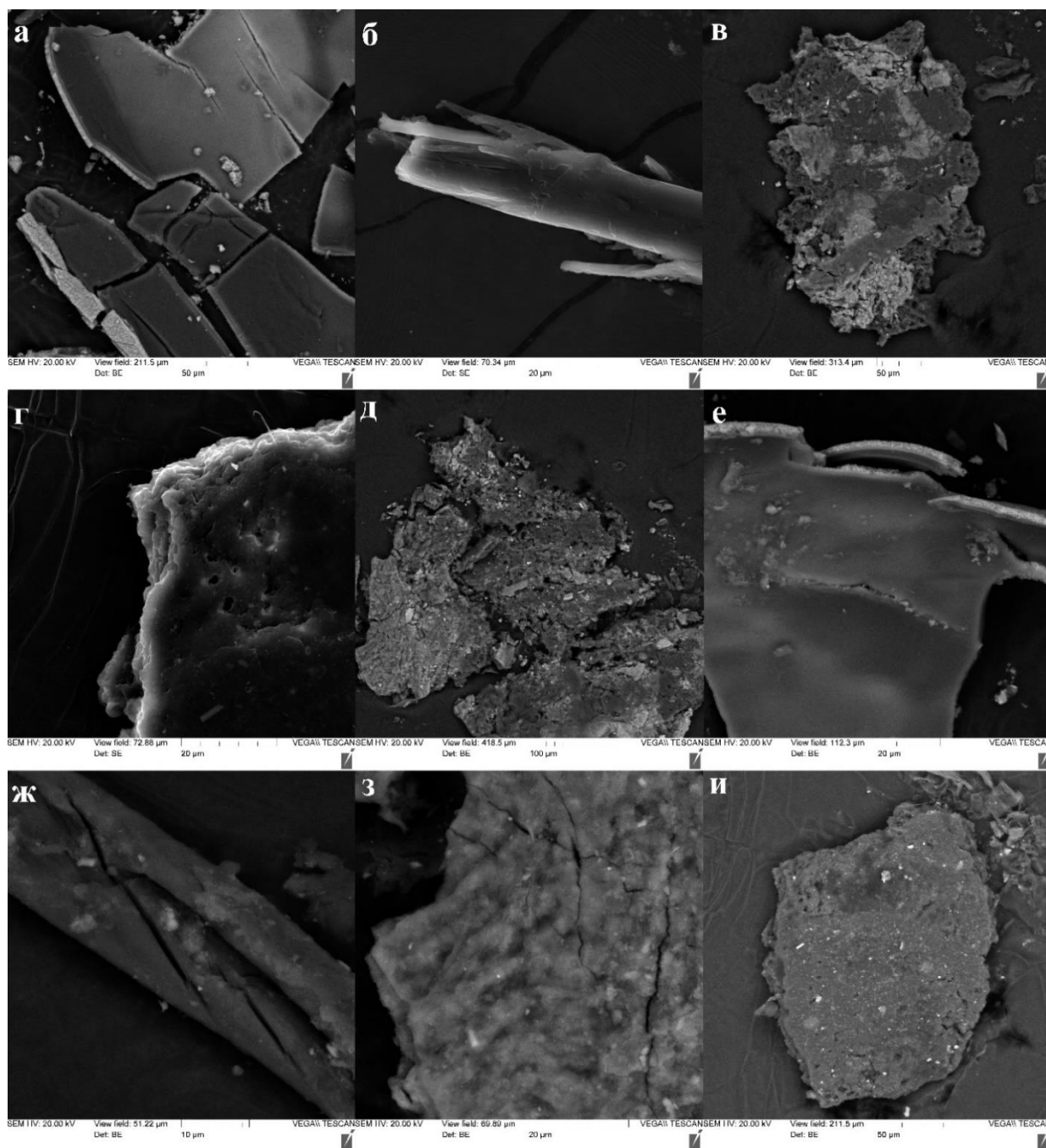


Рисунок 4.38 – Виды деградации частиц микропластика: а-б – растрескивание; в-е – расслаивание; ж-и – растрескивание, расслаивание (фото сделаны при помощи растрового электронного микроскопа VEGA II LMU производства фирмы Tescan).

4.4. Химический состав микропластика

В современной промышленности наблюдается возрастающий интерес к разработке и применению многокомпонентных полимерных систем. Основная цель применения таких полимерных систем заключается в достижении специфических, заранее заданных свойств материалов. Эти свойства достигаются за счет комбинации характеристик отдельных компонентов, что позволяет улучшить функциональные возможности конечного продукта. Важность этих систем обусловлена не только выбором и сочетанием полимерных материалов и добавок, но также и технологическим процессом их производства. Процесс производства играет важную роль, поскольку он определяет степень взаимодействия между компонентами и, следовательно, микроструктуру и окончательные свойства материала. Это взаимодействие и последующая структуризация материала важны для обеспечения требуемой производительности и долговечности готовых изделий.

Инфракрасная микроскопия представляет собой высокоэффективный инструментальный метод, позволяющий проводить детальное изучение химического состава таких многокомпонентных полимерных систем. ИК-Фурье включает в себя измерение интенсивности инфракрасного излучения в зависимости от длины волны света, поглощенного микропластиком, что позволяет получить характерный молекулярный отпечаток материала. Этот метод очень важен для определения типов полимеров в образцах окружающей среды и чувствителен к изменениям, вызванным воздействием окружающей среды, например, погодными условиями (De Frond, Rubinovitz, & Rochman, 2021). Такой метод может идентифицировать и количественно определять различные типы микропластика, включая сложные смеси в образцах окружающей среды. Особенно эффективно он распознает такие распространенные полимеры, как полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП) и поливинилхлорид (ПВХ), среди прочих (Fan, Huang, Lin, & Li, 2021).

В данном исследовании для определения типов полимеров в образцах микропластика были применены ИК-Фурье спектрометры моделей JASCO FT/IR-6800 и ФСМ 2202. Анализ проведён на выборке из подобных 80 частиц МП,

отобранных из различных сред и разнообразных по форме, цвету и размеру. Результаты показали, что свыше 90% образцов были идентифицированы как пластик. В исследовании первоначально изучались прозрачные волокна, которые представляли большинство в выборке, после чего анализ был расширен на другие типы частиц. В результате были идентифицированы следующие типы полимеров: полистирол, полиэтилен, полипропилен, акрил, полиамид, полиэтилентерефталат и др. (рис. 4.39; табл. 4.5). Для включения данных в исследование использовался критерий совпадения спектров с эталонными спектрами на уровне не менее 80%. Случаи, когда идентификация типа полимеров оказалась невозможной с помощью ИК-Фурье спектроскопии, были обусловлены малым размером частиц, их разрушением в процессе исследования или присутствием на их поверхности химических соединений, вероятно, оставшихся после взаимодействия с другими материалами.

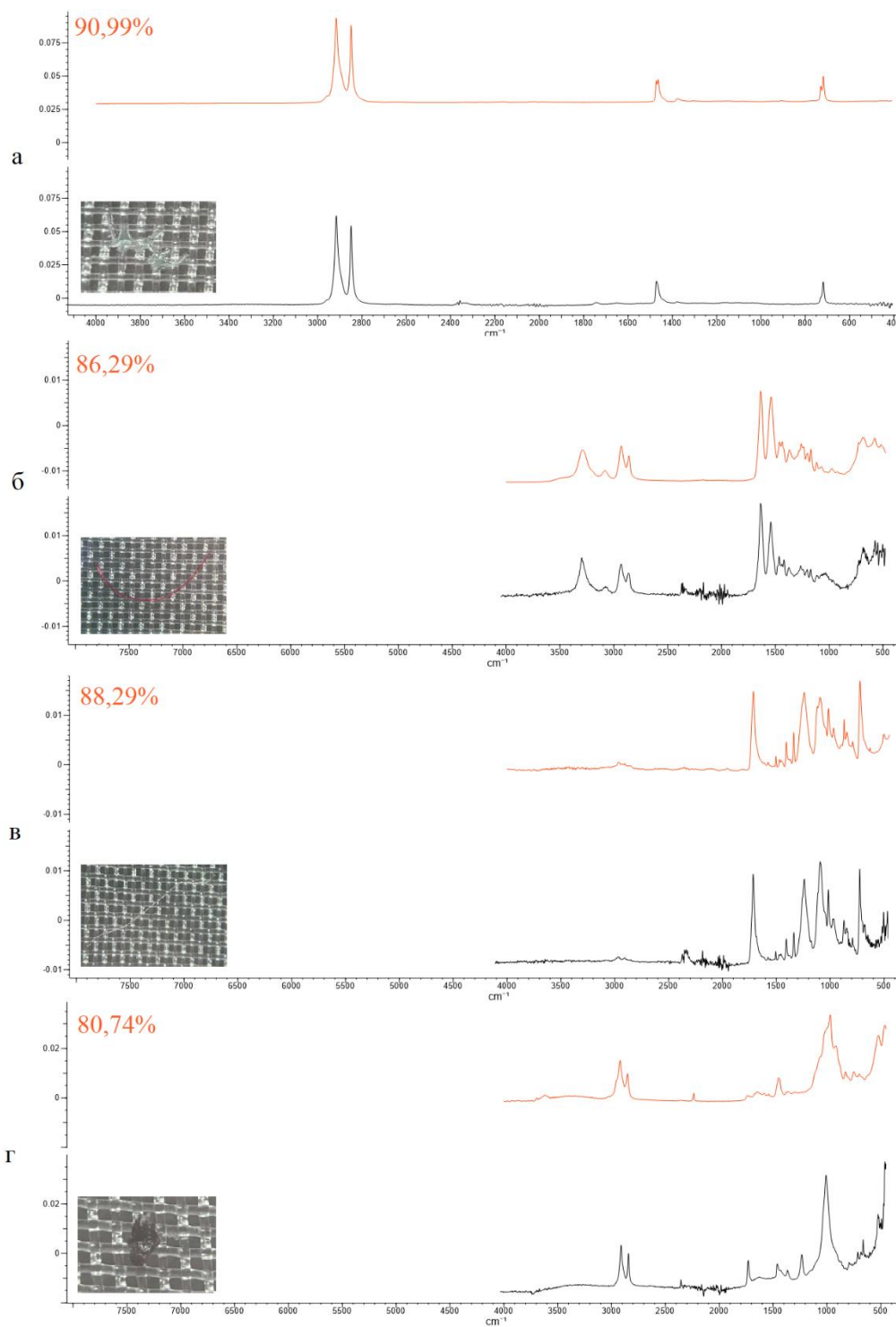
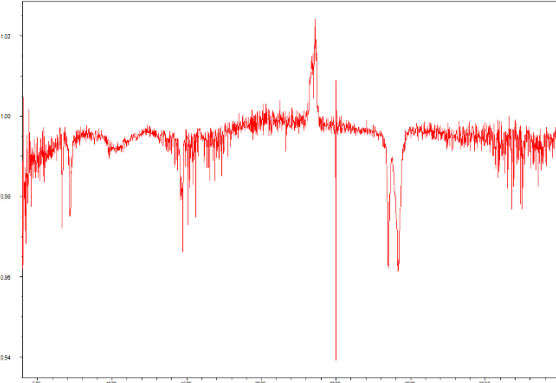
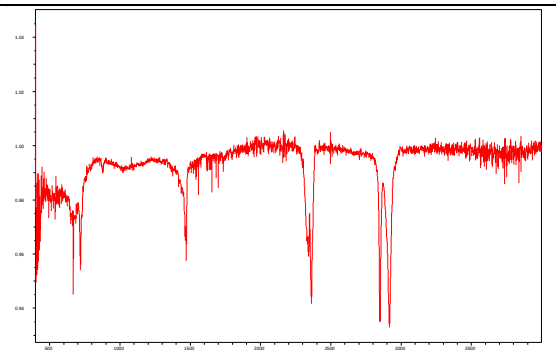
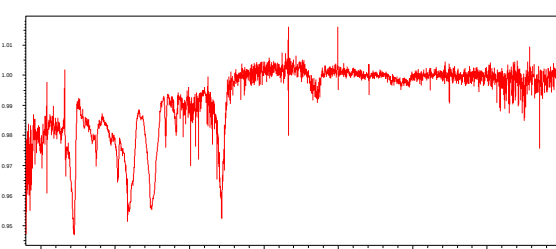
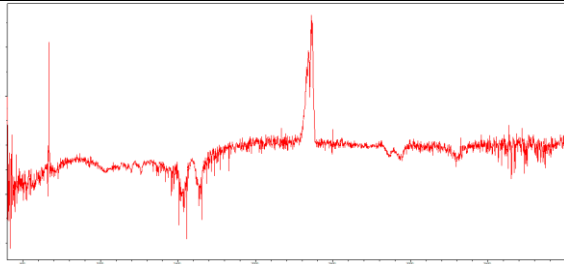
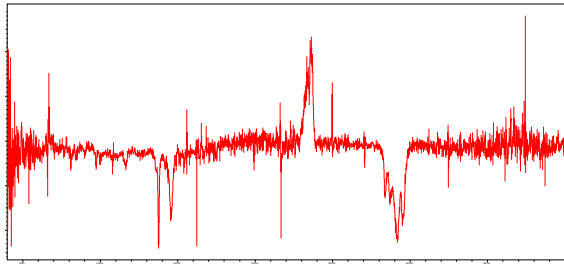


Рисунок 4.39 – Спектры некоторых типичных частиц МП, определенные с помощью ИК-Фурье спектрометра JASCO FT/IR-6800, и коэффициенты совпадения с библиотекой прибора: а – полиэтилен, б – полиамид, в – полиэстер, г – акрилонитрил

Таблица 4.5. – Спектры некоторых типичных частиц МП, определенные с помощью ИК-Фурье спектрометра ФСМ 2202

№	Измеренный ИК спектр	Линии поглощения образца	
		Частота (см ⁻¹)	близкие линии ПЭВД (см ⁻¹)
1	 80 % - ПЭВД	664,5	
		717,5	718
		978	
		1025	
		1457	
		1472	1472
		1506	
		1558	
		2849	2852
		2915	2917
2	 95% - ПЭНД	Частота (см ⁻¹)	близкие линии ПЭНД (см ⁻¹)
		668	
		719	
		877	
		1463	1464
		1472	1472
		2849	2850
		2917	2919
3	 95 % - ПЭТФ	Частота (см ⁻¹)	близкие линии ПЭТФ (см ⁻¹)
		723	728
		844	
		871	
		1016	1018
		1094	1100
		1243	1245
		1340	1339
		1411	1409
		1715	1721

4	 80% - ПА	Частота (см ⁻¹)	ПА (см ⁻¹)
		1030	
		1200	
		1261	1274
		1533	1541
		1640	1641
		2865	2860
		2933	2933
5	 98% - ПП	Частота (см ⁻¹)	близкие линии ПП (см ⁻¹)
		813	
		899	899
		973	973
		1165	1167
		1376	1377
		1458	1457
		2838	2840
		2875	2870
		2918	2921
		2953	2956

Разнообразие типов обнаруженных полимеров свидетельствует о множестве источников их происхождения. Исследования показали, что среди наиболее распространенных полимеров, составляющих эти частицы, присутствуют полиэтилен (включая полиэтилен высокой и низкой плотности), полипропилен и полиэтилентерефталат, что отражает их широкое распространение в потребительских товарах и упаковке. Большая часть обнаруженного микропластика относилась ко II и III классу опасности полимеров. Исследование химического состава этого МП демонстрирует, что среди наиболее значимых его источников можно выделить одежду, произведённую из нейлона, различные виды упаковочных материалов, включая пластиковые бутылки, пакеты, одноразовую посуду, а также рыболовные сети и строительные материалы (таб. 4.6).

Таблица 4.6. Применение некоторых полимеров, обнаруженных в Азовском море (Чубаренко и др., 2021; Lithner et al., 2011)

Полимер	Обозначение	Плотность, г/см ³	Класс опасности	Изделие и применение
---------	-------------	------------------------------	-----------------	----------------------

			полимеров (наивысший уровень)	
Полиэтилен низкой плотности	ПЭВД	0,91–0,93 0,89–0,93 0,92–0,94 0,89–0,94	II	пакеты, мешки, бутылки, сети, трубочки, упаков. материалы, контейнеры, подгузники, кабели, оплётки, и т. д.
Полиэтилен высокой плотности	ПЭНД	0,94 0,94–0,97 0,95–0,97 0,94–0,96	II	плёнки, пакеты, бутылки и пищевая упаковка, в т. ч. для косметики, бытовой химии, ламинат, детские товары, крышки и т. д.
Полиамид (нейлон)	ПА	1,02–1,05 1,07–1,08	III	сетки, рыболовные сети и снасти, тросы, верёвки, нити, непромокаемая одежда, обувь, краска и т. д.
Полипропилен	ПП	0,83–0,85	I	пленки, упаковка, тросы, нити, сети, ткани, автозапчасти, контейнеры для еды, посуда, медицинское оборудование, предметы гигиены и т. д.
Полиэтилентерефталат (термопластичный полиэстер)	ПЭТ, ПЭТФ	1,37 1,37–1,45 1,38–1,41 1,39 1,41 1,29–1,40	II	бутылки, пленка, упаковка, пакеты, наполнители для подушек, ткани, ремни, снаряжение, текстиль и т. д.
Полистирол	ПС	1,04–1,1 1,04–1,08 1,05–1,07 1,05 1,04–1,08	II	контейнеры для еды, одноразовая посуда, упаковка, отделочные строительные материалы, элементы бытовых приборов, детали в электронике и т. д.
Полиэстер	-	1,24–2,3 1,01–1,46 1,39–1,44	-	текстиль

4.5. Зонирование Азовского моря по степени загрязнения микропластиком

Основываясь на результатах проведенных исследований, было проведено зонирование акватории Азовского моря в зависимости от уровня загрязнения микропластиком. Зонирование акватории проводилось методом К-средних (QGIS). В нем учитывались концентрации МП в воде и донных отложениях, глубины моря, температура, соленость, тип осадка, биомасса бентоса, биоценозы бентоса. В результате было выделено 3 зоны с высокой, средней и низкой концентрацией МП в среде относительно друг друга (рис. 4.40; табл. 4.7).

Площадь первой зоны равна - 7633 км², что составляет 19% от общей площади моря. Данная зона совпадает с прибрежной частью, которая характеризуется областями высокой концентрации микропластика в таких районах как Таганрогский залив, прибрежная зона Ейской косы (г. Ейск), восточное побережье Азовского моря (зона влияния реки Кубань). В этой зоне отмечается средняя глубина 2,5 метра. Средняя температура в течение исследуемого периода составила 14 °С, а соленость – 6,5 ‰. Концентрации микропластика в воде варьировались от 1 до 9 шт./л., тогда как в донных отложениях наблюдались концентрации от 64 до 130 шт./кг. В Таганрогском заливе, являющемся одним из районов с высокой концентрацией микропластика, преобладают многощетинковые черви, играющие значительную роль в пищевой цепочке, являясь кормовой базой рыб.

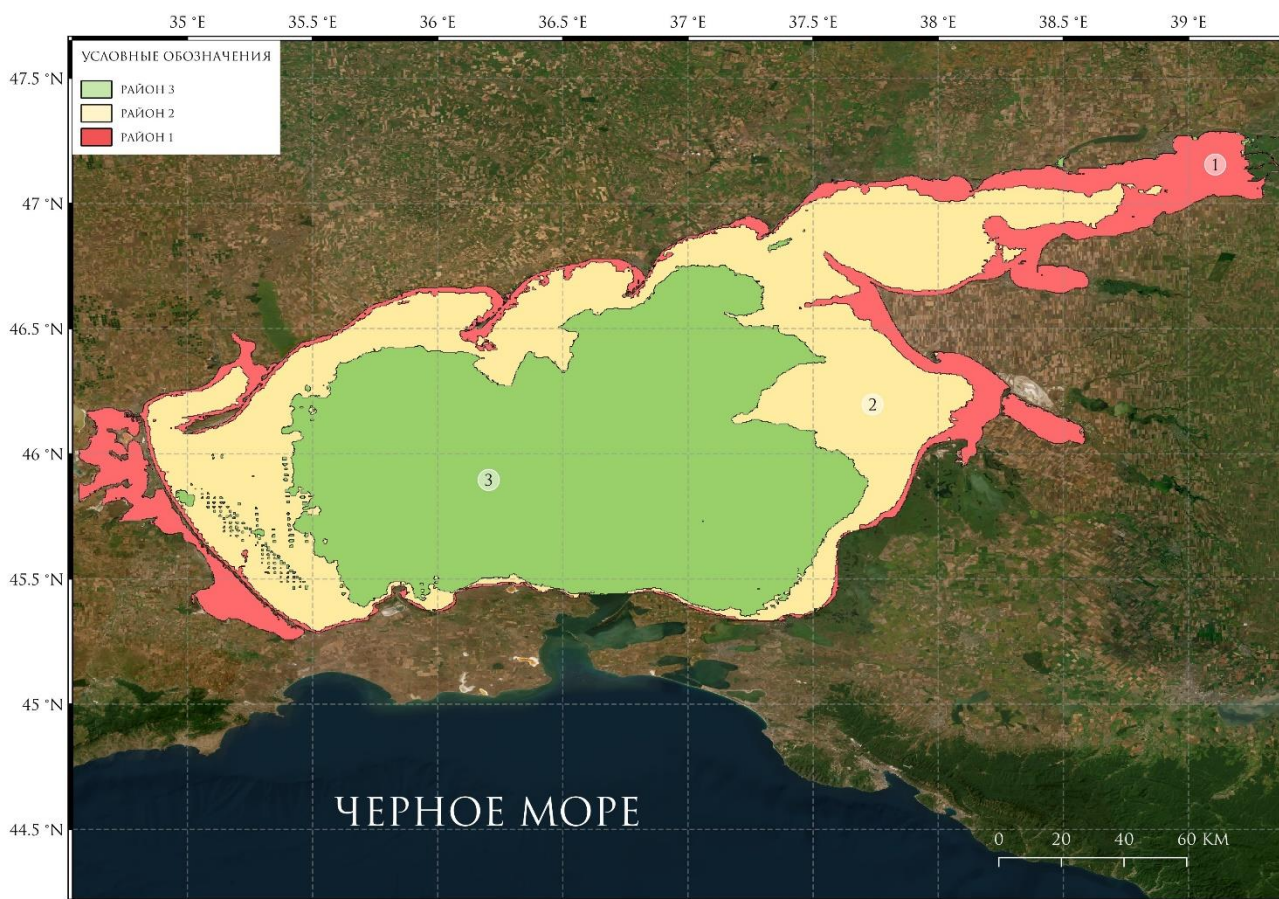


Рисунок 4.40 – Зонирование Азовского моря по степени загрязненности микропластиком: красный – высокое, желтый – среднее, зеленый – низкое

Площадь второй зоны равна - 14851 км², что занимает 36 % от площади моря. Согласно проведенному анализу, данная зона является областью средних концентраций МП. Максимальная глубина данной зоны составляет 10 м, средняя глубина равна 7 м. Температура воды в исследуемый период варьирует от 13 до 15°C. Среднее значение солености в данной зоне, так же равно 8 ‰. Концентрация МП на поверхности воды в зоне 2 варьируется от 1 до 7 шт./л., со средним значением 2 шт./л. В донных отложениях количество микропластика изменяется в пределах от 42 до 113 шт./кг и среднее значение равно 66 шт./кг. В данной зоне встречаются разнообразные типы донных осадков, включая средне-мелкозернистый песок с ракушей, алевроново-илистый песок, илистый алевроит, илы с примесью песчано-алевритовой фракции и глинистый ил. В зоне обитают различные виды бентосных организмов, включая Монодакту цветную, Анадарту,

Церастодерму, Абру, Митилястра, многощетинковых червей и морского желудка (табл. 4.7).

Третья зона, расположенная в центральной части исследуемого морского бассейна, и занимает площадь в 18729 км², что составляет приблизительно 45% от общей площади моря. Средние глубины – 11 метров. Средние значения температуры воды совпадают с зонами 1 и 2 и имеют значения 14 °С, средняя соленость вод – 11,5 ‰. Концентрации микропластика на поверхности воды варьируют от минимальных до максимальных значений в пределах от 0 до 6 шт./л. В то же время, в донных отложениях наблюдались концентрации от 27 до 86 шт./кг., со средним значением 56 шт./кг. Для данной зоны были идентифицированы различные типы донных осадков, такие как алевритово-илистый песок, илистый алеврит, илы с примесью песчано-алевритовой фракции и глинистый ил. Биоценозы бентоса включают разнообразные виды, такие как песчаная мия, многощетинковые черви, сердцевидка шаровидная, Нефтис хомбергии, Абра, Гидробия и Анадара.

Зона с максимальной концентрацией микропластика, выявленная в рамках исследования, совпадает с территорией высокой биологической продуктивности. Этот факт вызывает значительные опасения, поскольку микропластик, вовлеченный в трофические цепи, может вызвать негативные последствия для всей экосистемы в связи с вероятностью его аккумуляции в организмах различных трофических уровней, начиная от первичных консументов и заканчивая высшими хищниками.

Таблица 4.7. Зонирование Азовского моря по степени загрязненности микропластиком поверхностных вод и донных отложений (Экологический атлас Азовского моря, 2011; Экологический Атлас. Черное и Азовское моря, 2019; Фроленко и др., 2019)

№	Площадь (км ²)	Глубина (м) макс ср мин	Темпера- тура (°C) макс ср мин	Соленост ь (‰) макс ср мин	Концентр ация пластика в воде (шт./л)	Концентр ация пластика в донных (шт./кг)	Тип осадка	Биоценозы бентоса	Биомасс а бентоса (г/м ²)
1	7633	мин 0 м макс 5 м ср 2,5 м	макс 15 ср 14 мин 13	макс 12 ср 6,5 мин 1	макс 9 ср 2 мин 1	макс 130 ср 85 мин 64	Песок средне- мелкозернистый с ракушей; Песок алевроитово- илистый; Алеврит; Илистый алеврит; Илы с примесью песчано-алевритовой фракции.	(Ai) Морской желудь (Dp) Речная дрейссена (Mn) Полихеты рода Marenzelleria (As) Многощетинковые черви (Ma) Песчаная мия (A) Анадара (Cg) Церастодерма	мин 15 макс 1750 ср 319
2	14851	мин 5 м макс 10 м ср 7 м	макс 15 ср 14 мин 13	макс 11 ср 8 мин 5	макс 7 ср 2 мин 1	макс 113 ср 66 мин 42	Песок средне- мелкозернистый с ракушей; Песок алевроитово- илистый; Илистый алеврит; Илы с примесью песчано-алевритовой фракции. Глинистый ил	(Mc) Монодакна цветная (A) Анадара (Cg) Церастодерма (Nh) Нефтис хомбергии (As) Абра (Ml) Митилястр (As) Многощетинковые черви (Ai) Морской желудь (Cg) Сердцевидка шаровидная	мин 15 макс 1750 ср 413

3	18729	мин 8 м макс 13,5 м ср 11 м	макс 15 ср 14 мин 13	макс 12 ср 11,5 мин 11	макс 6 ср 2 мин 0	макс 86 ср 56 мин 27	Песок алевритово-илистый; Илистый алеврит; Илы с примесью песчано-алевритовой фракции; Глинистый ил	(Ma) - Песчаная мия (Ac) Многощетинковые черви (Cg) Сердцевидка шаровидная (Nh) Нефтис хомбергии (As) Абра (Ha) Гидробия (A) Анадара	мин 15 макс 1750 ср 491
---	-------	--------------------------------------	----------------------------	------------------------------	-------------------------	----------------------------	--	--	-------------------------------

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Загрязнение микропластиком широко распространено в морской среде по всему миру, накапливаясь в воде, донных осадках, пляжевых отложениях и морских организмах в различных экосистемах. Они присутствуют в разнообразных формах, включая волокна, фрагменты, пленки и т. д. В прибрежных районах часто наблюдается повышенная концентрация микропластика из-за прямого сброса различного вида отходов. А такие компоненты как реки, прибрежные почвы и атмосферные выпадения вносят значительный вклад в загрязнение моря МП, перенося эти загрязнители из наземной в морскую среду. Данная диссертационная работа посвящена изучению загрязнения микропластиком Азовского моря и факторов, его обуславливающих.

В **Заключении** автором сформированы следующие выводы:

1. Анализ изученных литературных источников по проблеме загрязнения МП Мирового океана и его морей в сравнении с полученными данными для Азовского моря показал относительные высокий уровень загрязнения его среды и биоты.
2. Результат проведенных лабораторных исследований свидетельствует о том, что пластиковый мусор присутствует в 100 % отобранных проб донных и пляжевых отложений, моллюсков, и в 98 % проб воды.
3. Концентрация частиц МП в образцах пляжевых отложений из различных районов варьирует от 12 до 112 шт./кг, средняя концентрация составляет 45,2 шт./кг, в донных осадках от 27 до 130 шт./кг при средних значениях 68 шт./кг, в воде Азовского моря – от 0 до 9 шт./л, при среднем значении 2,7 шт./л., в моллюсках Азовского моря – от 0 до 6 шт./особь, при среднем значении 2,6 шт./особь.
4. Анализ пространственного распределения частиц МП показал, что зонами повышенных концентраций МП являются: северная и восточная часть Таганрогского залива, Восточное Приазовье и Керченское предпроливье. В распределении МП по профилю пляжа для всех исследуемых районов четко прослеживается его накопление в тыльной части пляжа и в зоне заплеска. МП был

зафиксирован во всех типах донных осадков, однако самое высокое содержание было характерно для песков и алевритовых илов, залегающих в прибрежной зоне.

5. Исследование таких источников поступления МП в Азовское море, как аэрозольные выпадения, реки показал, что частицы МП присутствуют в 100 % исследуемых проб, и в 87 % образцов почв абразионных берегов Азовского моря. Среднее содержание частиц МП в атмосферных выпадениях над прибрежными урбате́рриториями, составляет 371,5 шт./м²/сут., при максимальных концентрациях в аэрозолях г. Таганрог (561 шт./м²/сут.), в устьевых областях рек, впадающих в Азовское море – 8,5 шт./л, с максимальным содержанием в р. Дон (14 шт./л) и р. Кубань (11 шт./л), в почвах прибрежной зоны – 7 шт./кг, при максимальных значениях в почвах дельты р. Дон (16 шт./кг).

6. Морфологические и морфометрические особенности обнаруженных частиц МП характеризуются преобладанием бесцветных, обесцвеченных волокон и пленок, а также фрагментов МП белых, желтоватых и черных цветов. Средний размер частиц МП составляет 0,7 и 0,6 мм – в пляжевых и донных отложениях соответственно, 1,1 мм – в поверхностном слое воды, в моллюсках – 0,8 мм, 1,3 мм – в аэрозолях, 1,1 мм – в реках, и 0,9 мм в почвах прибрежной зоны.

7. Результат анализа типичных образцов обнаруженного МП на растровом электронном микроскопе VEGA II LMU производства фирмы Tescan позволил выявить следующие виды деградации частиц: расслаивание, растрескивание, расщепление и др. Анализ литературных данных, показал, что к таким физическим изменениям частиц приводит различное время нахождения МП в морской среде, и, непосредственно, влияющие на него химико-биологические процессы разрушения, физическое воздействия волн и ветра и др.

8. Исследование обнаруженного МП методом инфракрасной спектроскопии на ИК-Фурье спектрометрах JASCO FT/IR-6800 и ФСМ 2202, и сравнения образцов с библиотекой спектров, позволило определить его состав. Так, наиболее встречаемым типом полимера являются: полистирол, полиэтилен (включая полиэтилен высокой и низкой плотности), полипропилен, акрил, полиамид, полиэтилентерефталат и др. Такой состав обнаруженного

микропластика позволяет сделать вывод о продуктах, из которых он был фрагментирован, а именно: одежда из полиэстера, акрила, упаковочный материал, пластиковые бутылки, пакеты, одноразовая посуда, рыболовные сети, строительные материалы и др.

9. Результат зонирования акватории Азовского моря в зависимости от уровня загрязнения микропластиком выявил 3 зоны с высокой, средней и низкой концентрацией МП в среде относительно друг друга. Площадь первой зоны составляет 19% от общей площади моря и совпадает с прибрежной частью. Средняя концентрация МП в воде первой зоны составляет 2 шт./л., в донных отложениях – 85 шт./кг. Площадь второй зоны равна 36 % от площади моря, со средним содержанием в ней микропластика 2 шт./л. – в воде, и 66 шт./кг. в донных осадках. Третья зона, расположена в центральной части Азовского моря, и занимает около 45% от его общей площади. Содержания микропластика в воде, в пределах этой зоны составляет 2 шт./л., в донных отложениях – 56 шт./кг.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Александрова З.В., Семенов А.Д., Баскакова Т.Е. Режим кислорода и содержание биогенных веществ Азовского моря в многолетнем аспекте // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна: Сб. научн. тр. (1996-1997 гг.). Ростов н/Д, 1998. С. 34-49.
2. Анциферова М.А., Глушко А.Е. 2021. Загрязнение микропластиком атмосферы г. Таганрог. Общество. 1(20): 65–69. 3)
3. Анциферова, М. А., Глушко, А. Е., Беспалова, Л. А., Клещенко, А. В., & Назаренко, А. В. (2025). Микропластик в воде и проблемы его определения (на примере водных объектов Юга европейской части России). Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология, (1), 115-124. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/1/115-124>.
4. Беспалова Л.А., Глушко А.Е. Микропластик в Азовском море: уровень накопления в аэрозолях, воде, донных и пляжевых отложениях // Материалы Международной научно-практической конференции: «Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана» (20-25 сентября 2021 года, г. Сочи).
5. Безуглова, О. С. Почвы Ростовской области / О. С. Безуглова, М. М. Хырхырова. — Ростов н/Д : ЮФУ, 2008. — 352 с.
6. Безуглова О.С., Приваленко В.В., Остробородько Н.П. Биогеохимическая характеристика почв побережья Таганрогского залива // Экосистемные исследования Азовского моря и побережья. Апатиты: Изд-во РАН, Кольский научный центр, 2002. С. 12–28.
7. Блиновская Я., Куликова О., Мазлова Е., Гаврило М. (2020) Микропластик в береговом грунте арктических и дальневосточных морей // Экология и промышленность России. Т. 24. № 4. С. 16–19. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-4-16–19.

8. Бронфман А.М., Хлебников В.С. Основы реконструкции Азовского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 271 с.
9. Вишу Шах. Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения // пер. с англ. под ред. А.Я. Малкина. изд-во: Научные основы и технологии; издание 3-е, 2009. С. 736.
10. Воловик СП. Продуктивность и проблемы управления экосистемой Азовского моря. Автореф. дис. д. б. н. Ростов-н/Д. 1985. 24 с.
11. Воробьев В.П. Бентос Азовского моря // Труды Азово-Черноморск. НИИ морск. рыбн. хоз-ва и океаногр., 1949, вып. 13. С.25.
12. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т.3. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 219с.
13. Гидрометеорологический справочник Азовского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 856с.
14. Глушко А. Е., Беспалова Л. А. Микропластик в пляжевых отложениях Азовского моря: морфологические и морфометрические особенности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 99–110. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-99-110.
15. Глушко А.Е., Беспалова Л.А., Шехурдин Г.Р., Петько А.А. Загрязнение пляжей и прибрежных вод Азовского моря микропластиком // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления – II»): Материалы II Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова (г. Ростов-на-Дону, 6-10 июля 2020 г.). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2020. С. 154-157.
16. Глушко А.Е. Исследование микропластика в пляжах Таганрогского залива: методы отбора и определения (на примере Павло-Очаковской косы) // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2020» [Электронный ресурс] / Московский

- государственный университет им. М.В. Ломоносова. // Отв.ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. – М.: МАКС Пресс, 2020.
17. Глушко А.Е., Беспалова Л.А., Беспалова Е.В. Анализ источников поступления микропластика в Азовское море // Успехи современного естествознания. – 2023. – № 4. – С. 38–42. DOI: 10.17513/use.38022
18. Глушко А.Е., Беспалова Л.А., Беспалова Е.В., Картамышева Т.Б. Загрязнение микропластиком донных отложений Азовского моря // Наука Юга России. 2021 Т. 17 № 2 С. 57–65. DOI: 10.7868/S25000640210206.
19. Громов В.В. Сравнительная экологическая характеристика флоры и растительности опресненных участков Азовского моря // Комплексный мониторинг среды и биоты Азовского бассейна. Кольский научный центр РАН, Апатиты, 2004, т. VI. С. 141-165.
20. Довгань Р.Н. О блоковом строении зоны согласия Приазовского массива с Причерноморской впадиной // Доклады АН СССР. 1967, №1. С.230-234.
21. Ефимова И.В., Чубаренко И.П. Фрагментация пластикового мусора в прибойной зоне моря: лабораторный эксперимент на примере пенополистирола. Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2018. Т. 18. № 1. С. 10–13. DOI: 10.18500/1819-7663-2018-18-1-10–13.
22. Есюкова Е.Е., Чубаренко И.П. (2019) Микропластик в водной толще, донных осадках и песках пляжей юго-восточной части Балтийского моря: концентрации, распределение частиц по размерам и формам // Региональная экология. № 2 (56). С. 16–29. DOI: 10.30694/1026-5600-2019-2-16–29.
23. Зенкевич В.П. Берега Черного и Азовского Морей. М.: география, 1958.
24. Зенкович В.П. Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 710 с.

- 25.Зобков М. Б., Есюкова Е. Е. Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов // Океанология, том 58, № 1, изд-во: Российская академия наук (Москва), 2018. с. 149–157
- 26.Иванова Л.В., Соколов К.М., Харитонов Г.Н. Тенденции загрязнения пластиком акваторий и побережья Барен-цева моря и сопредельных вод в условиях изменения климата // Арктика и Север. 2018. № 2. С. 121–145.
- 27.Ивлиева О.В. Особенности осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века: монография / О.В. Ивлиева. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. С. 235.
- 28.Книпович Н.М. Гидрологические исследования в Азовском море. – Тр. Азово-Черноморской экспедиции. Вып. 5, 1932.
- 29.Куропаткин А.П., Стрельченко О.В., Шишкин В.М. Современные особенности пространственно-временной структуры температуры воды Азовского моря осенью.//Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. Сборник научных трудов АзНИИРХ. Ростов-н/Д, 2002. С. 5-10.
- 30.Кукса В.И., Гаргопа Ю.М. Современная оценка гидрологических условий формирования биопродуктивности Азовского моря. Водные ресурсы. 2004. Т. 31,34. С. 489-497.
- 31.Мамыкина В.А., Хрусталева Ю.П. Береговая зона Азовского моря. Ростов-н/Д.: Изд-во Ростовского гос. ун-та, 1980. 173 с.
- 32.Матишов Г.Г. Геоморфологические особенности шельфа Азовского моря // Вестник ЮНЦ РАН, Т.2, №1, 2006. С. 44-48.
- 33.Матишов Г.Г. Сейсмопрофилирование и картирование новейших отложений дна Азовского моря // Вестник Южного научного центра. 2007. Т. 3. № 3. С. 32–40.

34. Матишов Д.Г., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А., Сорокина В.В. Современные скорости абразии состояние берегоукрепительных сооружений российского побережья Азовского моря. Труды ЮНЦ РАН. Т. 1 Геология. Ростов-на-Дону. 2006. С. 139-151.
35. Мирзоян З.А., Воловик С.П., Мартынюк М. Л. Развитие популяции в Азово-Черноморском бассейне. // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. М: Вопросы рыболовства, 2002. С.180-192.
36. Минкина Т. М., Федоров Ю. А., Невидомская Д. Г. [и др.]. Тяжелые металлы в почвах и растениях устья реки Дон и побережья Таганрогского залива // Почвоведение. – 2017. – № 9. – С. 1074-1089. – DOI 10.7868/S0032180X17070061. – EDN ZFUNOH.
37. Мордухай-Болтовской Ф.Д. Общая характеристика фауны Черного и Азовского морей // Определитель фауны Черного и Азовского морей. Киев: Наукова Думка, 1972. Т.3. С. 316-324.
38. Мысливец В.И. Морфоструктурная основа экосистемы Азовского моря. // Комплексный мониторинг среды и биоты Азовского бассейна. Кольский научный центр РАН, Апатиты, 2004. Т. VI. С. 28-43.
39. Набоженко М.В., Шохин И.В., Булышева Н.И. Зообентос // Вселенцы в биоразнообразии и продуктивности Азовского и Чёрного морей / под общ. ред. Г.Г. Матишова и А.Р. Болтачева. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2010. С. 17–27.
40. Пицык Г.К., Новожилова А.Н. О динамике зоопланктона Азовского моря. Труды Азово-Черноморского НИИ рыбн. хоз-ва и океанографии, 1955. Вып. 16. С. 281-298.
41. Пицык Г.К. Фитопланктон Азовского моря. Труды Азово-Черноморского НИИ рыбн. хоз-ва и океанографии, 1951. Вып. 15. С. 313-380.
42. Савельева К.П. Донные отложения северной части Азовского моря // Тр. ИО АН СССР. Т. 58. 1964. С. 166-196. 206.

43. 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. doi:10.22449/2413-5577-2018-1-64-73
44. Сибирцова Е.Н., Силаков М.И., Темных А.В., Завьялов А.В. Накопление микропластикового загрязнения в пляжевых отложениях юго-западного побережья Крыма. Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2022;(2):37-47.
45. Спичак М.К. Термический и ветровой режимы Азовского моря // Сб. аннотаций работ АзНИИРХ, выполненных по плану исследований 1962г. Ростов-н/Д, 1964. С. 34-35. 161. Справка о гидрометеоусловиях Азовского моря. Севастополь, 1977. 387 с. 32.
46. Федоров Ю. А., Хансиварова Н. М., Кизицкий Р. М. Гранулометрический состав как возможный фактор, влияющий на распределение свинца и ртути в донных отложениях (на примере Таганрогского залива Азовского моря) // Тр. III Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием. Спб., 1998. С. 32-33.
47. Фроленко Л. Н. Зообентос Азовского моря в условиях антропогенных воздействий. Автореферат. Краснодар, 2000. 24 с.
48. Фроленко Л.Н. Видовой состав зообентоса Азовского моря и некоторые биолого-экологические особенности доминирующих видов. Известия вузов. Северо-Кавказ. Естественные науки, 2001. №4. С. 127-133.
49. Фроленко, Л. Н., Живоглядова Л. А., Ковалев Е. А. Состояние кормовой базы рыб-бентофагов Азовского моря // Вопросы рыболовства. – 2019. – Т. 20, № 1. – С. 49-58. – EDN ZDEQPZ.
50. Хрусталева Ю. П., Ивлиева О. В. Антропогенный материал в донных отложениях Азовского моря. // Проблемы антропогенной морской седиментологии (на примере Азовского моря). Ростов н/Д.: Изд-во «Гефест», 1999. С.144-173.

- 51.Хрусталеv Ю.П. , Щербаков Ф.А. Позднечетвертичные отложения Азовского моря и условия их накопления. Ростов н/Д.: Изд. Ростов. ун-та, 1974. 152 с. 202.
- 52.Хрусталеv, Ю. П. Природные условия и естественные ресурсы Ростовской области / Ю. П. Хрусталеv, Е. С. Андреева, В. Т. Богучарсков [и др.] / под ред. Ю. А. Жданова. - Батайск : Батайское книжное изд-во, 2002. - 430 с.
- 53.Хитров, Н. Б. Современные тенденции развития почв степной зоны. Современные естественные и антропогенные процессы в почвах и геосистемах / Н. Б. Хитров. - М. : Почвенный институт им. В. В. Докучаева, 2006. - С. 114–133.
- 54.Хитров Н.Б., Власенко В.П., Рухович Д.И., Брызжев А.В., Калинина Н.В., Роговнева Л.В. География вертисолей и вертикальных почв Кубано-Приазовской низменности // Почвоведение. – 2015. – № 7. – С. 771. – DOI 10.7868/S0032180X15070047. – EDN TXUIJF.
- 55.Чубаренко И.П., Исаченко И.А., Есюкова Е.Е. (2019) Исследование роли берегов, покрытых грубым осадочным материалом, в механической фрагментации морского пластика // Процессы в геосредах. № 4 (22). С. 534–539.
- 56.Чубаренко, И.П. Микропластик в морской среде : монография / И.П. Чубаренко, Е.Е. Есюкова, Л.И. Хатмуллина, О.И. Лобчук, И.А. Исаченко, Т.В. Буканова. М.: Научный мир, 2021. – 520 с.
- 57.Шнюков Е. Ф., Орловский Г. Н., Усенко В.П., Григорьев А.В. Гордиевич В.А. Геология Азовского моря. Киев: Наук. Думка, 1974. 239 с.
- 58.Щербаков Ф.А. Современное осадкообразование на северном побережье Азовского моря// Исследования гидродинамических и морфодинамических процессов береговой зоны моря. М., 1966. С. 207-229.

59. Экологический атлас Азовского моря / Гл. ред. акад. Г.Г. Матишов; отв. ред. Н.И. Голубева, В.В. Сорокина. – Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. – 328 с. – ISBN 978-5-4358-0020-3
60. Экологический Атлас. Черное и Азовское моря / ПАО «НК «Роснефть», ООО «Арктический Научный Центр», Фонд «НИР». — Москва : Фонд «НИР», 2019. — 464 с. : ил. — (Экологические атласы морей России).
61. Экосистема Нижнего Дона: многолетние изменения качества воды / Под редакцией А.М. Никанорова, Т.А. Хоружей, Л.И. Мининой // Серия «Качество вод». СПб.: Гидрометеиздат, 2006. 307 с particles in marine environment // Mar. Pollut. Bull. 2016. V. 108. P. 105–112.
62. Akdogan, Z., & Guven, B. (2019). Microplastics in the environment: A critical review of current understanding and identification of future research needs.. Environmental pollution, 254 Pt A, 113011 . .
63. Alimba, C., & Faggio, C. (2019). Microplastics in the marine environment: Current trends in environmental pollution and mechanisms of toxicological profile. Environmental Toxicology and Pharmacology, 68, 61-74.
64. Alomar C., Estarellas F., Deudero S. (2016) Microplastics in the Mediterranean Sea: deposition in coastal shallow sediments, spatial variation and preferential grain size. Marine Environmental Research 115, 1–10. DOI: 10.1016/j.marenvres.2016.01.005.
65. Andrady A.L. (2015) Persistence of Plastic Litter in the Ocean. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (Eds.). Marine Anthropogenic Litter. Springer, Berlin. P. 57–72. DOI: 10.1007/978-3-319-16510-3_3.
66. Andrady A.L. (2017) The plastic in microplastics: A review. Marine Pollution Bulletin 119 (1), 12–22. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.01.082.
67. Andrady A.L. (2011) Microplastics in the marine environment. Marine Pollution Bulletin 62, 1596–1605. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030.
68. Aniansson B., Bell G., Fátima B., Dagevos J., Elliot B., Fleet D.M., Guéna A., Hägerhäll B., Jørgensen H.H., Kerckhofs F., Mouriño F.L., Nickerson R., Nilsson P., Olin R., Span I., Sverrisdóttir S., Wenneker B. (2007) OSPAR

Pilot Project on Monitoring Marine Beach Litter: Monitoring of marine litter in the OSPAR region Carson HS, Colbert SL.

69. Araujo, C., Nolasco, M., Ribeiro, A., & Ribeiro-Claro, P. (2018). Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects.. *Water research*, 142, 426-440 . .
70. Ashton K., Holmes L., Turner A. Association of metals with plastic production pellets in the marine environment // *Mar. Pollut. Bull.* 2010. V. 60. P. 2050–2055.
71. Auta, H., Emenike, C., & Fauziah, S. (2017). Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions.. *Environment international*, 102, 165-176 . <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.013>.
72. Bagaev A., Khatmullina L., Chubarenko I. (2018) Anthropogenic microlitter in the Baltic Sea water column. *Marine Pollution Bulletin* 129 (2), 918–923. DOI: 10.1016/j.marpolbul. 2017.10.049.
73. Bagaev A., Mizyuk A., Khatmullina L., Isachenko I., Chubarenko I. 2017. Anthropogenic fibres in the Baltic Sea water column: field data, laboratory and numerical testing of their motion. *Science of the Total Environment*. 599–600: 560–571. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.185
74. Bagaev, Andrei & Chubarenko, Irina. (2017). microplastics, numerical modelling, the Baltic Sea, anthropogenic pollution. 1-1. 10.31519/conferencearticle_5b1b93d66c1b80.07366457.
75. Bagheri, T., Gholizadeh, M., Abarghouei, S., Zakeri, M., Hedayati, A., Rabaniha, M., Aghaeimoghadam, A., & Hafezieh, M. (2020). Microplastics distribution, abundance and composition in sediment, fishes and benthic organisms of the Gorgan Bay, Caspian sea.. *Chemosphere*, 257, 127201 . .
76. Barnes D.K.A., Galgani F., Thompson R.C., Barlaz M. (2009) Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364, 1985–1998. DOI: 10.1098/rstb.2008.0205

77. Barrett, Justine & Chase, Zanna & Zhang, Jing & Holl, Mark & Willis, Kathryn & Williams, Alan & Hardesty, Britta & Wilcox, Chris. (2020). Microplastic Pollution in Deep-Sea Sediments From the Great Australian Bight. *Frontiers in Marine Science*. 7. 10.3389/fmars.2020.576170.
78. Barrows A.P.W., Cathey S.E., Petersen C.W. (2018) Marine environment microfiber contamination: global patterns and the diversity of microparticle origins. *Environmental Pollution* 237, 275–284. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.02.062.
79. Bergmann M., Gutow L., Klages M. (Eds.) (2015) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer Open. Springer, Cham Heidelberg New York Dordrecht, London. ISBN 978-3-319-16509-7. DOI: 10.1007/978-3-319-16510-3.
80. Bergmann M., Wirzberger V., Krumpen T., Lorenz C., Primpke S., Tekman M.B., Gerdts G. (2017) High quantities of microplastic in Arctic Deep-Sea sediments from the HAUSGARTEN observatory. *Environmental Science and Technology* 51, 11000–11010. DOI: 10.1021/acs.est.7b03331.
81. Besley, Aiken & Vijver, Martina & Behrens, Paul & Bosker, Thijs. (2016). A standardized method for sampling and extraction methods for quantifying microplastics in beach sand. *Marine Pollution Bulletin*. 114. 10.1016/j.marpolbul.2016.08.055.
82. Bollmann, Ulla & Simon, Marta & Vollertsen, Jes & Bester, Kai. (2019). Assessment of input of organic micropollutants and microplastics into the Baltic Sea by urban waters. *Marine pollution bulletin*. 148. 10.1016/j.marpolbul.2019.07.014.
83. Booth A. M., Kubowicz S., Beegle-Krause C.J., Skancke J., Nordam T., Landsem E., Throne-Holst M., Jahren S. (2017) Microplastic in global and Norwegian marine environments: Distributions, degradation mechanisms and transport (SINTEF project No 302003604 No. M-918|2017-Unrestricted Report). SINTEF. 149 p.

84. Boucher J., Friot D. (2017) Primary microplastics in the oceans. IUCN. Global Marine and Polar Programme. 43 p. ISBN: 978-2-8317-1827-9. DOI: 10.2305/IUCN.CH.2017.01.
85. Browne M.A., Galloway T.S., Thompson R.C. (2010) Spatial Patterns of Plastic Debris along Estuarine Shorelines. *Environmental Science and Technology* 44, 3404–3409. DOI: 10.1021/es903784e.
86. Browne, M.A., Crump, P., Niven, S.J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., Thompson, R., 2011. Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environ. Sci. Technol.* 45, 9175–9179. <http://dx.doi.org/10.1021/es201811s>.
87. Burns E., Boxall A. (2018) Microplastics in the aquatic environment: Evidence for or against adverse impacts and major knowledge gaps. *Environmental Toxicol Chemistry* 37, 2776–2796. DOI: 10.1002/etc.4268.
88. Büks F, Kaupenjohann M (2020) Global concentrations of microplastics in soils—A review. *Soil* 6:649–662. <https://doi.org/10.5194/soil-6-649-2020>.
89. Carpenter E.J., Anderson S.J., Harvey G.R., Miklas H.P., Peck B.B. (1972) Polystyrene Spherules in Coastal Waters. *Science* 178 (4062), 749–750.
90. Carpenter E.J., Smith K.L. (1972) Plastics on the Sargasso Sea Surface. *Science* 175, 1240–1241. DOI: 10.1126/science.175.4027.1240.
91. Cheang, Chi Chiu & Ma, Yue & Fok, Lincoln. (2018). Occurrence and Composition of Microplastics in the Seabed Sediments of the Coral Communities in Proximity of a Metropolitan Area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 15. 2270. 10.3390/ijerph15102270.
92. Chen, Guanglong & Fu, Zhilu & Yang, Huirong & Wang, Jun. (2020). An overview of analytical methods for detecting microplastics in the atmosphere. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 130. 115981. 10.1016/j.trac.2020.115981.
93. Chia, R.W., Lee, JY., Cha, J. et al. Methods of soil sampling for microplastic analysis: a review. *Environ Chem Lett* 22, 227–238 (2023).

94. Chubarenko I., Bagaev A., Zobkov M., Esiukova E. (2016) On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment. *Marine Pollution Bulletin* 108, 105–112. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.04.048.
95. Chubarenko I.P., Esiukova E.E., Bagaev A.V., Bagaeva M.A., Grave A.N. (2018) Three-dimensional distribution of anthropogenic microparticles in the body of sandy beaches. *Science of the Total environment* 628–629, 1340–1351. DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2018.02.167.
96. Chubarenko I., Efimova I., Bagaeva M., Bagaev A., Isachenko I. (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 DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110726.
97. Claessens M., Meester S.D., Landuyt L.V., Clerck K.D., Janssen C.R. (2011) Occurrence and distribution of microplastics in marine sediments along the Belgian coast. *Marine Pollution Bulletin* 62, 2199–2204. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2011.06.030
98. Connors K.A., Dyer S.D., Belanger S.E. (2017) Advancing the quality of environmental microplastic research. *Advancing the quality of environmental microplastic research. Environmental Toxicol Chemistry* 36, 1697–1703. DOI: 10.1002/etc.3829.
99. Cole M., Webb H., Lindeque P.K. et al. Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms // *Sci. Rep.* 2014. V. 4. № 4528. DOI: 10.1038/srep04528.
100. Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: a review.. *Marine pollution bulletin*, 62 12, 2588-97 . .
101. Collignon A., Hecq J.-H., Glagani F., Voisin P., Collard F., Goffart A. (2012) Neustonic microplastic and zooplankton in the North Western Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin* 64, 861–864.

102. Constant M, Kerhervé P, Mino-Vercellio-Verollet M, Dumontier M, Sánchez Vidal A, Canals M, Heussner S. Beached microplastics in the Northwestern Mediterranean Sea. *Mar Pollut Bull.* 2019 May;142:263-273. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.03.032. Epub 2019 Apr 1. PMID: 31232303.
103. Cooper D.A., Corcoran P.L. (2010) Effects of mechanical and chemical processes on the degradation of plastic beach debris on the island of Kauai, Hawaii. *Marine Pollution Bulletin* 60, 650–654.
104. Courtenne-Jones W., Quinn B., Gary S.F., Mogg A.O.M., Narayanaswamy B.E. (2017) Microplastic pollution identified in deep-sea water and ingested by benthic invertebrates in the Rockall Trough, North Atlantic Ocean. *Environmental Pollution* 231, 271–280. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.08.026.
105. Cózar, Andrés & Echevarría, Fidel & González-Gordillo, Juan & Irigoien, Xabier & Úbeda, Bárbara & Hernandez-Leon, Santiago & Palma, Alvaro & Navarro, Sandra & Lomas, Juan & Ruiz, Andrea & Fernández-de-Puelles, María & Duarte, Carlos. (2014). Plastic debris in the open ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 111. 10.1073/pnas.1314705111.
106. Crawford C.B., Quinn B. (2017) *Microplastic Pollutants*. Elsevier. 336 p.
107. Desforges J.-P.W., Galbraith M., Dangerfield N., Ross P.S. (2014) Widespread distribution of microplastics in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean. *Marine Pollution Bulletin* 79, 94–99. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.12.035.
108. De Frond, H., Rubinovitz, R. and Rochman, C.M., 2021. μ ATR-FTIR Spectral Libraries of Plastic Particles (FLOPP and FLOPP-e) for the Analysis of Microplastics. *Analytical Chemistry*, 93(48), pp.15878-15885.
109. Doyen, P., Hermabessiere, L., Dehaut, A. et al. Occurrence and identification of microplastics in beach sediments from the Hauts-de-France region. *Environ Sci Pollut Res* 26, 28010–28021 (2019).

110. Doyle M.J., Watson W., Bowlin N.M., Sheavly S.B. (2011) Plastic particles in coastal pelagic ecosystems of the Northeast Pacific ocean. *Marine Environmental Research* 71, 41–52.
111. Dris R., Gasperi J., Saad M., Mirande C.& Tassin B. 2016, ‘Synthetic fibres in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment?’, *Marine pollution bulletin* 104:290-3.
112. Eerkes-Medrano, D., Thompson, R., & Aldridge, D. (2015). Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs.. *Water research*, 75, 63-82 . <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.012>.
113. Efimova I., Bagaeva M., Bagaev A., Kileso A., Chubarenko I.P. (2018) Secondary Microplastics Generation in the Sea Swash Zone With Coarse Bottom Sediments: Laboratory Experiments. *Frontiers in Marine Science* 5, 313. DOI: 10.3389/fmars.2018.00313.
114. Egger, M., Sulu-Gambari, F., and Lebreton, L.: First evidence of plastic fallout from the Great Pacific Garbage Patch, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-2387, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-2387>, 2020
115. Egger, M., Sulu-Gambari, F., & Lebreton, L. (2020). First evidence of plastic fallout from the North Pacific Garbage Patch. *Scientific Reports*, 10.
116. Elizalde-Velázquez, Gustavo & Gómez-Oliván, Leobardo. (2021). Microplastics in aquatic environments: A review on occurrence, distribution, toxic effects, and implications for human health. *Science of The Total Environment*. 780. 146551. [10.1016/j.scitotenv.2021.146551](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146551).
117. Eo S., Hong S.H., Song Y.K., Lee J., Lee J., Shim W.J. (2018) Abundance, composition, and distribution of microplastics larger than 20 μm in sand beaches of South Korea. *Environmental Pollution* 238, 894–902. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.03.096.
118. Erik van Sebille; The oceans’ accumulating plastic garbage. *Physics Today* 1 February 2015; 68 (2): 60–61.

119. Eriksen M., Maximenko N., Thiel M. et al. Plastic pollution in the South Pacific subtropical gyre // *Mar. Pollut. Bull.* 2013. V. 68(1–2). P. 71–76.
120. Eriksen M., Lebreton L.C.M., Carson H.S., Thiel M., Moore C.J., Borrorro J.C., Galgani F.G., Ryan P.G., Reisser J.W. (2014) Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PloS one* 9 (12), e111913. DOI: 10.1371/journal.pone.0111913.
121. Esiukova E. (2017) Plastic pollution on the Baltic beaches of Kaliningrad region, Russia. *Marine Pollution Bulletin* 114 (2), 1072–1080. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.10.001.
122. Esiukova E., Chubarenko B., Simon F.-G. (2018) Debris of geosynthetic materials on the shore of South-Eastern Baltic (Kaliningrad Oblast, Russian Federation). 2018 IEEE/OES. Baltic International Symposium (BALTIC). P. 1–6. DOI: 10.1109/BALTIC.2018.8634842.
123. Fan, Chihhao & Huang, Ya-Zhen & Lin, Jhen-Nan & Li, Junwei. (2021). Microplastic constituent identification from admixtures by Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy: The use of polyethylene terephthalate (PET), polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyvinyl chloride (PVC) and nylon (NY) as the model constituents. *Environmental Technology & Innovation*. 23. 101798. 10.1016/j.eti.2021.101798.
124. Fdez-Sevilla, Diego. (2014). Could plastic debris, coarse, fine and molecules (polymers), affect ocean's function as climate regulator, CO2 sink, albedo, evaporation...? (by Diego Fdez-Sevilla). 10.13140/RG.2.1.1469.6407.
125. Fendall I.S., Sewell M.A. (2009) Contributing to marine pollution by washing your face: microplastics in facial cleansers. *Marine Pollution Bulletin* 58, 1223–1228.
126. Fisner, Mara & Majer, Alessandra & Balthazar-Silva, Danilo & Gorman, Daniel & Turra, Alexander. (2017). Quantifying microplastic

- pollution on sandy beaches: the conundrum of large sample variability and spatial heterogeneity. *Environmental Science and Pollution Research*. 24. 10.1007/s11356-017-8883-y.
127. Frias J., Pagter E., Nash R., O'Connor I., Carretero O., Filgueiras A., Viñas L., Gago J., Antunes J., Bessa F., Sobral P., Goruppi A., Tirelli V., Pedrotti M.L., Suaria G., Aliani S., Lopes C., Raimundo J., Caetano M., Palazzo L., Lucia G.A.d., Camedda A., Muniategui S., Grueiro G., Fernandez V., Andrade J., Dris R., Laforsch C., Scholz-Böttcher B.M., Gerdt G. (2018) Standardised protocol for monitoring microplastics in sediments. JPI-Oceans BASEMAN project. DOI: 10.13140/RG.2.2.36256.89601/1.
 128. GESAMP (2015) Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: A global assessment. Kershaw PJ, ed. Reports and Studies 90. International Maritime Organization, London, UK.
 129. GEZAMP. Opportunistic settlers and the problem of the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* invasion in the Black Sea. 1997. Gesamp Rep.Sbud. Vol.58. 84 p.
 130. Georgieva, Stanislava & Peteva, Zlatina & Stancheva, Mona. (2023). Evaluation of abundance of microplastics in the Bulgarian coastal waters. *BIORISK ? Biodiversity and Ecosystem Risk Assessment*. 20. 59-69. 10.3897/biorisk.20.97555.
 131. Gewert, B., Plassmann, M. M., & MacLeod, M. (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 17(9), 1513–1521.
 132. Ghayebzadeh, M., Aslani, H., Taghipour, H., & Mousavi, S. (2020). Contamination of the Caspian Sea Southern coast sediments with microplastics: A marine environmental problem. *Marine pollution bulletin*, 160, 111620 . doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111620. Epub 2020 Oct 14. PMID: 33181919.

133. Gilfillan L.R., Ohman M.D., Doyle M.J., Watson W. (2009) Occurrence of plastic micro-debris in the Southern California Current System. *CalCOFI Rep.* 50, 123–133.
134. Graca, B., Szewc, K., Zakrzewska, D. et al. (2017). Sources and fate of microplastics in marine and beach sediments of the Southern Baltic Sea—a preliminary study. *Environ Sci Pollut Res* 24, 7650–7661.
135. Gui, Xiangyang & Ren, Zhefan & Xu, Xiaoyun & Chen, Xiang & Chen, Ming & Wei, Yaqiang & Zhao, Ling & Qiu, Hao & Gao, Bin & Cao, Xinde. (2021). Dispersion and Transport of Microplastics in Three Water-saturated Coastal Soils. *Journal of Hazardous Materials*. 424. 127614. 10.1016/j.jhazmat.2021.127614.
136. Hanvey J., Lewis P., Lavers J., Crosbie N., Pozo K., Clarke B. (2017) A review of analytical techniques for quantifying microplastics in sediments. *Analytical Methods* 9 (9), 1369. DOI: 10.1039/c6ay02707e .
137. He, Defu & Luo, Yongming & Lu, Shibo & Liu, Mengting & Song, Yang & Lei, Lili. (2018). Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 109. 10.1016/j.trac.2018.10.006.
138. Hidalgo-Ruz, Valeria & Gutow, Lars & Thompson, Richard & Thiel, Martin. (2012). Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environmental science & technology*. 46. 3060-75. 10.1021/es2031505.
139. Holmes, L. A., Turner, A., & Thompson, R. C. (2012). Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment. *Environmental Pollution*, 160, 42-48.
140. Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., & Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of the Total Environment*, 586, 127–141.

141. Ivar do Sul J.A., Costa M.F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment // *Environmental Pollution*. 2014. V. 185. P. 352–364.
142. Ivar do Sul J.A., Spengler A., Costa M.F. (2009) Here, there and everywhere. Small plastic fragments and pellets on beaches of Fernando de Noronha (Equatorial Western Atlantic). *Marine Pollution Bulletin* 58, 1236–1238.
143. Jambeck J.R., Geyer R., Wilcox C. et al. Plastic waste inputs from land into the ocean // *Science*. 2015. V. 347 (6223). P. 768–771. DOI: 10.1126/science.1260352.
144. Kalogerakis, Nicolas & Karkanorachaki, Katerina & Kalogerakis, Gina & Triantafyllidi, Elisavet & Gotsis, A.D. & Partsinevelos, Panagiotis & Fava, Fabio. (2017). Microplastics Generation: Onset of Fragmentation of Polyethylene Films in Marine Environment Mesocosms. *Frontiers in Marine Science*. 4. 10.3389/fmars.2017.00084.
145. Kanhai, La Daana & Gårdfeldt, Katarina & Lyashevskaya, Olga & Hassellöv, Martin & Thompson, Richard & O'Connor, Ian. (2018). Microplastics in sub-surface waters of the Arctic Central Basin. *Marine Pollution Bulletin*. 130. 10.1016/j.marpolbul.2018.03.011.
146. Kanhai L.D.K., Johansson C., Frias J.P.G.L., Gardfeldt K., Thompson R.C., O'Connor I. (2019) Deep sea sediments of the Arctic Central Basin: a potential sink for microplastics. *Deep- Sea Research Part I*. 145. 137–142. DOI: 10.1016/j.dsr.2019.03.003.
147. Kikas, Ü & Reinart, A.E. & Tamm, Eduard & Iher, H.. (2004). Comparison of aerosol microphysical characteristics obtained from AERONET and ground based measurements. *Journal of Aerosol Science*. 35. S1007-S1008. 10.1016/S0021-8502(19)30239-3.
148. Kroon F., Motti C., Talbot S., Sobral P., Puotinen M. (2018) A workflow for improving estimates of microplastic contamination in marine

- waters: A case study from North-Western Australia. *Environmental Pollution* 238, 26–38. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.03.010.
149. Kowalski N., Reichardt A.M., Waniek J.J. (2016) Sinking rates of microplastics and potential implications of their alteration by physical, biological, and chemical factors. *Marine Pollution Bulletin* 109, 310–319. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.05.064.
 150. Lebreton L.C.M., Van der Zwet J., Damsteeg J.-W., Slat B., Andrady A., Reisser J. (2017) River plastic emissions to the world's oceans. *Nat. Commun.* 8, 15611. DOI: 10.1038/ncomms15611.
 151. Lebreton L., Slat B., Ferrari F., Sainte-Rose B., Aitken J., Marthouse R., Hajbane S., Cunsolo S., Schwarz A., Levivier A., Noble K., Debeljak P., Maral H., Schoeneich-Argent R., Brambini R., Reisser J. (2018) Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific Reports* 8, 4666. DOI: 10.1038/s41598-018-22939-w.
 152. Li, Wenfeng & Luo, Yongming & Pan, Xiangliang. (2020). Microplastics in Agricultural Soils. 10.1007/698_2020_448.
 153. Li Y., Wang X., Fu W., Xia X., Liu C., Min J., Crittenden J.C. (2019) Interactions between nano/micro plastics and suspended sediment in water: Implications on aggregation and settling. *Water Research* 161, 486–495. DOI: 10.1016/j.watres.2019.06.018.
 154. Liu P., Zhan X., Wu X., Li J., Wang H., Gao S. (2020) Effect of weathering on environmental behavior of microplastics: Properties, sorption and potential risks. *Chemosphere* 242, 125193. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125193.
 155. Lithner D, Larsson A, Dave G. Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Sci Total Environ.* 2011 Aug 15;409(18):3309-24. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.04.038. Epub 2011 Jun 12. PMID: 21663944.
 156. Lobelle D., Cunliffe M. (2011) Early microbial biofilm formation on marine plastic debris. *Marine Pollution Bulletin* 62 (1), 197–200.

157. Lots, Froukje & Behrens, Paul & Vijver, Martina & Horton, Alice & Bosker, Thijs. (2017). A large-scale investigation of microplastic contamination: Abundance and characteristics of microplastics in European beach sediment. *Marine pollution bulletin*. 123. 10.1016/j.marpolbul.2017.08.057.
158. Lorenz C., Roscher L., Meyer M.S., Hildebrandt L., Prume J., Löder M.G., Primpke S., Gerdt G. (2019) Spatial distribution of microplastics in sediments and surface waters of the southern North Sea. *Environmental Pollution* 252. Pt. B. 1719–1729 DOI: 10.1016/j.envpol. 2019.06.093.
159. Lusher A.L., Burke A., O'Connor I., Officer R. (2014) Microplastic pollution in the Northeast Atlantic Ocean: Validated and opportunistic sampling. *Marine Pollution Bulletin* 88 (1–2), 25–33. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2014.08.023.
160. Lusher A.L., Tirelli V., O'Connor I., Officer R. (2015) Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Scientific Reports* 5: 14947. DOI: 10.1038/srep14947.
161. Manbohi, A., Mehdinia, A., Rahnema, R., & Dehbandi, R. (2021). Microplastic pollution in inshore and offshore surface waters of the southern Caspian Sea. *Chemosphere*, 281, 130896 . doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130896.
162. Masura J., Baker J., Foster G., Arthur C. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in water and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48. 2015. 31 pp.
163. Matsuguma Y., Takada H., Kumata H., Kanke H., Sakurai S., Suzuki T., Itoh M., Okazaki Y., Boonyatumanond R., Zakaria M.P., Weerts S., Newman B. (2017) Microplastics in Sediment Cores from Asia and Africa as Indicators of Temporal Trends in Plastic Pollution. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 73 (2): 230–239. DOI: 10.1007/s00244-017-0414-9.

164. Mateos-Cárdenas, A., O'Halloran, J., van Pelt, F.N., & Jansen, M.A. (2020). Rapid fragmentation of microplastics by the freshwater amphipod *Gammarus duebeni* (Lillj.). *Scientific Reports*, 10.
165. Mceachern, Kinsley & Alegria, Henry & Kalagher, Amelia & Morrison, Samantha & Hastings, David. (2019). Microplastics in Tampa Bay, Florida: Abundance and variability in estuarine waters and sediments. *Marine Pollution Bulletin*. 148. 97-106. 10.1016/j.marpolbul.2019.07.068.
166. McCormick A.R., Hoellein T.J., London M.G., Hittie J., Scott J.W., Kelly J.J. (2016) Microplastic in surface waters of urban rivers: Concentration, sources, and associated bacterial assemblages. *Ecosphere* 7 (11), e01556. DOI: 10.1002/ecs2.1556.
167. McCormick, A., Hoellein, T. J., Mason, S. A., Schluep, J., and Kelly, J. J. (2014). Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river. *Environ. Sci. Technol.* 48, 11863–11871. doi: 10.1021/es503610r
168. Michael, Bruen., John, O'Sullivan., Róisín, Nash. (2023). Understanding the overland transport of microplastics from agricultural soils to freshwater systems. doi: 10.5194/egusphere-egu23-10261
169. Morét-Ferguson S., Law K.L., Proskurowski G., Murphy E.K., Peacock E.E., Reddy C. M. (2010) The size, mass, and composition of plastic debris in the western North Atlantic Ocean. *Marine Pollution Bulletin* 60 (10), 1873–1878. DOI:10.1016/j.marpolbul.2010.07.020.
170. Moore C.J., Moore S.L., Leecaster M.K., Weisberg S.B. (2001) A comparison of plastic and plankton in the North Pacific central gyre. *Marine Pollution Bulletin* 42, 1297–1300.
171. Mu J., Zhang S., Qu L., Jin F., Fang C., Ma X., Zhang W., Wang J. (2019) Microplastics abundance and characteristics in surface waters from the Northwest Pacific, the Bering Sea, and the Chukchi Sea. *Marine Pollution Bulletin* 143, 58–65. DOI: 10.1016/j.marpolbul. 2019.04.023.

172. Nakajima R, Yamashita R (2020) Methods for sampling, processing, identification, and quantification of microplastics in the marine environment. *Oceanography in Japan* 29(5): 129-151
173. Norén F. (2007) Small plastic particles in Coastal Swedish waters. KIMO report. 11 p.
174. Oberbeckmann S., Labrenz M. (2020) Marine Microbial Assemblages on Microplastics: Diversity, Adaptation, and Role in Degradation. *Annual review of marine science* 12, 209–232. DOI: 10.1146/annurevmarine-010419-010633.
175. Othman, A., Hasan, H., Muhamad, M., Ismail, N., & Abdullah, S. (2021). Microbial degradation of microplastics by enzymatic processes: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 3057 - 3073. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01197-9>.
176. Pham C.K., Ramirez-Llodra E., Alt C.H., Amaro T., Bergmann M., Canals M., Company J.B., Davies J., Duineveld G., Galgani F., Howell K.L., Huvenne V.A., Isidro E., Jones D.O., Lastras G., Morato T., Gomes-Pereira J.N., Purser A., Stewart H., Tojeira I., Tubau X., Van Rooij D., Tyler P.A. (2014) Marine litter distribution and density in European seas, from the shelves to deep basins. *PLoS ONE* 9 (4): 1–13. DOI: 10.1371/journal.pone.0095839.
177. Prarat, P & Thanayotmethi, T & Sriboonyapirat, T & Donsomchit, P & Hongsawat, Parnuch & Chouychai, B. (2020). Preliminary Study of Abundance and Characteristics of Microplastics on Beach Sediment along the Coast of Rayong Province, Thailand. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 581. 012033. 10.1088/1755-1315/581/1/012033.
178. Prata J.C. Airborne microplastics: Consequences to human health? *Environ Pollut.* 2018. No. 234. P. 115–126. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.11.043.
179. Prata J.C, da Costa J.P., Duarte A.C., Rocha-Santos T. (2019) Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: a critical

- review. *Trends in Analytical Chemistry* 110, 150–159. DOI: 10.1016/j.trac.2018.10.029.
180. Peng G., Zhu B., Yang D., Su L., Shi H., Li D. (2017) Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China. *Environmental Pollution* 225, 283–290. DOI: 10.1016/j.envpol. 2016.12.064.
 181. Rakesh, Kumar., Prabhakar, Sharma., Anurag, Verma., Prakash, Kumar, Jha., P., M., Singh., Pankaj, Gupta., Ravish, Chandra., P., V., Vara, Prasad. (2021). Effect of Physical Characteristics and Hydrodynamic Conditions on Transport and Deposition of Microplastics in Riverine Ecosystem. *Water*, 13(19):2710-. doi: 10.3390/W13192710
 182. Ramli, Ramli & Yaqin, Khusnul & Rukminasari, Nita. (2021). Microplastics contamination in green mussels *Perna viridis* in Pangkajene Kepulauan Waters, South Sulawesi, Indonesia. *Akuatikisile: Jurnal Akuakultur, Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil*. 5. 1. 10.29239/j.akuatikisile.5.1.1-5.
 183. Rashid Pervez, Yonghong Wang, Zhongpeng Lai et al. Occurrences, Distribution and Composition of Microplastics in the Surface Seawater and Beach Sediments of the Southern Shandong Peninsula, China, 24 August 2021, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-790759/v1>].
 184. Ryan P.G., Suaria G., Perold V., Pierucci A., Bornman T.G., Aliani S. (2020) Sampling microfibres at the sea surface: The effects of mesh size, sample volume and water depth. *Environmental Pollution* (Barking, Essex: 1987); 258: 113413. DOI: 10.1016/j.envpol. 2019.113413.
 185. Reddy M.S., Basha S., Adimurthy S., Ramachandraiah G. (2006) Description of the small plastics fragments in marine sediments along the Alang-Sosiya ship-breaking yard, India. *Estuarine. Coastal Shelf Science* 68, 656–660.
 186. Reisser J., Slat B., Noble K., du Plessis K., Epp M., Proietti M., de Sonnevile J., Becker T., Pattiaratchi C. (2015) The vertical distribution of

- buoyant plastics at sea: an observational study in the North Atlantic Gyre. *Biogeosciences* 12 (4), 1249. DOI: 10.5194/bg- 12-1249-2015.
187. Rezania, S., Park, J., Din, M., Taib, S., Talaiekhosani, A., Yadav, K., & Kamyab, H. (2018). Microplastics pollution in different aquatic environments and biota: A review of recent studies.. *Marine pollution bulletin*, 133, 191-208 . <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.022>.
 188. Rocha-Santos T., Duarte A.C. (2017) Characterization and analysis of microplastics. Rocha- Santos T.A.P. Duarte A.C. (Eds.), ed. 1. Vol. 75. 286 p. Amsterdam: Elsevier, ISBN: 9780444638984 0444638989.
 189. Rochman C.M., Hoh E., Kurobe T., Teh S.J. (2013) Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Nature Scientific Reports* 3, 3263.
 190. Rochman, C. M., Hoh, E., Kurobe, T., & Teh, S. J. (2015). Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Scientific Reports*, 5, 14340.
 191. Savuca, Alexandra & Nicoara, Mircea & Faggio, Caterina. (2022). Comprehensive Review regarding the Profile of the Microplastic Pollution in the Coastal Area of the Black Sea. *Sustainability*. 14. 10.3390/su142114376.
 192. Sagawa N., Kawaai K., Hinata H. (2018) Abundance and size of microplastics in a coastal sea: Comparison among bottom sediment, beach sediment, and surface water. *Marine Pollution Bulletin* 133, 532–542. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.05.036.
 193. Shim W.J., Hong S.H., Eo S. (2017) Identification methods in microplastic analysis: a review. *Analytical Methods* 9, 1384–1391. DOI: 10.1039/C6AY02558G.
 194. Shaw D.G.; Day R.H. (1994) Colour- and form-dependent loss of plastic micro-debris from the North Pacific Ocean. *Marine Pollution Bulletin* 28, 39–43.

195. Sommer, F., Dietze, V., Baum, A., Sauer, J., Gilge, S., Maschowski, C., & Gieré, R. (2018). Tire Abrasion as a Major Source of Microplastics in the Environment. *Aerosol and Air Quality Research*, 18, 2014-2028. .
196. Song Y.K., Hong S.H., Jang M. et al. Large accumulation of micro-sized synthetic polymer particles in the sea surface microlayer // *Environ. Sci. Technol.* 2014. V. 48. P. 9014–9021.
197. Song Y.K., Hong S.H., Jang M., Han G.M., Jung S.W., Shim W.J. (2017) Combined Effects of UV Exposure Duration and Mechanical Abrasion on Microplastic Fragmentation by Polymer Type. *Environmental Science and Technology* 51 (8), 4368–4376. DOI: 10.1021/acs.est.6b06155.
198. Sundt P., Schulze P.-E., Syversen F. (2014) Sources of microplastic pollution to the marine environment. Report M-321, 2015. Project 1032. Norwegian Environment Agency. Oslo, Norway. <http://www.miljodirektoratet.no/Documents/publikasjoner/M321/M321.pdf>
199. Tamminga M., Stoewer S.-C., Fischer E.K. (2019) On the representativeness of pump water samples versus manta sampling in microplastic analysis. *Environmental Pollution* 254, 112970. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.112970.
200. Ter Halle A., Ladirat L., Gendre X., Goudouneche D., Pusineri C., Routaboul C., Tenailleau C., Duployer B., Perez E. (2017) Understanding the fragmentation pattern of marine plastic debris. *Environmental Science and Technology Letter* 50, 5668–5675.
201. Thomas, Daniela & Schütze, Berit & Heinze, Wiebke & Steinmetz, Zacharias. (2020). Sample Preparation Techniques for the Analysis of Microplastics in Soil—A Review. *Sustainability*. 12. 9074. 10.3390/su12219074.
202. Thompson R.C., Olsen Y., Mitchell R.P., Davis A., Rowland S.J., John A.W.G., McGonigle D., Russel A.E. (2004) Lost at sea: Where is all the plastic? *Science* 304, 838. DOI: 10.1126/science.1094559.

203. Thompson R.C. (2015) Microplastics in the marine environment: sources, consequences and solutions. In: Bergmann M., Gutow L., Klages M. (Eds.). *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Berlin. P. 185–200.
204. Totic, Tara & Vrugink, Marc & Vesman, Anna. (2020). Microplastics quantification in surface waters of the Barents, Kara and White Seas. *Marine Pollution Bulletin*. Volume 161. 111745. 10.1016/j.marpolbul.2020.111745.
205. Trainic, M., Flores, J. M., Pinkas, I., Pedrotti, M. L., Lombard, F., Bourdin, G., et al. (2020). Airborne microplastic particles detected in the remote marine atmosphere. *Commun. Earth Environ.* 1 (1), 64. doi:10.1038/s43247-020-00061-y
206. Van Sebille E., Wilcox C., Lebreton L., Maximenko N., Hardesty B.D., Van Franeker J.A., Eriksen M., Siegel D., Galgani F., Law K.L. (2015) A global inventory of small floating plastic debris. *Environmental Research Letter* 10, 124006. DOI: 10.1088/1748- 9326/10/12/124006.
207. Van Cauwenberghe L., Devriese L., Galgani F., Robbens J.R., Janssen C. (2015) Microplastics in sediments: a review of techniques, occurrence and effects. *Marine Environmental Research* 111, 5–17. DOI: 10.1016/j.marenvres.2015.06.007.
208. Van Cauwenberghe L., Claessens M., Vandegehuchte M.B., Mees J., Janssen C.R. (2013) Assessment of marine debris on the Belgian continental shelf. *Marine Pollution Bulletin* 73, 161–169.
209. Vermeiren, Peter & Lercari, Diego & C. Muñoz, Cynthia & Ikejima, Kou & Celentano, Eleonora & Jorge-Romero, Gabriela & Defeo, Omar. (2021). Sediment grain size determines microplastic exposure landscapes for sandy beach macroinfauna. *Environmental Pollution*. 286. 10.1016/j.envpol.2021.117308.
210. Von Friesen L.W., Granberg M.E., Pavlova O., Magnusson K., Hassellöv M., Gabrielsen G.W. (2020) Summer sea ice melt and wastewater

- are important local sources of microlitter to Svalbard waters. *Environment International* 139, 105511. DOI: 10.1016/j.envint. 2020.105511.
211. Wainkwa Chia, Rogers & Lee, Jin-Yong & Kim, Heejung & Jang, Jiwook. (2021). Microplastic pollution in soil and groundwater: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 19. 10.1007/s10311-021-01297-6.
 212. Wang W., Wang J. (2018) Investigation of microplastics in aquatic environments: An overview of the methods used, from field sampling to laboratory analysis. *Trends in Analytical Chemistry* 108, 195–202. DOI: 10.1016/j.trac.2018.08.026.
 213. Wang J., Tan Z., Peng J., Qiu Q., Li M. (2016) The behaviors of microplastics in the marine environment. *Marine Environmental Research* 113, 7–17. DOI: 10.1016/j.marenvres. 2015.10.014.
 214. Weinstein J.E., Crocker B.K., Gray A.D. (2016) From macroplastic to microplastic: Degradation of high-density polyethylene, polypropylene, and polystyrene in a salt marsh habitat. *Environmental Technology Chemistry* 35: 1632–1640. DOI: 10.1002/ etc.3432.
 215. Wu N., Zhang Y., Zhang X., Zhao Z.B., He J., Li W., Ma Y., Niu Z. (2019) Occurrence and distribution of microplastics in the surface water and sediment of two typical estuaries in Bohai Bay, China. *Environmental science. Processes and impacts*. DOI: 10.1039/ C9EM00148D.
 216. Yona, Defri & Mahendra, B & Fuad, Mochamad & Sartimbul, Aida. (2023). Microplastics contamination in molluscs from mangrove forest of Situbondo, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1191. 012016. 10.1088/1755-1315/1191/1/012016.
 217. Yona, D., Setyawan, F. O., Putri, S. E. N., Iranawati, F., Kautsar, M. A., & Isobe, A. (2023). Microplastic Distribution in Beach Sediments: Comparison Between the North and South Waters of East Java Island, Indonesia. *Jurnal Ilmiah Perikanan Dan Kelautan*, 15(2), 303–315.
 218. Zhang C., Zhou H., Cui Y., Wang C., Li Y., Zhang D. (2019) Microplastics in offshore sediment in the Yellow Sea and East China Sea,

- China. *Environmental Pollution* 244, 827–833. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.10.102.
219. Zheng Y, Li J, Sun C, Cao W, Wang M, Jiang F, Ju P. Comparative study of three sampling methods for microplastics analysis in seawater. *Sci Total Environ.* 2021 Apr 15;765:144495. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144495. Epub 2020 Dec 24. PMID: 33385818.
 220. Zheng, Y., Li, J., Cao, W., Liu, X., Jiang, F., Ding, J., Yin, X., & Sun, C. (2019). Distribution characteristics of microplastics in the seawater and sediment: A case study in Jiaozhou Bay, China.. *The Science of the total environment*, 674, 27-35 . .
 221. Zhou Q., Zhang H., Fu C., Zhou Y., Dai Z., Li Y. et al. (2018) The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea. *Geoderma* 322, 201–208. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.02.015.
 222. Zobkov M., Esiukova E. (2017a) Microplastics in Baltic Bottom Sediments: quantification procedures and first results. *Marine Pollution Bulletin* 114 (2), 724–732. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.10.060.
 223. Zobkov M.B., Esiukova E.E. (2017b) Evaluation of the Munich Plastic Sediment Separator efficiency in extraction of microplastics from natural marine bottom sediments. *Limnology and Oceanography: Methods* 15 (11), 967–978. DOI: 10.1002/lom3.10217.
 224. Zobkov M.B., Esiukova E.E., Zyubin A.Y., Samusev I.G. (2019) Microplastic content variation in water column: The observations employing a novel sampling tool in stratified Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin* 138, 193–205. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.11.047.
 225. Öztekin, Ayşah & Bat, Levent. (2017). Microlitter Pollution in Sea Water: A Preliminary Study from Sinop Sarikum Coast of the Southern Black Sea. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 17. 10.4194/1303-2712-v17_6_37.