

На правах рукописи



Глушко Арина Евгеньевна

**ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АЗОВСКОГО МОРЯ
МИКРОПЛАСТИКОМ**

Специальность 1.6.21. Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Ростов-на-Дону
2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет»

- Научный руководитель: **Беспалова Людмила Александровна**
доктор географических наук, доцент, профессор кафедры океанологии, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»
- Официальные оппоненты: **Миньковская Роза Яковлевна**
доктор географических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»
Ершова Александра Александровна
кандидат географических наук, доцент кафедры геоэкологии, природопользования и экологической безопасности, ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук»

Защита состоится «26» декабря 2025 года в __ часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.0.075.03 при ФГБУН ФНИЦ «Владикавказский научный центр РАН», ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова» по адресу: 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а (ГФИ ВНИЦ РАН).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим высылать по адресу: 364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т. Х.А. Исаева, д. 100, на имя ученого секретаря диссертационного совета 99.0.075.03 З.Ш. Гагаевой. E-mail: geodissovet@mail.ru; тел./факс 8(8712)223607.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова» и на сайтах: https://gstou.ru/science/dissertation_council/ и vak.minobrnauki.gov.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 99.0.075.03
кандидат географических наук



З.Ш. Гагаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 (Вагаев 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 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 других морей Мирового океана.

Личный вклад автора.

В основу 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 индустриальных 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 (базой 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении приведено общее описание работы, которое включает в себя обозначение актуальности темы, представление цели и задач диссертационного исследования, раскрывается научная новизна, научная и практическая значимость работы, личный вклад автора, апробация диссертационного исследования и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена постановке проблемы исследования. Описана история проблемы возникновения, современный уровень знания о загрязнении морской среды микропластиком, анализ исследований ученых лидеров мира и России, обзор литературы по исследуемой проблеме.

В разделе 1.1 дается определение понятия «микропластик» принятое в мировой практике научных исследований как неоднородная группа частиц пластика, состоящая из различных синтетических полимеров, отличных по размеру, форме, цвету, и плотности в пределах < 5 мм (Arthur et al., 2009). В данном разделе приводится описание проблемы исследования и экологических угроз, обусловленных наличием микропластика в морской среде.

В разделе 1.2 описан современный уровень знания о загрязнении МП Мирового океана, основанный на анализе публикаций по следующим направлениям исследований: обработка натурных данных о видах частиц МП, их качественных и количественных характеристиках, источниках их поступления в водные объекты Мирового океана; анализ влияния МП на живые организмы; изучение моделей воздействия частиц микропластика на водные экосистемы; создание методик отбора и обработки проб и идентификации микропластика; анализ особенностей перемещения МП в морской среде. На основании проведенного анализа сделано заключение о том, что современный уровень исследований загрязнения МП Мирового океана отмечается недостатком проведения качественно-количественных наблюдений, несовпадением данных о поступлении пластикового мусора в морскую среду и его фактическом зафиксированном количестве, вероятной угрозе жизни и здоровью морских организмов, функционированию экосистем.

Во второй главе «Характеристика природных условий Азовского моря», исследованы природные условия моря: особенности географического положения; геологическое и тектоническое строение, литологический состав донных отложений, рельеф дна и берегов, прибрежная гидрографическая сеть; гидроклимат и динамика вод моря, гидро-биологические сообщества.

В третьей главе представлена методика отбора проб и проведения лабораторных исследований на содержание частиц МП в воде, донных и пляжевых отложениях, атмосферных выпадениях (аэрозолях), в почвах, моллюсках.

В разделе 3.1 подробно описывается методика отбора проб. Пробы пляжевых отложений были отобраны рамочным способом в 3 точках: в тыльной стороне пляжа, на линии максимального заплеска и урезе. Донные отложения и пробы бентоса при помощи дночерпателя Петерсена. Пробы воды из поверхностного горизонта объемом 1 л

металлическим батометром Руттнера. Атмосферные выпадения (аэрозоли) путем экспонирования в течение 24 часов стеклянных кювет с дистиллированной водой, площадью 196 см². Пробы почв прибрежной зоны – металлической лопаткой (слой 20 см) у края обрыва абразионного берега.

В разделе 3.2 представлены лабораторные исследования идентификации МП на основе модифицированного метода количественного определения синтетических частиц разработанного в Национальном управлении океанических и атмосферных исследований (NOAA). Лабораторный анализ включал следующие этапы (рис. 1): просеивание, сушка, плотностное разделение, окисление органических веществ, фильтрация и визуальная оценка (Masura et al., 2015; Zobkov, Esiukova, 2017). При исследовании образцов донных осадков и почв дополнительно применялся второй этап флотирования в разделителе в насыщенном растворе $ZnCl_2$ (плотностью 1,6 г/см³).

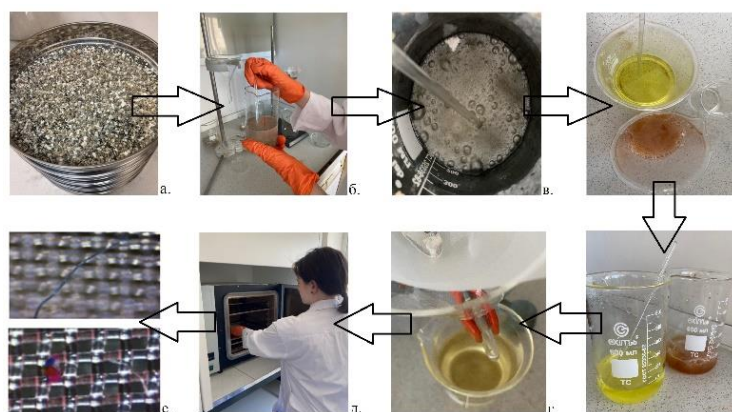


Рисунок 1 – Лабораторный метод анализа микропластика в морской среде (программа исследования морского мусора NOAA):

а – просеивание, б – плотностное разделение, в – жидкое окисление в перекиси водорода, г – фильтрование, д – сушка, е – анализ микропластика с помощью микроскопа

В разделе 3.3 приводится описание методов анализа частиц МП, его физико-химических характеристик, степени деградации.

Для определения качественной характеристики (цвет, форма, размер) обнаруженных частиц применялся метод визуальной оценки с помощью стереоскопического микроскопа Микромед МС-1 вар. 2С Digital с увеличением от 20× до 40×. Размер обнаруженного МП измерялся градуированной размерной шкалой, форма (сферическая, нитевидная, в виде пленок или ломанных фрагментов неправильной формы) и цвет МП определялись визуально при помощи микроскопа (Hartmann et al., 2019). Форма, как и цвет МП может зависеть от степени разрушения частицы и времени ее нахождения в морской среде. Оценка степени деградации МП осуществлялась с использованием растровой

электронной микроскопии (растровый электронный микроскоп VEGA II LMU производства фирмы Tescan). Такой вид исследования применяется для более детального изучения и анализа поверхности частиц, их краев и трещин, периоде нахождения частиц в морской среде, а также прогноза их дальнейшего фрагментирования.

Для идентификации типа полимера обнаруженного МП применялся наиболее распространенный метод – ИК-Фурье спектроскопия (FTIR) (JASCO FT/IR-6800, ФСМ 2202). При использовании данного метода инфракрасной спектроскопии производится сравнение ИК-спектров поглощения или пропускания образца со спектрами уже известных синтетических веществ (Browne et al., 2011).

В четвертой главе оценивается степень загрязнение микропластиком среды и биоты Азовского моря. Приведены данные, полученные в ходе научно-экспедиционных исследований за период 2019–2023 гг. Представлены результаты лабораторных анализов по содержанию частиц МП в воде, донных и пляжевых отложениях, моллюсках, аэрозолях и реках, впадающих в Азовское море, почвах прибрежной зоны.

В разделе 4.1.1 были приведены результаты анализа загрязнения МП пляжевых отложений Азовского моря. Отобрано и проанализировано более 72 проб пляжевых отложений на 24 пляжах Азовского моря и Керченского пролива (рис. 2).



Рисунок 2 – Среднее содержание частиц микропластика в пляжах Азовского моря, шт./кг

Согласно полученным результатам частицы МП обнаружены в 100 % проб, их среднее содержание составляло 45,2 шт./кг. Анализ распределения микропластика по

профилю пляжей выявил значительную концентрацию частиц МП в тыльной части пляжей и в зонах штормового заплеска. Пространственный анализ загрязнения МП береговой зоны Азовского моря показал, что самыми загрязненными микропластиком оказались пляжи крупного промышленного центра – г. Таганрога (112 шт./кг), а также пос. Ильич (105 шт./кг), находящегося в зоне влияния черноморского течения из Керченского пролива. Высокий уровень концентрации микропластика зафиксирован также на пляжах косы Павло-Очаковской – рекреационного объекта прилежащих городов Ростова-на-Дону и Азова. Относительно чистыми являются пляжи Ясенской (12 шт./кг) и Сазальнической кос (14 шт./кг) – расположенных в районах сельских поселений (рис. 2).

Морфология частиц МП относительно разнообразна, однако в пробах преобладают прямые и изогнутые синтетические волокна (70,6%) различного размера, пленки (17,8%), ломанные фрагменты (11,6%). Цветовая гамма характеризуется доминированием прозрачных или обесцвеченных (70,8 %), белых (5,5%), черных (10%), синих, красных и др. частиц (13,7%) (рис. 3). Интенсивность цвета частицы позволяет оценить степень фоторазрушения и время ее нахождения в морской среде, а также помогает приблизительно определить полимер, из которого состоит частица (Matsuguma et al., 2017).

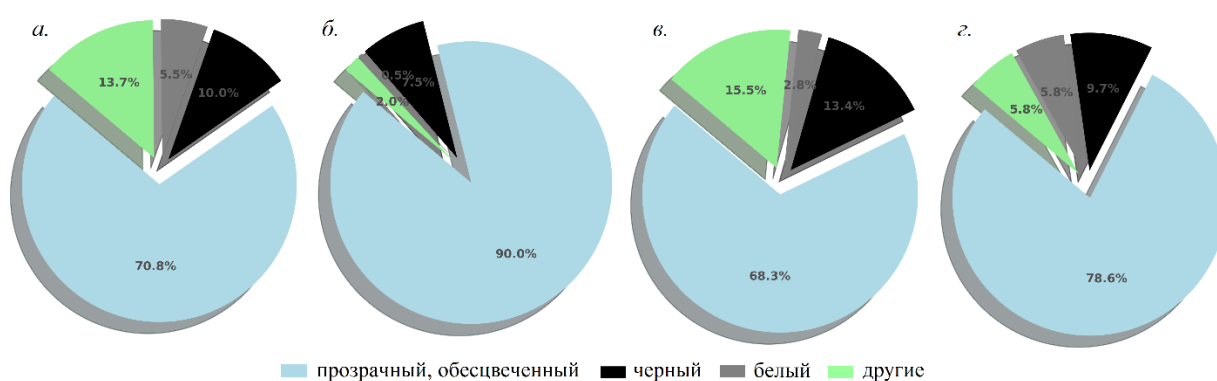


Рисунок 3 – Цветовая гамма микропластика в пляжевых (а), и донных отложениях (б), в воде (в), и моллюсках (г) Азовского моря, %

В разделе 4.1.2 была приведена оценка концентраций частиц МП в донных осадках Азовского моря, описаны его морфологические особенности и размерный состав частиц. Всего в период проведения экспедиционных работ в июле 2020 гг. было отобрано 27 проб донных отложений (рис.4). Среднее содержание частиц МП в донных отложениях составило 69 шт./кг. В пространственном распределении МП заметно увеличение его концентраций от центра моря к прибрежным зонам, что вероятно указывает на источники его поступления (Глушко и др, 2021).

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 г. Таганрога 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).

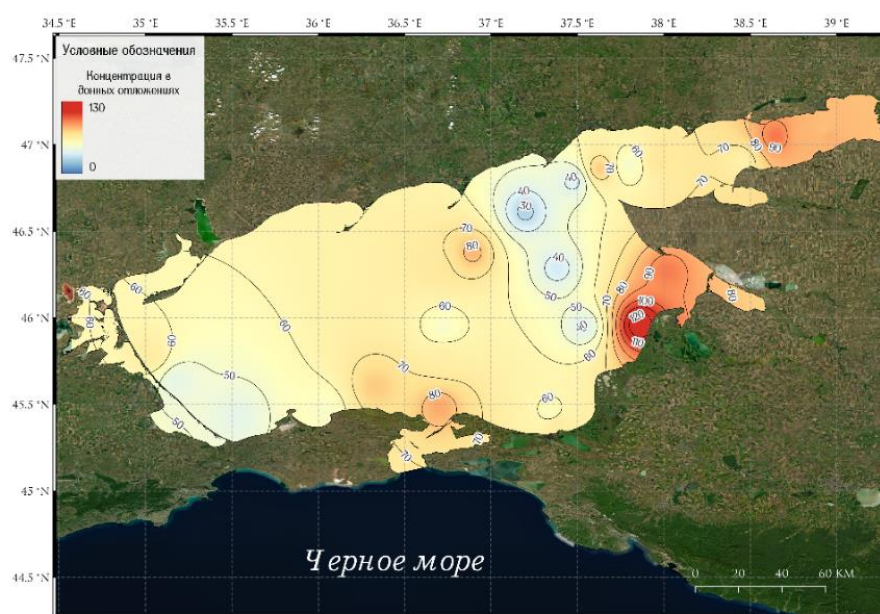


Рисунок 4 – Содержание частиц микропластика в донных осадках Азовского моря (шт./кг)

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 (Глушко и др, 2021).

Основными видами частиц МП, обнаруженными в донных отложениях Азовского моря, являются синтетические волокна (92,6%), ломанные фрагменты пластика (1,3%), пленки (6,1%). Превалирующим типом МП в донных отложениях Азовского моря являются прозрачные, обесцвеченные синтетические волокна (рис. 5). Анализ размерного состава частиц МП донных отложений показал, что самыми частыми по встречаемости в пробах являются частицы размером 0,4–0,5 мм, медиана размерного ряда составляла 0,6 мм.

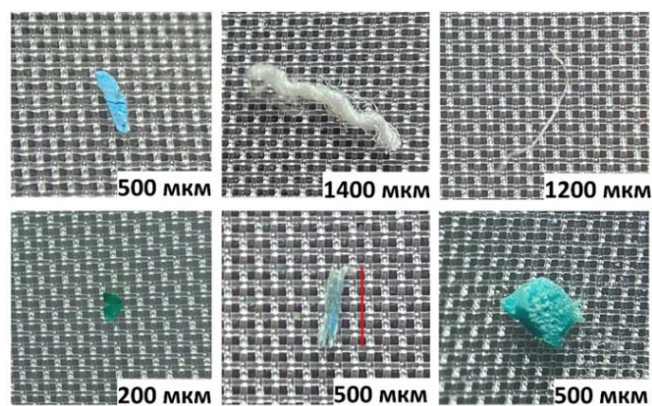


Рисунок 5 – Морфология и цвет обнаруженных частиц микропластика
(фото со стереомикроскопа Микромед МС-1 вар. 2С Digital)

Крупность частиц микропластика увеличивается с глубиной, что связано с ослаблением гидродинамической активности на больших глубинах (в прибрежных до 1,2 мм, в центральной акватории до 3,1 мм). 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.

В разделе 4.1.3 представлена оценка уровня загрязнения поверхностного слоя воды Азовского моря частицами МП. В ходе проведения исследований было обнаружено, что МП присутствует в 98 % проб воды, и его количество составляет в среднем 2,8 шт./л (рис. 6).

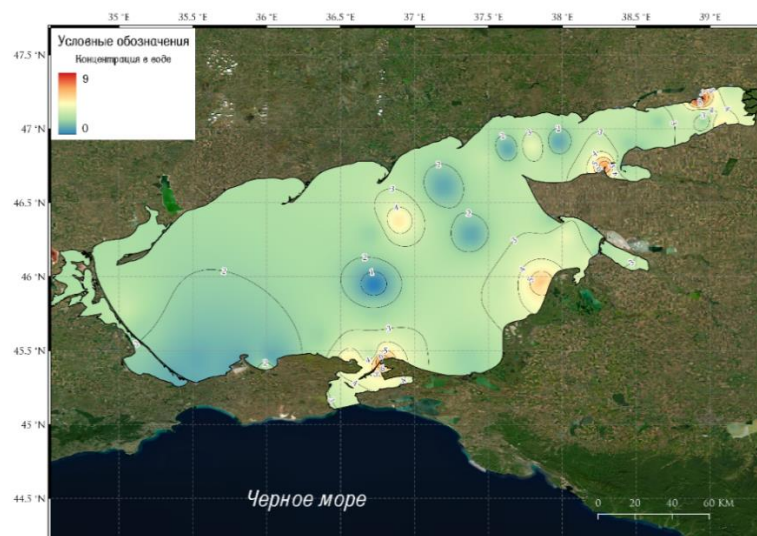


Рисунок 6 – Содержание микропластика в поверхностных водах Азовского моря, шт./л

Максимальный уровень концентрации приурочен к зоне влияния р. Дон и г. Таганрог (9 шт/л). Наименее загрязнены МП воды центральной и южной частей Азовского моря – 0-1 шт/л. (Казантипский и Арабатский заливы) (рис.6).

Обнаруженные частицы данного загрязнителя характеризуются различной цветовой гаммой и формой, однако во всех пробах повсеместно преобладали бесцветные синтетические волокна или пленки (68,3%), за ними следуют черные частицы с долей в 13,4%. Белые непрозрачные частицы встречаются значительно реже – всего 2,8% (рис.3).

Вычисленные показатели демонстрируют, что средний размер ($\bar{x}$) частиц составляет 1,3 мм при стандартном отклонении (σ) в 1,2 мм. Наибольшая частота встречаемости характерна для частицы с размером 0,4 мм. В соотношении размера МП и процента его повторяемости в пробах наблюдается умеренная отрицательная корреляция, т.е. с увеличением размера частиц микропластика их концентрация уменьшается (рис.4.7).

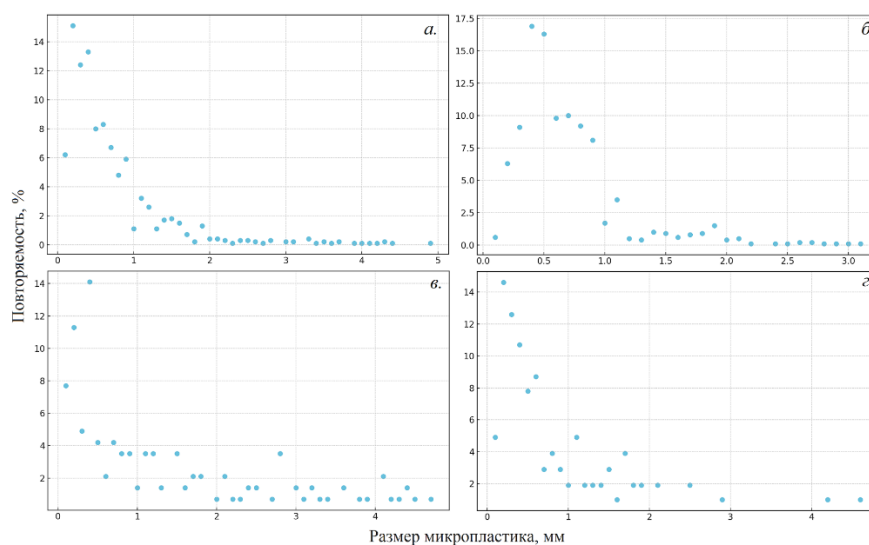


Рисунок 7 – Распределение частиц микропластика по крупности в пляжевых (а), и донных отложениях (б), в воде (в), и моллюсках (г) Азовского моря, %

В разделе 4.1.4 представлены результаты оценки концентраций частиц МП в моллюсках Азовского моря. В телах исследуемых моллюсков средняя концентрация МП составила 2,6 частицы на одну особь.

Анализ морфологических характеристик показывает, что доминирующей формой обнаруженного МП являются нитевидные волокна (86,4%). Прозрачные и обесцвеченные частицы составляют 78,8% от всего спектра идентифицированных частиц. Средний размер ($\bar{x}$) частиц МП составляет 0,8 мм.

В разделе 4.2 выполнена оценка источников поступления микропластика в Азовское море с речным стоком, атмосферными выпадениями над акваторией моря (в прибрежных урбатерриториях), и в следствии абразии берегов в почвенном покрове.

Атмосферные выпадения (аэрозоли) улавливали посредством экспонирования кюветов с дистиллированной водой на 11 станциях, в городах, расположенных по периметру Азовского моря (г. Ростов-на-Дону, г. Таганрог, г. Приморско-Ахтарск, г. Керчь,

г. Ейск, ст. Тамань, коса Сазальникская (в качестве фона)). Время экспонирования составляло 24 часа. Лабораторный анализ показал, что частицы МП содержатся в 100 % проб атмосферных выпадений в среднем количестве 371 шт./м² /сут. Наибольшее количество частиц МП зафиксировано в выпадениях г. Таганрог, где в среднем на 1м² городской территории выпадало до 561 шт./м²/сут. Наиболее чистый атмосферный воздух зафиксирован в районе косы Сазальникская 153 шт./м²/сут. (удалена от промышленных центров).

Отбор воды для анализа содержания в ней частиц МП 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 (табл. 1). Частицы МП были обнаружены во всех пробах. Их концентрация в среднем составляла 8 шт./л, максимальная зафиксирована в р. Дон – 14 шт./л, р. Кубань – 11 шт./л (табл. 1).

Таблица 1. 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 Чумбурка	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

Пробы почв были отобраны в прибрежной зоне Азовского моря на участках активной абразии. Отбор проб проводился в районе кос Беглицкая и Сазальникская, г. Таганрог, дельта Дона, коса Павло-Очаковская, г. Ейск, г. Приморско-Ахтарск, г. Керчь.

Данные, полученные в результате анализа, показали, что 87,5% изученных проб почв содержат микропластик. Средний показатель количества МП составил 7 шт./кг. Особенно высокие концентрации обнаружены в почвах, отобранных в дельте р. Дон, где их количество достигло 16 шт./кг. Следующие по степени загрязнения почвы обнаружены в г. Таганроге, где количество микропластика составило 14 шт./кг. В почвах косы Сазальническая МП обнаружен не был. Наиболее крупные и разнообразные по морфологическому составу частицы МП зафиксированы в почвах района дельты Дона.

Частицы, обнаруженные в аэрозолях, речном стоке, почвах прибрежной зоны характеризуются наибольшим разнообразием морфологического состава и цветовой гаммы, отмечается большое количество прозрачных, черных, белых, синих, красных, оранжевых и желтых фрагментов различного размера (рис.8), который также является сравнительно наибольшим, чем у частиц МП, обнаруженных непосредственно в Азовском море. Так, средний размер обнаруженного МП в атмосферных выпадениях составляет 1,2 мм, в реках – 1,1 мм, в почвах – 0,9 мм.

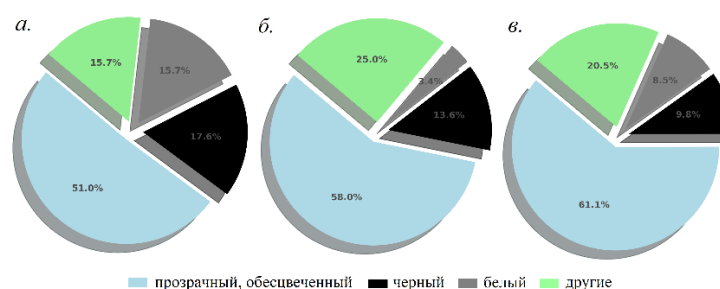


Рисунок 8 – Цветовая гамма микропластика в аэрозолях (а), реках (б), в почве (в), %

В разделе 4.3 приводятся результаты исследования различных видов разрушения и деградации частиц, проведенного на растровом электронном микроскопе VEGA II LMU. В ходе анализа были определены такие виды деградации как расслоение, растрескивание, расщепление, набухание и т. д. (рис. 9).

Разрушение и эрозия поверхности частиц МП является результатом различных химико-биологических процессов, фоторазрушения и физического воздействия волн и ветра (Andrady, 2011). Острые грани частиц являются индикатором их недавнего попадания в морскую среду или недавнего разрушения более крупных фрагментов. Гладкие и закругленные края являются характерной чертой частиц, находящихся в морской среде длительное время, полирующиеся о другие фрагменты или песчаные отложения (Carpenter, Smith, 1972; Doyle et al., 2011).

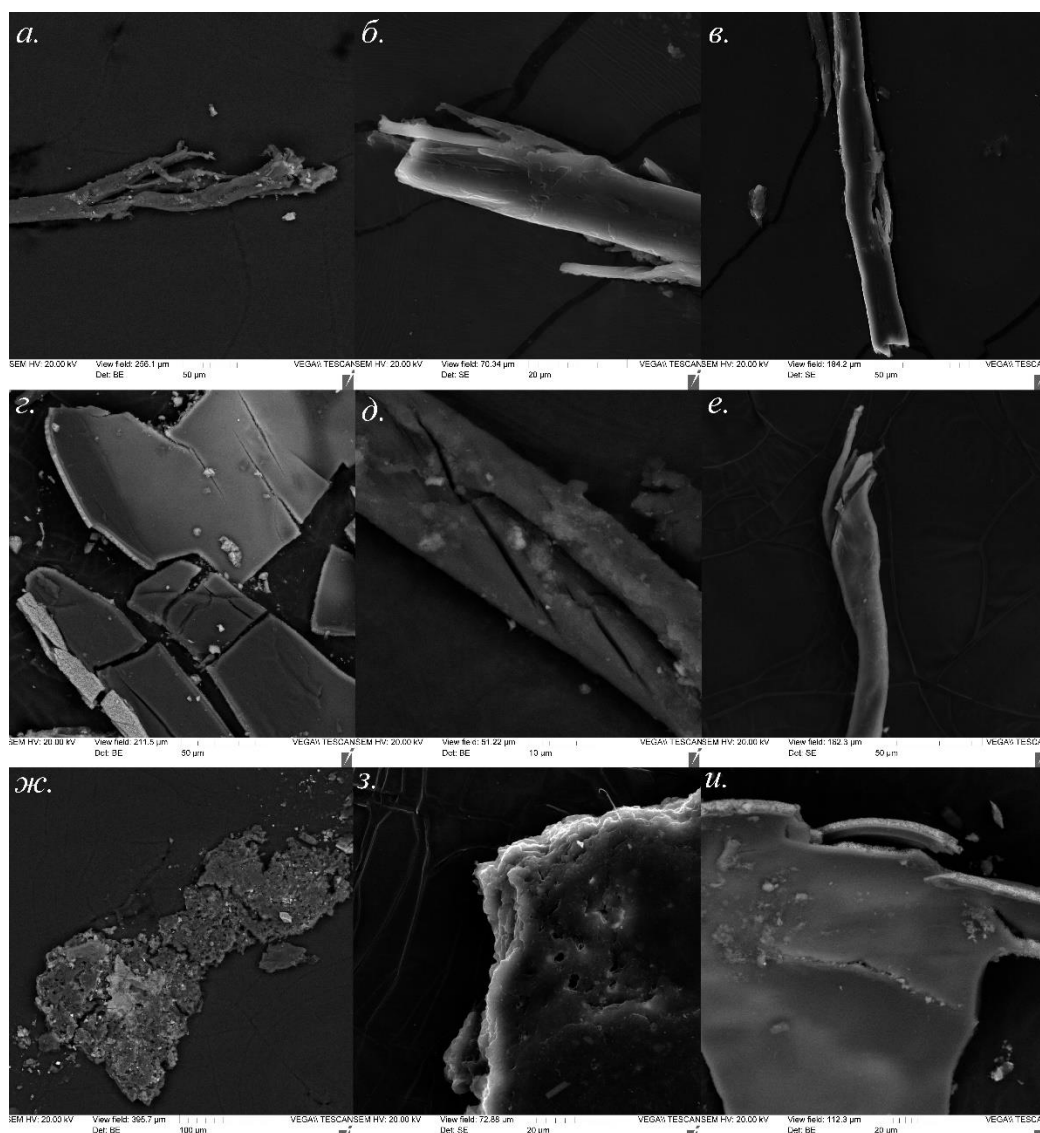


Рисунок – 9. Виды деградации частиц микропластика: раскосмачивание (а, е), расщепление, растрескивание (б-в), растрескивание (г-д), расслаивание, растрескивание (ж-и) (фото сделаны при помощи растрового электронного микроскопа VEGA II LMU производства фирмы Tescan)

В разделе 4.4 представлены результаты исследования химического состава обнаруженного МП, полученные путем применения метода инфракрасной спектроскопии на ИК-Фурье спектрометрах моделей JASCO FT/IR-6800 и ФСМ 2202. Автор исследования определила, что большая часть обнаруженных частиц по своему составу является полистиролом, полиэтиленом (включая полиэтилен высокой и низкой плотности), полипропиленом, акрилом, полиамидом, полиэтилентерефталатом (рис. 10). Для включения данных в исследование использовался критерий совпадения спектров с эталонными спектрами библиотеки спектрометра на уровне не менее 80%.

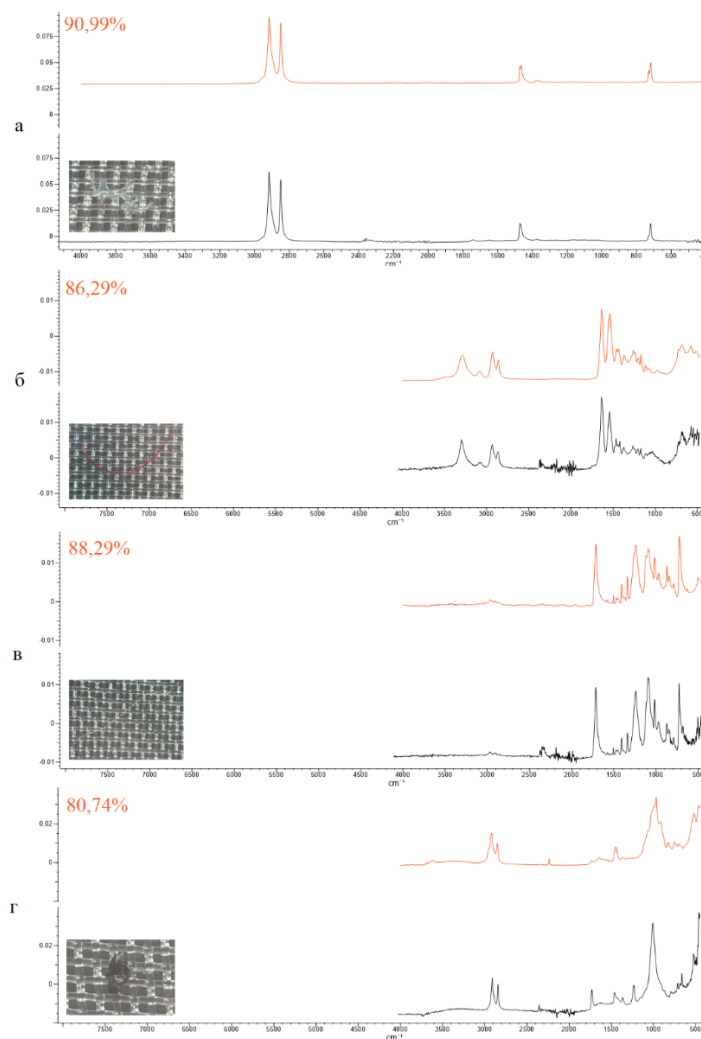


Рисунок 10 – Спектры некоторых типичных частиц МП, определенные с помощью ИК-Фурье спектрометра JASCO FT/IR-6800: полиэтилен (а), полиамид (б), полиэстер (в), акрилонитрил (г). Значения в процентах указывают на совпадение спектров с библиотекой прибора.

Разнообразие типов обнаруженных полимеров свидетельствует о множестве источников их происхождения. Такой состав обнаруженного МП позволяет заключить, что основными предметами, из которых он был фрагментирован, являются одежда из полиэстера, акрила, упаковочный материал, пластиковые бутылки, пакеты, одноразовая посуда, рыболовные сети, строительные материалы. Большая часть обнаруженного микропластика относилась ко II и III классу опасности полимеров.

В разделе 4.5 проведено зонирование акватории Азовского моря по степени загрязнения микропластиком морской среды: 1 – высокое, 2 – среднее, 3 – низкое (рис. 11).



Рисунок 11 – Зонирование Азовского моря по степени загрязненности микропластиком:
красный – высокое, желтый – среднее, зеленый – низкое

Прибрежная зона максимального загрязнения расположена на глубинах 0–5 м. Ее площадь 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. Концентрации микропластика в воде варьировались от 1 до 9 шт./л., тогда как в донных отложениях наблюдались средние концентрации 85 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.

Площадь второй зоны занимает 36 % от площади моря. Согласно проведенному анализу, данная зона является районом средних концентраций МП. Средняя глубина равна 7 м. Концентрация МП на поверхности воды варьируется от 1 до 7 шт./л. В донных отложениях среднее значение МП равно 66 шт./кг. В зоне обитают различные виды бентосных организмов, включая Монодакну цветную, Анадору, Церастодерму, Абру, Митилиастра, многощетинковых червей.

Третья зона, расположена в центральной части исследуемого морского бассейна, и составляет приблизительно 45% от общей площади моря. Средняя глубина– 11 м. Концентрации МП 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 со средним значением 56 шт./кг.

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.

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 1 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 алевроитовых илов, залегающих в прибрежной зоне.
5. Исследование таких источников поступления МП в Азовское море, как аэрозольные выпадения, реки, показал, что частицы МП присутствует в 100 % исследуемых проб, и в 87 % образцов почв абразионных берегов Азовского моря. Среднее содержание частиц МП в атмосферных выпадениях над прибрежными урбатерриториями, 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 работ, опубликованных по теме научного исследования

Статьи в ведущих рецензируемых изданиях, соответствующих перечню ВАК:

1) 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;

2) 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

3) Анциферова, М. А., Глушко, А. Е., Беспалова, Л. А., Клеценков, 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>

Прочие публикации:

4) 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.

5) 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.

6) 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.

7) . Анциферова М. А., Глушко А.Е. 2021. Загрязнение микропластиком атмосферы г. Таганрог. Общество. 1(20): 65–69.

8) Беспалова Л. А., Глушко А.Е. Микропластик в Азовском море: уровень накопления в аэрозолях, воде, донных и пляжевых отложениях // Материалы Междуна-

родной научно-практической конференции: «Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана» (20–25 сентября 2021 года, г. Сочи). – Новочеркасск: Лик, 2021. – 406 с.

9) А. В. Клещенко, М. А. Анциферова, **А. Е. Глушко**, А. М. Коршун. Современные проблемы исследования микропластика в природных и сточных водах // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – 2023. – Т. 1, № 8. – С. 94-97. – DOI 10.23885/2500-395X-2023-1-8-94-97. – EDN HAVTUP.

10) **Глушко А.Е.** Микропластик в Азовском море //Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2024. Т. 1. № 9. С. 26-30.