



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра геоэкологии, природопользования и экологической безопасности

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему	Загрязнение микропластиком водной среды Финского залива
Исполнитель	Пашкевич Екатерина Алексеевна
Руководитель	Кандидат географических наук Ершова Александра Александровна

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

кандидат биологических наук, доцент
Мухин Иван Андреевич

«10» апреля 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

Введение.....	5
Глава 1 Описание предмета и объекта исследования	5
1.1 Проблема микропластика в водной среде	5
1.2 Физико-географическое описание Финского залива.....	9
1.2.1 Гидрология Финского залива.....	11
1.2.2 Экологическое состояние восточной части Финского залива.....	12
1.3 Микропластик в Финском заливе.....	13
Глава 2 Материалы и методы исследования.....	19
2.1 Методы исследования.....	19
2.2 Исходные данные.....	22
Глава 3 Результаты исследования	25
3.1 Анализ содержания частиц микропластика в поверхностном слое восточной части Финского залива в 2024 г.	25
3.2 Сравнение результатов 2024 года с данными других исследований в Балтийском море	36
Заключение.....	42
Список литературы	45
ПРИЛОЖЕНИЕ А	51
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	52

Введение

В последние десятилетия проблема загрязнения окружающей среды пластиковыми отходами приобрела глобальный характер и стала предметом пристального внимания научного сообщества. Особую тревогу вызывает микропластик (МП) – мельчайшие частицы пластиковых материалов размером менее 5 мм, которые могут накапливаться в водной среде и оказывать негативное влияние на живые организмы. Микропластик обнаружен во всех водоемах планеты – от пресных озер до глубоких океанов и даже в арктических льдах, что свидетельствует о его широком распространении и устойчивости в окружающей среде.

Загрязнение морской воды микропластиком представляет серьезную угрозу для морских экосистем. Частицы микропластика легко поглощаются планктоном, рыбами, моллюсками и другими морскими организмами, нарушая пищевые цепочки, вызывая механические повреждения и провоцируя токсические эффекты. Помимо прямого воздействия, микропластик способен адсорбировать на своей поверхности опасные химические соединения, включая тяжелые металлы и стойкие органические загрязнители.

Особую актуальность изучение микропластика приобретает в контексте потенциальных угроз для здоровья человека. Исследования показали его присутствие в питьевой воде, морепродуктах, соли и даже в организме человека – в легких, плаценте и крови. Долгосрочные последствия такого воздействия пока недостаточно изучены, что делает эту проблему особенно актуальной.

Несмотря на высокий интерес к теме, исследования содержания микропластика в морской воде остаются фрагментарными. В ряде регионов, включая акватории России, мониторинг микропластика только начинается, а единых методик его отбора и анализа пока не существует. В условиях растущего загрязнения водных экосистем пластиком актуальность комплексного изучения содержания микропластика в морской среде возрастает, поскольку такие исследования необходимы для оценки экологической обстановки, разработки мер по

охране окружающей среды, а также регулирования отходов и охраны здоровья населения.

Целью выпускной квалификационной работы является исследования проб воды из акватории Финского залива на загрязнение микропластиком.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить проблему загрязнения морской водной среды микропластиком;
- изучить методы исследования морской водной среды на загрязнение микропластиком;
- изучить физико-географические особенности Финского залива;
- провести лабораторные исследования проб воды, полученные в ходе экспедиции 2024 года в Финском заливе;
- проанализировать полученные результаты и сравнить их с данными других исследований.

Объект исследования в данной работе – водная среда Финского залива.

Предмет исследования – загрязнение микропластиком.

Глава 1 Описание предмета и объекта исследования

1.1 Проблема микропластика в водной среде

Первые упоминания о частице микропластика появились в 70-х годах XX века. Морской биолог Эд Карпентер впервые заметил необычные белые частицы, плавающие среди коричневых водорослей в 1971 году, в ходе экспедиции в Саргассово море. Спустя 30 лет, в 2004 году, морской биолог из Плимутского университета в Англии – профессор Ричард Томпсон в научной литературе «Lost at sea: where's all the plastic?» [11] дал термин маленьким пластиковым частицам, которые образовались в процессе разложения более крупных частиц. Он назвал их микропластик – фрагменты пластиковых изделий или синтетических волокон размером менее 5 мм.

Ежегодно в Мировой океан поступает до 20 миллионов тонн пластика. Этот пластик переносится океанскими течениями, крошится волнами и солнечным светом на микропластик [31]. Большая его часть собирается в океанских круговоротах в огромные плавучие острова. Самым известным таким скоплением в океане является Тихоокеанское мусорное пятно, расположенное между Калифорнией и Гавайскими островами. Визуально распространение пластика в Мировом океане можно наблюдать благодаря различным моделям, которые показывают распространение пластикового мусора. Так на рисунке 1 представлена одна из таких моделей глобального распространения пластика, где каждая точка – это 20 килограмм пластикового мусора [41].

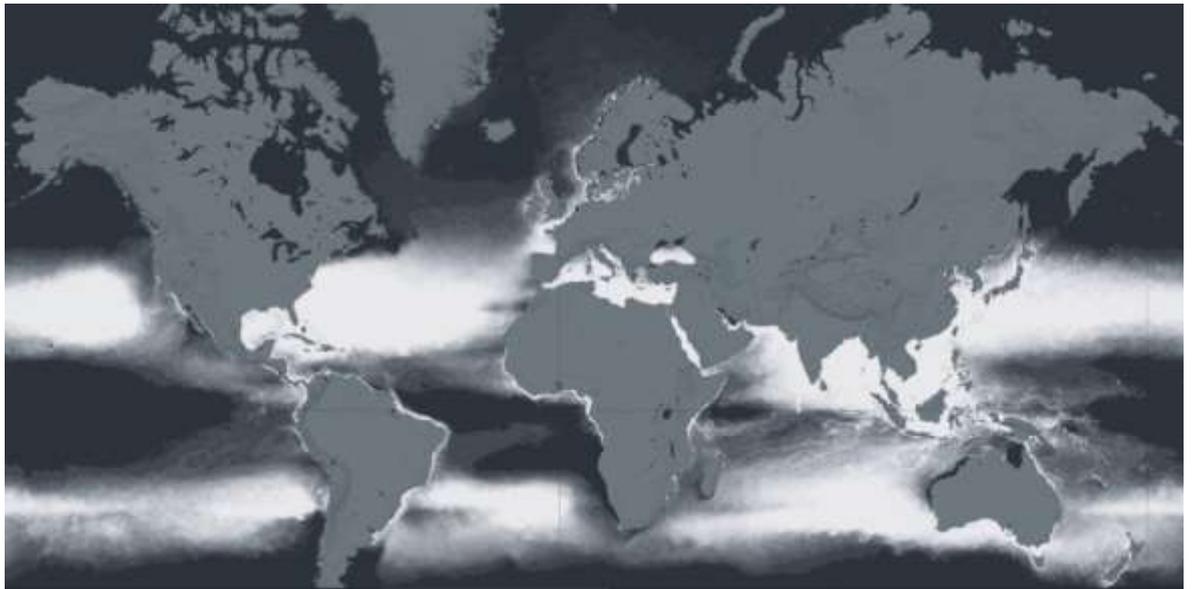


Рисунок 1 – Распространение пластика в Мировом океане, рассчитанное с помощью числовой модели по данным различных экспедиций с 2007 по 2013 гг.

Морской мусор можно классифицировать по размеру [36]: от совсем маленьких частиц в 1 мкм до кусочков в несколько сантиметров. Классификация морского мусора по размеру приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Размер морского мусора

Название фракции	Размер по наибольшему измерению
Мегапластик	>200 мм
Макропластик	>25 мм
Мезопластик	5 – 25 мм
Микропластик	< 5 мм
Нанопластик	1 мкм – 1 нм

Также морской мусор можно отличать по морфологии [4]: прямые или изогнутые синтетические нити (волокна), пленки и обломки пластика различной толщины и расцветки.

Источники микропластика в морской среде разнообразны и включают как прямое, так и косвенное попадание пластиковых частиц в океан. Их можно условно разделить на первичные и вторичные.

Первичные источники микропластика [5],[6]. Это микропластик, который изначально производится в виде мелких частиц (до 5 мм):

— Косметические и гигиенические средства: скрабы, зубные пасты, гели для душа с микропластиком (микрогранулами).

— Промышленные гранулы: используемые для производства пластмасс, они часто попадают в воду при транспортировке или производстве.

— Синтетические текстильные волокна: стиральные машины стирают микроволокна из синтетической одежды (полиэстер, нейлон) в канализацию.

— Автомобильные шины: износ шин приводит к образованию микрочастиц, которые попадают в реки и моря с дождевыми стоками.

— Краски и покрытия: частицы микропластика со временем осыпаются с кораблей, зданий и дорог.

Вторичные источники микропластика. Это результат разрушения более крупных пластиковых предметов под воздействием солнца, волн и механического износа [21],[33],[25]:

— Пластиковый мусор: пакеты, бутылки, тара и т. д., которые разлагаются на микропластик.

— Рыболовное снаряжение: сети, лески, буи, брошенные в море.

— Сточные воды: очищенные и неочищенные городские стоки, содержащие микропластик.

— Атмосферные осадки: микропластик переносится ветром и осаждается в море из атмосферы.

Несмотря на растущее внимание, уделяемое проблеме загрязнения морской среды микропластиком, масштабы и последствия этого явления еще не до конца поняты.

Проблематика этой темы охватывает несколько ключевых аспектов таких как отсутствие знаний об источниках и путях распространения микропластика и ограниченность данных о максимальной концентрации микропластика в различных акваториях. Не все источники микропластика в морской среде были идентифицированы и определены количественно. Местные источники, такие как стоки промышленных предприятий, городов и судоходства, особенно плохо

изучены. Отсутствие данных затрудняет оценку вклада различных факторов в общее загрязнение.

Изучение содержания микропластика в окружающей среде является важной частью целого ряда экологических, экономических и биомедицинских факторов. Например.

1. Глобальный масштаб проблемы. Микропластик содержится во всех водных объектах на Земле, от арктических льдов до глубин океана. Это стойкий загрязнитель, разлагающийся сотни лет и способный накапливаться в окружающей среде [29].

2. Воздействие на экосистему. Частицы микропластика поглощаются планктоном, рыбой, моллюсками и морскими птицами, нарушая питательную цепочку и баланс экосистемы. Они наносят физический ущерб, отравляют токсинами, накапливаются в организме и в конечном итоге могут воздействовать на человека через пищевую цепочку. Микропластик может вызвать механические повреждения, воспаление и в худшем случае гибель морских обитателей [38].

3. Угрозы здоровью человека. Микропластик содержится в питьевой воде, морепродуктах, соли и даже в воздухе. Его проникновение в организм человека вызывает воспалительные реакции, нарушения обмена веществ и токсические эффекты. Исследования показали наличие микропластика в крови, легких и плаценте человека [34].

Отмечается, что частицы пластика опасны из-за их способности накапливать в себе токсичные вещества, действуя как сорбент. Например, в образцах морского пластикового мусора были обнаружены такие загрязняющие вещества, как тяжелые металлы, ПХД (полихлорированные дифенилы), пестициды, ДДТ (дихлордифенилтрихлорэтан), алифатические и полициклические ароматические углеводороды. Концентрации этих веществ на поверхности пластиковых частиц значительно превышали фоновые концентрации в окружающей воде. Это доказывает способность пластика накапливать загрязняющие вещества [32].

4. Недостаточная изученность проблемы. До сих пор не существует единого метода анализа содержания микропластика в воде и биоте. Особенно плохо изучены последствия хронического воздействия микропластика на человека и экосистемы. В ряде регионов, включая российские воды, исследования только начинаются.

5. Правовое и нормативное регулирование. Результаты исследований необходимы для разработки экологических стандартов и политики обращения с отходами. ЕС и ООН разрабатывают инициативы по снижению загрязнения пластиком, требующие соответствующих научных исследований [20]. Европейский союз принял Постановление (EU) 2023/2055, запрещающее добавление микропластика в косметику и чистящие средства. В России эта проблема частично отражена в следующих документах:

— Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года (утв. Указом Президента РФ от 19.04.2017 № 176) [14];

— Национальный проект "Экология" (включает мероприятия по модернизации очистных сооружений) [13].

6. Экономические потери. Загрязнение морской среды микропластиком наносит ущерб рыболовству, туризму и водоснабжению, а необходимость очистки воды требует значительных затрат [23].

Основная проблема микропластика заключается в его повсеместном распространении и способности накапливаться в окружающей среде и живых организмах, не подвергаясь естественному разложению в течение сотен лет. Это делает микропластик устойчивым, токсичным и трудноудаляемым загрязнителем.

1.2 Физико-географическое описание Финского залива

Финский залив расположен в восточной части Балтийского моря и является самым восточным его заливом. Он омывает берега трех государств: России, Финляндии и Эстонии (рис.2).



Рисунок 2 – Географическая карта Финского залива Балтийского моря с указанием основных географических объектов, административных границ и крупных населенных пунктов

Длина залива около 400 км, ширина у входа Пысаспеа – Ханко – 70 км, на меридиане о. Мощный увеличивается до 130 км, а восточнее сужается до 20 км. Общая площадь водного зеркала 29700 км² (7% от общей площади Балтийского моря). Объем водной массы в заливе составляет 1120 км³ (5% от общего объема Балтийского моря). Средняя глубина в заливе 38 м, максимальная – 115 м. Водосборный бассейн – 421 тыс. км², приток воды в год составляет 109 км³, доля реки Невы – главной артерии – от всего поступления по рекам 70%. Часть Финского залива, расположенная к востоку от острова Гогланд, обычно называется восточной частью Финского залива, площадь водного зеркала которой составляет 12 500 квадратных километров, а объем водной массы - 276 км³. Максимальная глубина в этой части Финского залива достигает 60-65 м в районе острова Гогланд, с уменьшением глубины в восточном направлении [19].

Климат Финского залива умеренно морской, с переходом к континентальному в восточной части, формируется под влиянием западных ветров и арктических фронтов. В совокупности они вызывают значительные сезонные и межгодовые изменения климата. Средняя температура воздуха в июле составляет +16...+18 °С, в январе –6...–12°С. Для региона характерны частые циклоны, сильные ветра и высокий уровень осадков (до 700 мм в год).

Берега залива разнообразны по своему геологическому строению. Северные и северо-западные (Финляндия, Эстония) скалистые, с выходами кристаллических пород Балтийского щита. Южные и восточные берега более низкие, аллювиального происхождения и местами заболочены.

В регионе Санкт-Петербурга активно развиваются антропогенные ландшафты, включая намывные территории, порты, дамбы и набережные.

Процессы эрозии, намыва, заиливания и загрязнения оказывают значительное влияние на текущее состояние экосистем залива, особенно в районах с интенсивной экономической деятельностью [1].

1.2.1 Гидрология Финского залива

В районе Финского залива преобладают ветры западного, юго-западного и южного направлений. Ветер оказывает значительное влияние на Финский залив. В зависимости от скорости, направления и продолжительности ветра в заливе (а также в открытой Балтийском море) могут образовываться длинная волна, прибой, зыбь или сейши [2].

Восточная часть Финского залива представляет собой водный участок, в котором режим солености изменяется от пресноводного 0,2‰ на востоке к солоноватому 9‰ в западной части. Режим солености определяется течением впадающих в него рек, в первую очередь, реки Невы. В направлении с востока на запад, по мере уменьшения влияния речного стока, соленость воды в заливе увеличивается. Пресная вода распространяется в западном направлении по по-

верхности залива, а солоноватые воды в виде клина движутся в восточном направлении.

Основной вклад в пресноводный сток Финского залива вносит река Нева, которая обеспечивает около 70% всех запасов пресной воды. Реки Нарва, Луга и Кюмийоки также являются важными источниками поступающей воды. Годовой объем притока пресной воды оценивается в среднем в 70-80 км³.

В Финском заливе преобладает циклоническая циркуляция течений: с запада на восток в северной части и с востока на запад в южной. Иногда наблюдаются обратные течения, связанные с последствиями штормов и приливов воды из Балтийского моря.

В восточной части Финского залива, Невской губе, различают мелководные и глубоководные районы. Также Выборгский залив, глубоко вдающийся в побережье, Лужская и Копорская бухты рассматриваются как составляющие восточной части Финского залива Балтийского моря. Невская губа, мелководная зона и внутренняя глубоководная зона образуют устье реки Невы [16].

Одним из климатически значимых явлений являются штормовые нагоны, которые могут привести к повышению уровня воды в восточной части залива до 2,5 м, что создает угрозу наводнения в Санкт-Петербурге. Для защиты от подобных наводнений с 2011 года в Санкт-Петербурге действует противопаводковый комплекс (КЗС) [18].

1.2.2 Экологическое состояние восточной части Финского залива

Восточная часть Финского залива расположена в зоне активного антропогенного воздействия, которое связано с деятельностью города Санкт-Петербург, прибрежной промышленностью, транспортной инфраструктурой и сельским хозяйством Ленинградской области. Экологическое состояние акватории характеризуется стойкими признаками загрязнения, эвтрофикации и деградации экосистемы.

Основными источниками загрязнения в восточной части Финского залива являются сточные воды, сбрасываемые с недостаточной степенью очистки, а также поверхностные стоки из урбанизированных и сельскохозяйственных районов. Наиболее значимыми загрязнителями являются биогенные элементы (азот и фосфор), тяжелые металлы (ртуть, свинец, кадмий), нефтепродукты, микропластик и стойкие органические загрязнители. Содержание питательных веществ превышает нормативные значения, особенно летом, что способствует быстрому развитию фитопланктона и цветению воды [16].

Восточная часть Финского залива подвержена процессам эвтрофикации, особенно в районах со слабым течением. Массовое цветение сине-зеленых водорослей приводит к снижению содержания кислорода в воде, что угрожает биологическому разнообразию. Гибель рыбы и донных организмов сопровождается вторичным загрязнением, образованием сероводорода и деградацией донных сообществ [19].

В результате загрязнения уменьшается видовое разнообразие рыб, и преобладают виды, устойчивые к неблагоприятным условиям. Биологическое разнообразие планктона и бентоса также снижается. Радиационное состояние вод в целом стабильное, в последние годы не зафиксировано превышения естественного фона, но проводится регулярный мониторинг [42].

1.3 Микропластик в Финском заливе

Балтийское море и его окрестности являются одним из наиболее изученных морей в мире с точки зрения загрязнения морским мусором и микропластиком: исследования проводились здесь в течение последних десяти лет. Именно Финский залив является одним из наиболее уязвимых районов Балтийского моря с точки зрения загрязнения. Это связано с его географическим положением, относительно закрытой гидрологической системой и высоким уровнем антропогенной нагрузки. Проблема загрязнения микропластиком, попадающим

в залив из различных источников, стоит особенно остро. Наибольший вклад в изучение состояния акваторий Балтики вносит международная организация HELCOM.

HELCOM (ХЕЛКОМ) – это Хельсинкская комиссия по защите морской среды Балтийского моря, созданная для выполнения Хельсинкской конвенции (1974 г., обновлена в 1992 г.). В ее состав входят страны Балтийского региона и ЕС. Основной целью является предотвращение загрязнения и восстановление экосистемы Балтийского моря.

ХЕЛКОМ рассматривает такие вопросы как:

- мониторинг состояния моря;
- сокращение выбросов загрязняющих веществ;
- экологические программы и меры по устойчивому использованию ресурсов.

Организация регулярно публикует отчеты об экологическом состоянии Балтийского моря, включая загрязнение, биоразнообразие и эвтрофикацию.

По данным исследования HELCOM, концентрация микропластика в Финском заливе является одной из самых высоких в Балтийском регионе, особенно в восточной части, недалеко от Санкт-Петербурга, где сосредоточены крупные источники сточных вод, транспортных и промышленных выбросов [17].

Также в одном из отчетов ХЕЛКОМ (2014) представлен экспериментальный анализ содержания микропластика на очистных сооружениях сточных вод Санкт-Петербурга. Основным методом является фильтрация воды через каскад сеток с последующим микроскопическим анализом. Исследование показало, что эффективность удаления микропластика на очистных сооружениях превышает 95%, однако даже оставшиеся проценты частиц, с учетом общего объема сточных вод, образуют значительный выброс в водоемы. Основные типы частиц – текстильные волокна, синтетические и черные частицы [35].

Изучая имеющиеся исследования о состоянии Финского залива, можно заметить, что на данный момент гораздо больше данных имеется именно о за-

падной его части. Но, одно из недавних исследований «Картографирование путей распространения микропластика и зон его накопления в Финском заливе» (2024), выполненное с помощью гидродинамического моделирования, исследовало и восточную часть и показало следующие результаты. Самая высокая концентрация частиц наблюдается в восточной части залива, особенно в районах, прилегающих к дельте Невы. Основными "зонами накопления" являются Невская губа, акватория между Санкт-Петербургом и Кронштадтом, а также мелководье на южном побережье. На речные источники приходится до 76% общего объема микропластика. Концентрация микропластика в воде достигает до 3,2 частиц/л, а в донных отложениях до 1000 частиц/кг в восточной части залива [27]. На рисунке 3 показано содержание частиц ПЭТ (полиэтилентерефталат) в поверхностном слое воды.

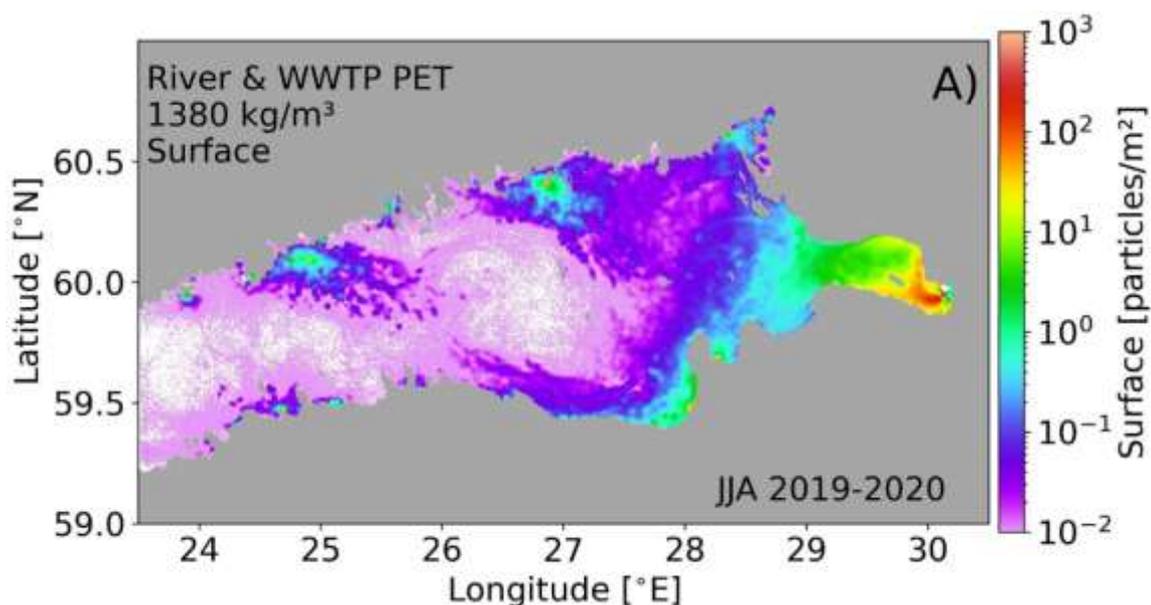


Рисунок 3 – Средняя пространственная концентрация частиц ПЭТ (20-500 мкм) в поверхностном слое воды в Финском заливе в летние месяцы 2019-2020 гг. [27]

На данном рисунке отражены источники поступления МП частиц из рек и сточных вод в летние месяцы. Сразу видно, что наибольшая концентрация загрязняющих частиц находится в Невской губе, что обусловлено впадением реки Невы в Финский залив и сбросом сточных вод с центральной системы водоот-

ведения города Санкт-Петербурга, а также густонаселенной жилой территорией.

По данным из различных отчетов по исследованиям содержания микропластика в воде, можно сделать вывод, что микропластик поступает в воды Финского залива из различных источников и в разных концентрациях. Основные источники и их доля в загрязнении вод представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Основные источники МП и их доля в загрязнении вод

№	Источник	Механизм поступления МП	Оценочный вклад, %
1	Поверхностный сток	Смыв МП с городских и промышленных территорий	30-40
2	Сточные воды	Сбросы с очистных сооружений, канализаций	20-30
3	Пластиковые отходы	Разложение пластика	15-20
4	Судоходство и порты	Выброс пластикового мусора, материалов	5-10
5	Атмосфера	Перенос в виде осадков, пыли	3-5

Таким образом, наибольший вклад в загрязнение водной среды микропластиком вносят именно стоки – речные и бытовые.

Методы моделирования загрязнения микропластиком являются ключевым инструментом для понимания процессов переноса, накопления и воздействия микропластика в морской среде. Самое известное масштабное исследование и гидродинамическое моделирование распространения пластикового мусора было проведено в период с 2007 по 2014 гг. группой ученых из различных стран [22]. В данной модели представлены результаты по всем океанам, морям и заливами, в том числе Балтийскому морю и Финскому заливу (рис.4).



Рисунок 4 – Распределение пластика (а) в Балтийском море, (б) в Финском заливе по данным моделирования за 2007-2014 гг. [22]

Анализируя данные модели, можно сказать, что наибольшее накопление микропластиковых частиц происходит на побережьях крупных городов, в зонах сброса сточных вод и стоков рек. И мы видим, что больше микропластиковых частиц как раз распространено в северной части залива, где большая плотность населения, Невская губа Финского залива огорожена системой защитных сооружений, поэтому ее в данное моделировании не включили.

Для восточной части Финского залива и Невской губы впервые модельная оценка распространения микропластика была описана в статье 2019 года «К оценке распространения микропластика в восточной части Финского залива» [10]. По полученным результатам сделан вывод о том, что основной источник микропластика Невской губы – стоки реки Невы. Наибольшая концентрация и аккумуляция происходит в северной прибрежной зоне. Оседание происходит за пределами Невской губы также в северной части.

Таким образом, Финский залив находится в зоне повышенного риска загрязнения микропластиком. Учитывая его близость, биологическое разнообразие и важность для населения, срочные меры по сокращению выбросов пласти-

ка и совершенствованию технологий очистки сточных вод являются приоритетными для регионального и международного руководства.

Глава 2 Материалы и методы исследования

2.1 Методы исследования

2.2 Исходные данные

Глава 3 Результаты исследования

3.1 Анализ содержания частиц микропластика в поверхностном слое восточной части Финского залива в 2024 г.

3.2 Сравнение результатов 2024 года с данными других исследований в Балтийском море

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы по теме "Загрязнение водной среды Финского залива микропластиком" были последовательно решены все поставленные задачи, что позволило достичь главной цели исследования — оценить уровень загрязнения микропластиком восточной части Финского залива в 2024 г.

На первом этапе работы была изучена проблема загрязнения морской среды микропластиком. Установлено, что микропластик является глобальным загрязнителем, оказывающим негативное воздействие на морские экосистемы и потенциально опасным для здоровья человека. Основными источниками микропластика в Финском заливе являются как первичные (текстильные волокна, косметика, промышленное сырье), так и вторичные (разложение пластикового мусора, износ орудий лова и судовых покрытий). Географические особенности залива — полузакрытая гидрология и высокая плотность экономической активности — способствуют его повышенной уязвимости к накоплению пластикового загрязнения.

Далее был проведен анализ методов изучения микропластика в морской водной среде. В работе используется методика отбора проб с использованием Манта-трала с размером ячейки 335 микрон и последующей лабораторной обработкой образцов (фильтрация, микроскопия и метод "горячей иглы"). Для повышения надежности результатов были использованы контрольные образцы.

Изучение физико-географических условий восточной части Финского залива показало, что эта акватория характеризуется низкой соленостью из-за влияния реки Невы, высокой антропогенной нагрузкой (сток, порты, промышленность) и выраженной способностью накапливать загрязняющие вещества в прибрежных районах, особенно в Невской губе. Было установлено, что гидродинамика и соленость влияют на поведение микропластика: менее плотные полимеры, такие как полиэтилен и полипропилен, оседают в основном в опресненных местах.

В рамках экспедиции 2024 года были отобраны и проанализированы пробы воды, что позволило определить количественные и качественные характеристики микропластика. Максимальные концентрации были зафиксированы на станциях № 28 и № 32 (0,086 частиц/м³), а нулевая концентрация - на станции № 34. Морфологически преобладали частицы судовой краски, пленки и фрагменты пластмассовых изделий. Основными цветами частиц являются зеленый, синий и прозрачный. Сравнение с результатами предыдущих лет показывает незначительное снижение концентраций микропластика по сравнению с 2016-2020 годами (ранее среднее значение составляло около 0,49 частиц/м³), что может быть связано как с сезонными особенностями, так и с воздействием мер по охране окружающей среды. Однако прибрежные районы, особенно вблизи устья реки Невы, остаются "горячими точками загрязнения".

Подчеркивается важность международного сотрудничества в рамках программ ХЕЛКОМ с целью унификации методов анализа и скоординированных действий по снижению уровня загрязнения Балтийского моря, а также проведения мониторинга на регулярной основе.

Таким образом, исследование подтвердило наличие загрязнения восточной части Финского залива микропластиком, причем основную массу загрязняющих веществ составляют отходы, связанные с судоходством.

Для минимизации загрязнения водной среды противообрастающими покрытиями рекомендуется использовать на современных судах различные инновационные методы защиты от биообрастания, которые будут заменять или сочетаться с традиционными. В данный момент к классическим методам защиты судов от обрастания относят оловоорганические соединения ТВТ, медьсодержащие краски. Итак, вместо токсичных соединений можно использовать силиконовые покрытия, создающие скользкую поверхность. Также в настоящее время особое внимание уделяется "зеленым" технологиям: ультразвуковой обработке, нанесению нанопокровов, биологически активным веществам морского происхождения. Эти методы эффективно предотвращают обрастание, миними-

зируя вред морской среде, что соответствует строгим международным экологическим стандартам ИМО и требованиям ЕС.

Полученные результаты подчеркивают актуальность комплексного подхода к решению проблемы, включающего научный мониторинг, внедрение инновационных технологий и экологически ориентированную политику.

Список литературы

1. Гидрология и экология Финского залива : материалы Международной конференции, Санкт-Петербург, 2021 г. — Санкт-Петербург : Издательство РАН, 2021. — 354 с.
2. Давидана И.Н. Экосистемные модели. Оценка экологического состояния Финского залива. Часть II. Гидрометеорологические, гидрохимические, гидробиологические, геологические условия и динамика вод Финского залива / И.Н. Давидана, О.П. Савчук. — Санкт-Петербург : Гидрометеоздат, 1997. — С. 150-449.
3. Ершова А.А. Методические рекомендации по обработке природных проб для выделения частиц микропластика / А.А. Ершова ; Российский государственный гидрометеорологический университет, Лаборатория исследования пластикового загрязнения природной среды "ПластикЛаб". — Москва : ПластикЛаб, 2021. — 34 с.
4. Ершова А.А. Пластиковое загрязнение Мирового океана : учебное пособие / А.А. Ершова, Т.Р. Ерёмкина. — Санкт-Петербург : РГГМУ, 2022. — 48 с. — ISBN 978-5-86813-561-3. — URL: <https://e.lanbook.com/book/338183> (дата обращения: 03.03.2025). — Текст : электронный. — Режим доступа: для авториз. пользователей.
5. Европейское агентство по окружающей среде. Пластмассы, экономика замкнутого цикла и окружающая среда Европы — приоритет для действий. — Люксембург : Издательство Европейского союза, 2021. — 112 с. — URL: <https://www.eea.europa.eu/publications> (дата обращения: 03.03.2025). — Текст : электронный.
6. Зубрицкий А.В. Микропластик в водной среде: источники, пути миграции и методы анализа / А.В. Зубрицкий // Вестник экологической безопасности. — 2021. — № 4. — С. 45-52.
7. Измеритель скорости течения 2030R/S с односторонним подключением [Электронный ресурс] // Институт технологий экологического развития

(ИТЕРА). — URL: <https://www.itera.spb.ru/katalog/gidrologicheskoe-i-okeanograficheskoe-oborudovanie/izmeriteli-skorosti/izmeriteli-skorosti-techeniya/izmeritel-skorosti-techeniya-2030rs-s-odnostoronnim-scepleniem> (дата обращения: 01.04.2025).

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

9. Манта-трал — устройство для отбора проб микропластика [Электронный ресурс] // Институт технологий экологического развития (ИТЕРА). — URL: <https://www.itera.spb.ru/katalog/gidrologicheskoe-i-okeanograficheskoe-oborudovanie/planktonnye-seti-i-planktonosborschiki/tral-manta> (дата обращения: 01.04.2025).

10. Мартьянов С.Д. Оценка распространения микропластика в восточной части Финского залива / С.Д. Мартьянов, В.А. Рябченко, А.А. Ершова [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2019. — Т. 12, № 4. — С. 32-41. — DOI: 10.7868/S207366731904004X.

11. Мидоренко Д.А. Мониторинг водных ресурсов / Д.А. Мидоренко, В.С. Краснов. — Тверь : Твер. гос. ун-т, 2009. — 50-55 с.

12. Пахомова С.В. Методы исследования загрязнения микропластиком природных вод: современное состояние и рекомендации / С.В. Пахомова, А.А. Ершова, И.А. Жданов, Е.В. Якушев // Океанологические исследования. — 2024. — № 52 (1). — С. 80-120. — DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).5.

13. Регламент (ЕС) 2023/2055 Европейской комиссии от 25 сентября 2023 года о запрете использования микропластика в потребительских товарах // Официальный журнал Европейского союза. — 2023. — L 238. — С. 1-25. — URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/2055> (дата обращения: 03.03.2025). — Текст : электронный.

14. Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года : утв. Указом Президента РФ от 19 апреля 2017 г. № 176 [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации. — URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения: 03.03.2025). — Текст : электронный.
15. Судходная защитная краска загрязняет моря микропластиком [Электронный ресурс] // Экосфера. — 2021. — 24 февраля. — URL: <https://ecosphere.press/2021/02/24/sudohodnaya-zashhitnaya-kraska-zagryaznyayet-morya-mikroplastikom/> (дата обращения: 02.06.2025).
16. Финский залив Балтийского моря [Электронный ресурс] / Невско-Ладожское бассейновое водохозяйственное управление. — URL: https://nordwestwater.ru/activities/water_objects/protection_activities/finnish_gulf/ (дата обращения: 28.03.2025). — Текст : электронный. — Режим доступа: свободный.
17. ХЕЛКОМ. Обзор существующих стратегий и исследований, связанных с микропластиком, в рамках проекта FanpLESStic-sea [Электронный ресурс] / Хельсинкская комиссия. — Хельсинки : HELCOM, 2021. — URL: <https://helcom.fi/report-on-microplastics-in-the-baltic-sea-provides-a-common-baseline-for-policy-makers-and-researchers/> (дата обращения: 28.03.2025). — Текст : электронный. — Режим доступа: свободный.
18. Шустров А.В. Климат и гидрология Балтийского региона: особенности и изменения. — Санкт-Петербург : ИСЗД, 2019. — 312 с.
19. Экологическое состояние и загрязнение водных объектов восточной части Финского залива / под редакцией А.И. Никитина. — Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 2021. — 148 с.
20. ЮНЕП. Морской пластиковый мусор и микропластик: глобальные уроки и исследования, вдохновляющие на действия и направляющие изменения в политике [Электронный ресурс] / Программа ООН по окружающей среде. — Найроби : ЮНЕП, 2016. — 120 с. —

URL: <https://www.unep.org/resources/report> (дата обращения: 03.03.2025). — Текст : электронный. — Режим доступа: свободный.

21. Dris R. Synthetic fibers in atmospheric precipitation: the source of microplastics in the environment? / R. Dris // *Bulletin of Marine Pollution*. — 2016. — Vol. 104, no. 1-2. — P. 290-293.

22. Eriksen M. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea / M. Eriksen, L.C.M. Lebreton, H.S. Carson [et al.] // *PLoS ONE*. — 2014. — Vol. 9, no. 12. — Art. e111913. — DOI: 10.1371/journal.pone.0111913.

23. GESAMP. Sources, fate and impact of microplastics in the marine environment: a global assessment [Electronic resource] : [IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection] // *GESAMP Reports and Studies*. — 2015. — No. 90. — URL: <http://www.gesamp.org/publications/reports-and-studies-no-90> (accessed: 03.03.2025). — Text : electronic. — Access mode: free.

24. Golubeva E.A. Microliterature distribution on the sandy beaches of the Neva Bay of the Gulf of Finland (Baltic Sea) in 2018-2022 / E.A. Golubeva, A.A. Yershova // *CIWO 2023: Sound and Sustainable Planning for Cities and Regions : Conference Proceedings*. — Cham : Springer, 2023. — P. 404-411. — (Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences). — ISBN 978-3-031-47850-5. — DOI: 10.1007/978-3-031-47851-2_49.

25. Jambeck J.R. The ingress of plastic waste from land into the ocean / J.R. Jambeck, R. Geyer, S. Narayanan // *Science*. — 2015. — Vol. 347, no. 6223. — P. 768-771. — DOI: 10.1126/science.1260352.

26. Masura J. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for the quantitative determination of synthetic particles in water and sediments / J. Masura, J. Baker, G. Foster [et al.]. — Silver Spring : NOAA, 2015. — 39 p. — (NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R; 48). — URL: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/10296> (дата обращения: 03.03.2025). — Текст : электронный.

27. Mishra A. Mapping of microplastic transport routes and accumulation zones in the Gulf of Finland of the Baltic Sea — modeling results / A. Mishra, E. Sichert, G. Wahl, T. Lieblík, N. Bukhkhalko, U. Lips // *Frontiers in Marine Science*. — 2025. — Vol. 11. — Art. 1524585. — DOI: 10.3389/fmars.2024.1524585.

28. Mishra A. Spatialtemporal variability of microplastics in the eastern part of the Baltic Sea [Electronic resource] / A. Mishra, N. Bukhkhalko, K. Lind [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. — 2022. — Vol. 9. — Art. 875984. — DOI: 10.3389/fmars.2022.875984. — (accessed: 03.06.2025). — Text : electronic. — Access mode: free.

29. Obbard R.W. Global warming is releasing microplastics frozen in the ice of the Arctic Ocean / R.W. Obbard // *The Future of the Earth*. — 2014. — Vol. 2, no. 6. — P. 315-320.

30. Pojar I. Pollution of the marine environment by microplastics: a review of sources, cases of occurrence and consequences [Electronic resource] / I. Pojar, L. Wicher // *Marine Environmental Research*. — 2020. — Vol. 162. — Art. 105110. — DOI: 10.1016/j.marenvres.2020.105110.

31. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution / S.B. Borrelle [et al.] // *Science*. — 2020. — Vol. 369, no. 6510. — P. 1515-1518. — DOI: 10.1126/science.aba3656.

32. Rochman C.M. Long-term sorption of metals is similar among plastic types: implications for plastic debris in aquatic environments / C.M. Rochman, B.T. Hentschel, S.J. Teh // *PLoS ONE*. — 2014. — Vol. 9, no. 1. — Art. e85433. — DOI: 10.1371/journal.pone.0085433.

33. Rochman K.M. Once in the body, plastic transports dangerous chemicals into the body of fish and causes stress in the liver / K.M. Rochman // *Scientific Reports*. — 2013. — Vol. 3. — Art. 3263. — DOI: 10.1038/srep03263.

34. Smith M. Microplastics in seafood and its effect on human health / M. Smith // *Current Environmental Health Reports*. — 2018. — Vol. 5, no. 3. — P. 375-386. — DOI: 10.1007/s40572-018-0206-z.

35. Talvitie J., Heinonen M. Preliminary study of synthetic microfibers and particles in urban wastewater treatment plants [Электронный ресурс] / J. Talvitie, M. Heinonen. — Хельсинки : Baltic Sea Environmental Protection Commission — HELCOM, 2014. — 30 p.
36. Thompson R.C. Lost at sea: where is all the plastic? / R.C. Thompson, Y. Olsen, R.P. Mitchell [et al.] // Science. — 2004. — Vol. 304. — P. 838. — DOI: 10.1126/science.1094559.
37. Winczek M. Microplastic Pollution of the Vistula Lagoon and Baltic Sea: a Comparison Study [Electronic resource] / M. Winczek, J. Romanowski, A. Radwańska [et al.] // Environmental Pollution and Management. — 2025. — ISSN 2950-3051. — DOI: 10.1016/j.epm.2025.05.001.
38. Wright S.L. Physical effects of microplastics on marine organisms: an overview / S.L. Wright // Environmental Pollution. — 2013. — Vol. 178. — P. 483-492. — DOI: 10.1016/j.envpol.2013.02.031.
39. Microplastics in seagrass meadows: new Estonian research sheds light on pollution [Electronic resource] // Research in Estonia. — 2021. — 10 August. — URL: <https://researchinestonia.eu/2021/08/10/7165-2/> (accessed: 03.06.2025). — Text : electronic. — Access mode: free.
40. Microplastics in the Baltic Sea: how much and where? [Electronic resource] // Research in Estonia. — 2021. — 10 August. — URL: <https://researchinestonia.eu/2021/08/10/7165-2/> (accessed: 03.06.2025). — Text : electronic. — Access mode: free.
41. Sailing Seas of Plastic [Electronic resource]. — URL: <https://app.dumpark.com/seas-of-plastic-2/> (дата обращения: 03.03.2025).
42. HELCOM. The state of the Baltic Sea is the Second comprehensive HELCOM assessment for 2011-2016 [Электронный ресурс] = Состояние Балтийского моря: Вторая комплексная оценка ХЕЛКОМ за 2011-2016 гг. / Хельсинкская комиссия. — Хельсинки : HELCOM, 2018. — URL: <https://helcom.fi/baltic-sea-trends/holistic-assessments/state-of-the-baltic-sea-2018/> (дата обращения: 28.03.2025). — Текст : электронный. — Режим доступа: свободный.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Исходные данные по сборам проб

№ пробы	Дата и время начала/конца траления	№ станции АО ИО РАН	N	E	Показания счетчика	Разница	Дистанция, м	Объем, м3	Ветер, м/с	Глубина	Волна, м	T, С°	S, ‰
25	03.09.2024 21:39	68025		26 46'52"	288604				0	56	0	19,66	4,51
	03.09.2024 21:54		60°02'27"	26°46'44"	323772	35168	945	85					
26	04.09.2024 9:08	68026	60°06'06"	27°13'36"	323778				5	48	0,5	18,59	4,66
	04.09.2024 9:24		60 06'18"	27 14'19"	347147	23369	628	56					
27	04.09.2024 10:41	68027	60°07'02"	27°22'56"	323780				3	53	0,5	19,47	4,23
	04.09.2024 10:57		60 07'12"	27 23'33"	375376	51596	1387	125					
28	04.09.2024 14:00	68028	60°07'49"	27°43'14"	375376				2	43	0,5	18,81	4,06
	04.09.2024 14:15		60 08'04"	27 44'57"	415085	39709	1067	96					
29	04.09.2024 16:09	68029	60°07'08"	28°04'03"	415087				2	46	0,5	20,34	4,03
	04.09.2024 16:24		60 07'37"	28 04'56"	456396	41309	1110	100					
30	04.09.2024 19:11	68030	60°04'51"	28°32'32"	456399				2	25	0,5	19,91	3,47
	04.09.2024 19:25		60 04'07"	28 32'47"	500679	44280	1190	107					
32	05.09.2024 11:35	68032	60°06'01"	28°57'02"	500686				1	30	0,5	19,58	2,91
	05.09.2024 11:50		60 05'20"	28 57'18"	534074	33388	897	81					
33	05.09.2024 13:46	68033	60°03'12"	29°07'38"	534090				3	23	0,5	19,82	0,85
	05.09.2024 14:01		60 03'11"	29 09'00"	570262	36172	972	87					
34	05.09.2024 16:52	68034	60°00'23"	b	570265				4	23	0,5	20	0,77
	05.09.2024 17:08		60°00'39"	28°59'35"	596127	25862	695	63					

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.2 – Исследуемые пробы после пробоподготовки

№ пробы	Фотография пробы	Описание пробы
25		<p>Рыба, насекомые, личинки, водная растительность.</p> <p>Выделенные частицы: пленки, судовая краска, потенциальный МП.</p>
26		<p>Перо, тростник,</p> <p>Выделенные частицы: пленка, фрагмент МП, потенциальный МП.</p>
27		<p>Перья, водная растительность, мальки, насекомые, личинки.</p> <p>Выделенные частицы: пленка, потенциальный МП.</p>

28		<p>Перья, насекомые, личинки, семена.</p> <p>Выделенные частицы: пленки, фрагменты МП, потенциальный МП.</p>
29		<p>Перья, насекомые, водная растительность.</p> <p>Выделенные частицы: пленки, фрагменты МП, потенциальный МП.</p>
30		<p>Перья, веточки, водоросли, рыбки, насекомые, личинки.</p> <p>Выделенные частицы: пленки, судовая краска, фрагмент МП.</p>

32		<p>Тростник, перья, водная растительность, насекомые, семена.</p> <p>Выделенные частицы: фрагменты МП, проволока, пленка, потенциальный МП.</p>
33		<p>Тростник, перо, насекомые.</p> <p>Выделенные частицы: фрагмент МП.</p>
34		<p>Тростник</p>

