



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

На тему «Исследование механизмов распределения микропластика в акватории Невской губы »

Исполнитель Миронова Дарья Владимировна

Руководитель кандидат географических наук, доцент

Ершова Александра Александровна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук, доцент

Дроздов Владимир Владимирович

«__» _____ 2022 г.

Санкт-Петербург

2022

Оглавление

Оглавление.....	2
Введение.....	3
Глава 1. Описание предмета и объекта исследования	5
_1.1 Проблема микропластика в Мировом океане	5
__1.1.1 Мониторинг микропластика в водной среде	9
_1.2 Физико-географическая Характеристика Невской губы Финского залива.....	12
__1.3 Микропластик в Балтийском море и Финском заливе.....	14
Глава 2. Материалы и методы исследования	22
_2.1 Методы исследования.....	22
__2.1.1 Выбор средней скорости гравитационного оседания	27
_2.2 Описание исходных данных	28
Глава 3. Анализ полученных результатов	32
_3.1 Результаты моделирования и сравнение с данными наблюдений. 32	
_3.2 Рекомендации по снижению поступления микропластика в окружающую среду.....	40
Заключение	44
Список использованных источников	46

Введение

На сегодняшний день пластик нашел применение во всех сферах нашей жизни благодаря широкому спектру его характеристик. Он может обладать различными качествами, которых нет у натуральных материалов. Пластик незаменим в различных секторах экономики. Это и упаковка пищевых продуктов, текстильная промышленность, медицина, электроника и даже строительство [1].

Пластик универсален, долговечен и прочен. Он обладает низкой плотностью и высоким электрическим сопротивлением. Также он устойчив к воздействию многих химикатов.

Но его долговечность имеет и обратную сторону. Пластик составляет от 50% до 90% всего морского мусора [1]. Численность населения планеты неуклонно растет и вместе с этим увеличивается потребление. Современный образ жизни нераздельно связан с большим количеством товаров одноразового пользования. Легкая и практичная одноразовая пластиковая посуда и упаковка является одним из главных источников мусора.

Балтийское море имеет ряд особенностей, обуславливающих низкую устойчивость его экосистемы к внешним воздействиям. Это очень мелководное море, имеющее низкую соленость. Кроме того, оно сообщается с океаном лишь несколькими довольно узкими проливами. Как следствие, скорость очищения вод довольно низкая. Невская Губа подвержена мощной антропогенной нагрузке. Частицы микропластика, постоянно прибывающие со стоком рек и очистных сооружений в акваторию Невской Губы вследствие медленного очищения воды могут значительно повлиять на экосистему Балтийского моря. А от её состояния напрямую зависит санитарно-эпидемиологическая обстановка в г. Санкт-Петербурге и Ленинградской области, их рекреационный потенциал.

В связи с этим целью настоящей работы является изучение механизмов распространения частиц микропластика в Невской губе и в восточной части Финского залива, предположительно поступающего со стоком Невы в условиях, приближенных к реальным гидродинамическим показателям. В качестве средств используется высокоразрешающая численная модель распространения частиц микропластика и данные мониторинга загрязнения побережья пластиковым мусором. Численная модель основана на Принстонской Модели Океана и предоставлена лабораторией моделирования океанских бигеохимических циклов Санкт-Петербургского филиала института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Также данное исследование позволит определить влияние речного стока и циркуляции вод на формирование областей повышенной концентрации пластика в прибрежной зоне и его аккумуляции в осадочных отложениях водоёмов лагунного типа, к которым относится Невская губа и примыкающая часть Финского залива.

Для выполнения цели был поставлен ряд задач:

- 1) Изучить понятие микропластика, выяснить его влияние на водные экосистемы, произвести обзор научных публикаций по этой теме;
- 2) Охарактеризовать объект исследования – Невскую губу Финского залива;
- 3) Изучить имеющиеся данные по мониторингу микропластика в акватории Невской губы;
- 4) При помощи численного моделирования воспроизвести картину распространения частиц микропластика в акватории Невской губы;
- 5) Результаты расчетов сравнить с данными наблюдений, проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Глава 1. Описание предмета и объекта исследования

1.1 Проблема микропластика в Мировом океане

Микропластиком принято называть частицы пластика диаметром менее 5 мм. Эти вещества созданы искусственно и не должны находиться в природной среде – различные пластмассы, синтетические волокна и резины. Самые распространенные его виды – полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид, полиэтилентерефталат. Такие вещества получают при помощи реакции полимеризации и поликонденсации из низкомолекулярных веществ, образованных из нефти, природного газа и угля [2].

Пластиковые фрагменты классифицируются по размеру на макропластик (более 200 мм.), мезопластик (5 – 200 мм.), крупный микропластик (1,01 – 4,99 мм.), мелкий и микропластик (менее 1 мм.) [3].

Выделяют два вида микропластика: первичный и вторичный. Рассмотрим подробнее их источники.

Первичный микропластик попадает в водные объекты в виде пластиковых гранул и мелкодисперсных порошков. Это происходит из-за потерь сыпучего сырья при транспортировке и на производствах. Также к этому виду относятся частицы пластика, содержащиеся в различных косметических средствах: эксфолиантах, абразивах; специализированных медицинских пастах и абразивах; промышленных абразивах; частицы из моющих средств; частицы полимерных буровых растворов, а также волокна, образующиеся при стирке синтетических тканей [4].

Вторичный микропластик поступает в окружающую среду при выбрасывании пластиковых отходов, их потере при транспортировке, сносе с полигонов, свалок и перерабатывающих предприятий. Основными источниками такого рода микропластика являются предприятия, специализирующиеся на изготовлении изделий из пластика, водоочистные

сооружения и предприятия, связанные с обращением с ТКО. Сельское хозяйство также вносит вклад в образование микропластика: пластиковое мульчирование, полимерные добавки для почвы. В ходе эксплуатации различных товаров происходит их истирание с образованием микропластика. К ним относятся некоторые средства гигиены, синтетический текстиль, автомобильные покрышки, краски, геосинтетические материалы, различные пластиковые бытовые приборы, бумага с покрытием и ламинированная бумага. Вторичный микропластик попадает в моря при потерях пластмасс с различных судов. В его роли может выступать как утерянный груз, так и утерянное/выброшенное орудие лова. Также частицы пластика сносятся в моря при наводнениях, штормах и иных природных явлениях.

Стоит отметить сложность подсчета количества поступающего в окружающую среду микропластика. Его источниками могут быть как промышленные предприятия, так и выбросы на различных стадиях жизненного цикла товаров. И если выбросы от предприятий можно нормировать и регулировать, то с остальным объемом микропластика следует бороться путем очистки сточных вод и водных объектов, изменением структуры потребления изделий из пластика.

Микропластик наносит значительный ущерб множеству отраслей: судоходству, туризму, рыболовству и аквакультуре. Из-за него усиливается процесс деградации среды обитания, ставится под угрозу существование множества видов морских обитателей и птиц. [5].

Проблема в том, что микропластик состоит из крайне устойчивых к биодegradации соединений. Это обусловлено их гидрофобностью и высокой молекулярной массой. Существуют микроорганизмы способные разлагать пластик. Так существует ряд бактерий способных вырабатывать более 30 ферментов способные разлагать 10 видов пластика [6]. Также в 2016 году в Японии был найден вид жуков, способных успешно переваривать пластик. Фермент, полученный в результате изучения этого животного способен

разрушать пластиковые бутылки. Позднее сообщалось об его усовершенствовании, новый фермент разлагает пластик в разы быстрее. Ученые из Германии открыли микроорганизмы способные разрушать пластик за несколько часов. Также в 2021 году в Австрии был открыт штамм бактерий, способных разлагать пластик внутри желудков коров [6].

Но процессы биодegradации протекают слишком медленно. Количество пластика в Мировом океане неуклонно возрастает. Кроме того, некоторые пластики содержат антиоксиданты, пластификаторы, красители, ингибиторы горения, стабилизаторы, способные нанести вред поглощающим их организмам. Эти вещества добавляются при производстве некоторых изделий из пластика для придания ему необходимых свойств.

Микропластик служит комфортным субстратом для организмов – обитателей. При этом он может переноситься на значительные расстояния, что приводит к большему количеству инвазивных видов. Это явление способно разрушить хрупкий баланс экосистем, в которых наличие твердого плавучего субстрата встречается редко [7].

Также серьезные опасения вызывает включение микропластика в рацион питания различных организмов. К сожалению, частицы микропластика имеют по размеру схожи с пищей множества видов морских обитателей. Имея разную плотность частицы могут оседать на дно или плавать во всей толще воды, где их могут поглощать различные виды организмов. Так, микропластик уже был обнаружен в пищевых трактах птиц, рыб, водных млекопитающих, ракообразных и моллюсков. В то время как мезо- и макропластик часто напрямую воздействуют на более крупные организмы, микропластик в морской среде напрямую влияет на ракообразных, мидий, рыб и планктон [8]. Так, было показано, что некоторые виды беспозвоночных поглощают микропластик, принимая их за свою естественную добычу из-за сходства формы, размера и цвета, например, принимая их за планктон [9]. Заглатывание неперевариваемых частиц микропластика может привести к физиологическим

нарушениям во рту и в желудочно-кишечном тракте, может привести к разрыву стенок желудка. Часто поедание пластика приводит к кишечной непроходимости. Также частицы пластика в желудке способны вызывать у животных чувство ложного насыщения, приводящее к уменьшению потребления питательных веществ, голоданию и смерти. [10].

Также частицы пластика опасны тем, что они могут накапливать в себе токсичные вещества, выступая в роли сорбента. Так, в образцах пластикового морского мусора были обнаружены такие загрязнители, как тяжелые металлы, ПХБ (полихлорированные бифенилы), пестициды, ДДТ (дихлордифенилтрихлорэтан), алифатические и полициклические ароматические углеводороды. Концентрации данных веществ на поверхности частиц пластика значительно превышали фоновые концентрации в окружающей их воде. Это доказывает способность пластика к аккумуляции загрязняющих веществ [11].

Такие загрязнители, как ПХБ и ДДТ известны своим пагубным воздействием на эндокринную систему и губительным воздействием на внутриутробное развитие. Существует ряд исследований, доказывающих попадание токсичных веществ в пищевую цепь при поедании пластикового мусора. При изучении черноногих альбатросов с кораллового острова Мидвэй уровень загрязнения в их жировых тканях превышал уровень вызывающий необратимые изменения в организме. В образцах их крови были обнаружены ДДТ, ПХБ, соединения ртути и хлорпроизводных.

Попадает микропластик и в организм человека. Так, пластиковые частицы и химикаты, применяемые при их производстве, были обнаружены в крови, фекалиях, моче и даже плаценте человека [12].

Из этого следует неутешительный вывод о том, что поедание микропластика приводит к его включению в пищевые цепи. По мере повышения уровня консументов значительно повышается и количество потребляемого пластика. Следовательно, микропластик может попадать и в

организм человека. Но не смотря на множество проведенных исследований, у науки на сегодняшний день нет конкретного понимания того, какой вред наносит микропластик морским экосистемам.

1.1.1 Мониторинг микропластика в водной среде

Мониторинг микропластика в море начал проводиться в 1970-х годах. Тогда начали собирать информацию о плотности замусоривания. Эти данные собираются путем визуального наблюдения с кораблей. В некоторых случаях наблюдения ведутся со спутников или с воздушных судов. В основном такие методы применяются для оценки ущерба от природных катастроф. Например, землетрясение и цунами в северном Тихом океане в 2011 в Тохоку [13].

Взятие проб микропластика.

Для взятия проб микропластика используются сети, изобретенные для взятия проб планктона и бентоса. Пример сети для взятия проб с толщи воды представлен на рисунке № 1.1.



Рисунок 1.1 – Буксируемая сеть “манта” для взятия проб микропластика с поверхности воды [14].

Также могут быть использованы нейстонные сети (рисунок 1.2 а) или фильтровальные установки, через которые пропускается необходимый объем воды. Сети могут иметь различные размеры ячеек (от 0,053 до 3 мм), самый распространенный размер ячеек – 330 мкм. Размер применяемых сетей изменяются от 0,03 до 2 м². Меньшие сети необходимы соответственно для меньших размеров частиц.

Из схожих сетчатых фильтров состоят также фильтровальные установки и проточные системы фильтрования. Последние применяются в основном для взятия проб из речных вод.

Для взятия проб микропластика из морской воды не обязательно применять тралы, это можно сделать и на берегу. При этом могут быть использованы ручные сети и фильтры с более мелким размером ячеек, что позволяет исследовать более мелкие фракции микропластика. В этом случае пробы воды необходимого объема отбираются на глубине не менее 0,5 метра.

Если пробы микропластика необходимо взять с определенной глубины применяются батометры (рисунок 1.2 б).

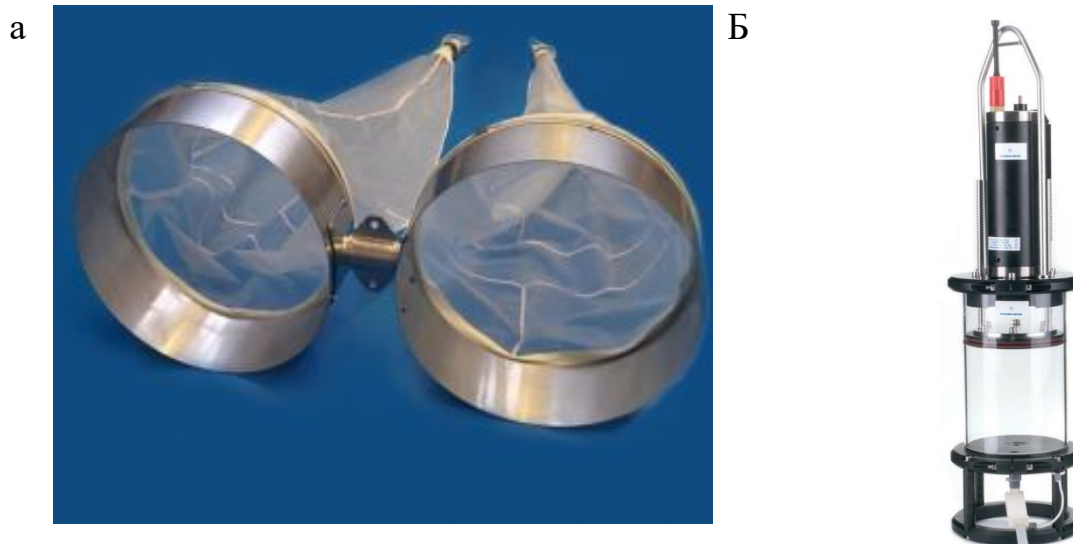


Рисунок 1.2 – Приборы для отбора проб микропластика из воды (а) нейстонная сеть, (б) батометр [13].

Батометры представляют из себя герметичные цилиндрические сосуды с клапанами-кранами, позволяющими закрыть прибор отобрав пробу воды на определенной глубине [13].

Результатами взятия таких проб обычно служат количество частиц или их масса сухого веса на объем воды или на площадь поверхности отфильтрованной воды (ед./м², ед./м³, г/м², г/м³). Сравнительно новым методом является фильтрация морской воды на борту. Этот способ не требует снижать скорость судна для забора проб, также позволяет отфильтровывать частицы меньшего размера [14].

Для отбора проб микропластика из воды лаборатория PlasticLabРГГМУ использует пробоотборник. Он представляет собой цилиндрическую емкость со съемной секцией внизу. Отобранная на глубине 1 м. проба воды пропускается через фильтры, расположенные в пробоотборнике насосом.

Обработка проб микропластика.

Сначала полученный после просеивания материал высушивается с целью определения массы твердого вещества. Затем при помощи перекиси водорода в присутствии катализатора – Fe(II) производится растворение органических веществ. Далее в пробе остается только неорганический материал. При помощи флотации в растворе NaCl частицы пластика отделяются от оставшихся примесей. Далее частицы собирают на фильтр, сушат и отделяют с помощью микроскопа.

Для получения значений концентрации микропластика в пробах воды его взвешивают либо подсчитывают количество частиц при помощи микроскопа. Для идентификации различных видов пластика в пробах применяются следующие методики:

1. Пиролизная ГХ–МС позволяет определить химический состав частиц посредством анализа продуктов их сгорания. Их сравнивают с образцами известного состава. Однако учитывая то, что каждую

частицу приходится исследовать отдельно этот метод является весьма трудоемким.

2. ИК-спектметрия основана на сравнении ик-спектров поглощения и пропускания образцов микропластика с ранее известными спектрами различных полимеров. При этом возникают трудности, связанные с размером исследуемых частиц. Решаются они путем комбинации данного метода с микроскопией.
3. Рамановская спектроскопия (Ramanscattering) не требует пробоподготовки и позволяет определить тип полимера для сверхмалых частиц размером вплоть до микрометров. Данный метод отличается от ИК-спектметрии применением неупругого рассеяния излучения на молекулах. Длина волны при этом изменяется [13].

1.2 Физико-географическая Характеристика Невской губы Финского залива

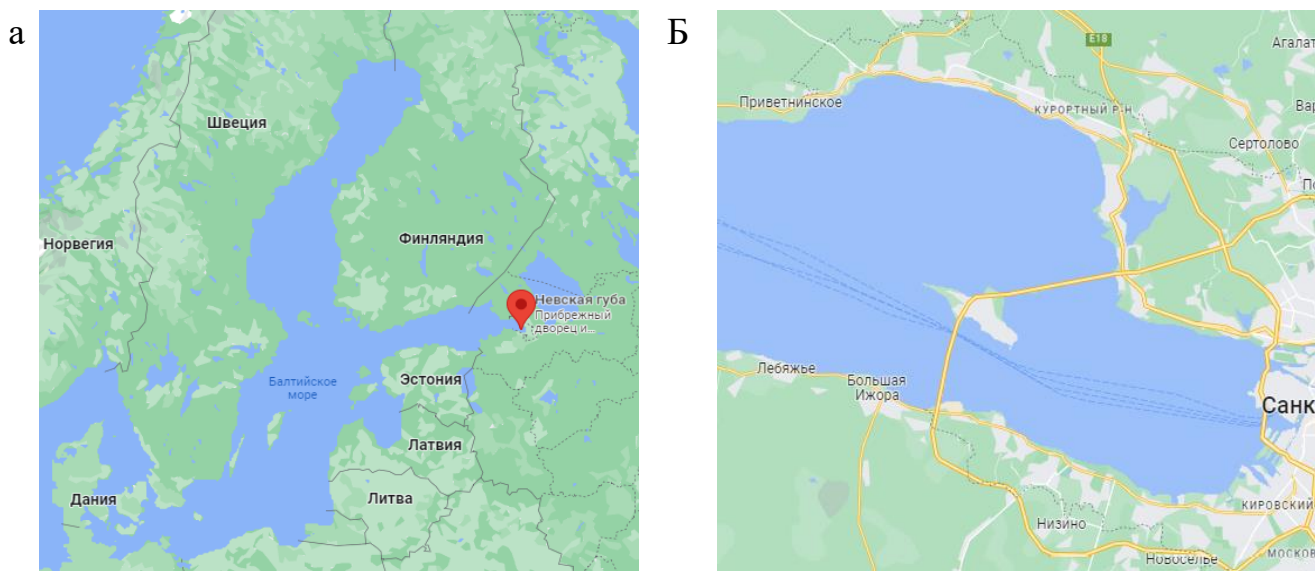


Рисунок 1.3 – Карта Балтийского моря (а), карта Невской губы Финского залива Балтийского моря (б) [15].

Невская губа – это западный участок Финского залива Балтийского моря (рисунок 1.3). Его восточная граница проходит по рукавам «псевдodelьты» р. Нева, а западная по створам комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга. С остальной частью Финского залива Невская губа сообщается через два узких пролива: Северные и Южные ворота [16].

Невская Губа является изолированным проточным водоемом. Она отделена от остальной части Финского залива комплексом защитных сооружений Санкт-Петербурга (КЗС) – дамбами, ограждающими город от наводнений. Площадь водного зеркала составляет 380 км², объем воды – 1,2 км³. Средняя глубина Невской Губы -3,0 м. Течения в Невской губе разнообразны: из-за неровностей берега в условиях стоковых течений формируются отдельные застойные зоны. Они легко разрушаются при стоково-ветровых течениях, при которых нередко образуется нагонная волна и даже градиент уровня воды. Средние скорости течений в северной части губы варьируются от 6 до 8 см/с, а в южных частях от 1 до 5 см/с. [16].

На востоке в Невскую Губу впадают рукава реки Невы. Также в неё впадает 8 рек, крупнейшие из них это Стрелка, Дудергофка и Шингарка. Они питают её пресной водой. Наличие комплекса защитных сооружений и естественных преград значительно затрудняет водообмен с остальным Финским заливом. Это означает большую защищенность от ветровых волн, исходящих из залива, опресненность вод и более низкую скорость их очистки [17].

Климат исследуемой территории умеренный с избыточным увлажнением, промежуточный между континентальным и морским. Определяющую роль играют Атлантические воздушные массы. Превалируют циклоны, в основном дуют западные, юго-западные и южные ветры. Среднегодовая сумма осадков составляет около 600 мм при испаряемости 250 мм. Зимы умеренно теплые, средняя температура воздуха февраля -5,8°С. Лето мягкое, средняя температура воздуха июля составляет +18,8°С.

Донные отложения Невской губы также разнообразны. Грубообломочные отложения составляют 15% площади дна. Они распространены в районах Лисьего носа, о. Котлин, отдельными пятнами вдоль южного побережья. К ним относятся валунные, валунно-галечные, гравийные и гравийно-галечные отложения. Глубина распространения грубообломочных отложений составляет 0 – 4 м. Большая же часть донных отложений представлена различными песками. Они имеют различный гранулометрический состав, их мощность чаще всего составляет 0,05 – 0,10 м, иногда доходит до 0,25 м. Под песками залегают более древние плотные глинистые отложения [16].

Биоценозы Невской губы сформированы при значительном влиянии антропогенного воздействия: строительство комплекса защитных сооружений, загрязнение промышленными и бытовыми стоками, активное судоходство, дноуглубительные работы [16]. Как и многие другие эстуарии Балтийского моря восточная часть Невской губы характеризуется отсутствием приливной активности, мелководностью и активным ветровым перемешиванием водных масс. Водные массы солоноватые, имеют значительную дифференциацию биотических и абиотических параметров. Это обусловлено накоплением гуминовых веществ и различными значимыми физическими факторами. Биоценозы Невской губы восприимчивы к эвтрофированию и загрязнению [17].

1.3 Микропластик в Балтийском море и Финском заливе

Экосистема Балтийского моря способна накапливать и длительное время удерживать различные загрязнители и поэтому является уязвимой для антропогенного воздействия. Это связано не только с медленным водообменом, но и с высокой антропогенной нагрузкой. Территория

водосбора Балтийского моря в четыре раза больше его площади. На его территории проживает около 85 млн. человек [18].

В ряде работ было рассмотрено взаимодействие загрязнения микропластиковыми частицами с морской фауной Балтийского моря. Так, пластик был обнаружен в пищевых трактах рыб. Также частицы микропластика поглощают 9 из 11 видов беспозвоночных животных, рассмотренных в эксперименте [18].

Стоит отметить, что концентрации пластиковых частиц в воде и грунтах прибрежной зоны довольно изменчивы. Самым стабильным показателем считается концентрация микропластика в донных отложениях. Именно по ней можно судить о долгосрочной динамике загрязнения водной среды. Они выступают в роли депонирующей среды, то есть в них происходит накопление осаждающихся частиц микропластика. Этот процесс связан с нарастанием биопленки на поверхности частиц пластика. Биопленка состоит из микроорганизмов, гумусовых веществ и детрита.

Основными источниками микропластика в Балтийском море являются выпуски водоочистных сооружений. Впервые содержание пластиковых частиц в воде Балтийского моря было оценено в Швеции в 2007 году и концентрации составили от 80 до 2400 ед./м³. В рамках программы обязательного мониторинга Хельсинкской комиссии данное исследование проводится с 2009 года [18].

Однако следует отметить, что доля микропластика, попадающего в морские экосистемы из станций очистки воды составляет 0,1% от общей массы всего пластикового мусора, попадающего в них. Однако именно микропластик представляет особую опасность из-за своей биодоступности и способности сорбировать из сточных вод различные фармацевтические препараты и токсические вещества. Отмечается, что с очисткой сточных вод от микропластика успешнее справляются станции, в которых вода до очистки проходит через отстойники [18].

Работниками Атлантического отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова в 2019 г. проводилось исследование микропластика в водной толще, донных отложениях и пляжных песках юго-востока Балтийского моря. Исследовались пробы воды, отобранные на побережье Калининградской области. Наиболее часто встречались частицы из полиэстера, полиамида и полиэтилена, частицы красок, полипропилен, метилвиниловый эфир. Реже встречались частицы из ацетата целлюлозы, полистирола, фенольной и эпоксидной смолы, поливинилхлорида и углепластика [19].

Активную деятельность по защите морской среды Балтийского моря ведет Хельсинкская комиссия (ХЕЛКОМ). Это организация, объединяющая страны, подписавшие Хельсинскую конвенцию в 1992 году. В неё входят Дания, Германия, Европейский союз, Литва, Латвия, Россия, Польша, Швеция, Финляндия и Эстония. ХЕЛКОМ разрабатывает программу совместных действий перечисленных государств по защите акватории Балтийского моря от различных видов негативного воздействия.

В 2012-2014 годах ХЕЛКОМ проводил исследование в рамках которого было рассмотрено качество очистки сточных вод на центральной водоочистой станции ГУП Водоканала Санкт-Петербурга (таблица 1.2). Пробы воды обрабатывались путем фильтрования через фильтры разного размера. Далее микропластик был посчитан и идентифицирован под световым микроскопом [20].

Выяснилось, что очистные сооружения не полностью справляются с удалением из воды частиц микропластика. Из этих данных следует вывод о том, что водоочистные сооружения Санкт-Петербурга могут служить точечным источником микропластика [20].

Виды пластика и их особенности.

В таблице 1.1 перечислены основные виды пластика, их применение и потенциальная опасность для организма человека.

Таблица 1.1 – Виды пластика, их свойства и применение [21]

Вид пластика	Маркировка	Описание, применение	Опасность для здоровья человека	Плотность кг/м ³	Возможность переработки
РЕТ (РЕТЕ), ПЭТ, ПЭТФ полиэтилентерефталат		Легкий прозрачный пластик. Бутылки для воды, молока, сока, растительного масла, упаковки для фруктов и овощей, некоторых видов косметики. Самый часто встречающийся вид пластика.	При повторном использовании может выделять фталат. Фталат способен накапливаться в организме и наносить вред гормональной системе, он канцерогенен.	1350	Легко поддается переработке
ПЕНД или HDPE, ПЭНД полиэтилен высокой плотности, низкого давления.		Непрозрачная, довольно плотная пластмасса. Бутылки для пищевых (молоко, соки) и непищевых жидкостей (моющие средства, косметика, шампуни, гели для душа), упаковки средней жесткости, контейнеры, крышки, пластиковые пакеты.	При нормальных условиях не токсичен. При высоких температурах может выделять формальдегид — канцероген.	940-960	Поддается переработке
PVC, ПВХ — поливинилхлорид.		Толстый и относительно прочный. Шланги, натяжные потолки, трубы, клеёнки, элементы корпусов изделий (мебели, салон автомобиля).	Может содержать диоксины, фталаты, бисфенол А, винилхлорид, ртуть, кадмий. Нельзя сжигать.	1370-1420	Практически не поддается переработке.
LDPE или PELD, ПЭВД — полиэтилен низкой плотности, высокого давления.		Гладкий и эластичный материал. Пакеты, мусорные пакеты, игрушки, линолеум, брезенты, плёнки, гнущиеся ёмкости.	При нагревании токсичен, относительно не опасен.	910-930	Подлежит переработке
PP, ПП — полипропилен.		Термостойкий и прочный. Игрушки, детали в автомобильной промышленности, некоторое оборудование, упаковки, пищевые контейнеры и посуда.	Считается безопасным для здоровья. При контакте с пищей безвредны короткие несильные нагревания.	900-920	Подлежит переработке

Продолжение таблицы 1.1 – Виды пластика, их свойства и применение [21]

Вид пластика	Маркировка	Описание, применение	Опасность для здоровья человека	Плотность кг/м ³	Возможность переработки
PS, ПС — полистирол.		Одноразовая посуда, приборы, некоторые контейнеры, упаковка, теплоизоляция, пенопласт, коробки CD, ручки, игрушки.	При нагревании выделяет стирол – канцероген, опасный для дыхательной и кровеносной систем.	1050-1100	Не подлежит переработке
OTHER или O, Прочие.		Практически повсеместно. В том числе, игрушки, бутылки, контейнеры, упаковка.	При нагревании и мытье может выделять бисфенол А (содержится в поликарбонатах), способный влиять на гормональный фон.	-	Не подлежит переработке

Таблица 1.2 – Степень очистки от микропластика на центральной станции аэрации ГУП Водоканала Санкт-Петербурга [20]

Тип частиц	Начальное количество частиц на литр	Количество частиц на литр после механической очистки	Количество частиц на литр после очистки	Процент очистки от частиц %
Текстильные волокна	467	33	16	96,57
Синтетические частицы	160	21	7	95,63
Черные частицы	3160	302	125	96,04

По данным мониторинга вод Невской губы установлено, что концентрации микропластика на урезе воды уменьшается по мере отдаления от г. Санкт-Петербурга. Так, в районе Парка 300-летия этот показатель составляет 336 частиц на литр, а в районе Сестрорецка 74 частицы на литр [22].

Из рассмотренных данных следует вывод о том, что основным источником микропластикового загрязнения в акватории Невской губы является сток р. Невы. После попадания в Финский залив частицы переносятся и распределяются в западном направлении господствующим гидродинамическим переносом.

Сравнив плотность различных полимеров с плотностью водных масс можно сделать предположение о том, какие виды полимеров будут оседать на дно, а какие образуют примесь нейтральной плавучести. Плотность воды в восточной части Финского залива составляет $1,001 - 1,002 \text{ кг/м}^3$ [28]. Оседать на дно предположительно должны такие полимеры, как полиэтилентерефталат, поливинилхлорид, и полистирол. Сохраняют плавучесть предположительно полиэтилен высокой плотности, низкого давления; полиэтилен низкой плотности, высокого давления; полипропилен. Следует отметить, что существует ряд факторов способных повлиять на плавучесть частиц. Важна их форма и степень разложенности. Биodeградация и обрастание могут изменить их плотность.

В 2021 году проводилось исследование загрязненности микропластиком водной среды Невской губы. При изучении проб воды, взятых на глубине 1 м. в нескольких точках на побережье восточной части Невской губы было установлено, что в составе микропластика преобладают нитевидные синтетические волокна размером 130-3500 мкм. Их предположительным источником является синтетическая одежда. При стирке волокна отслаиваются и попадают в сточные воды. Также возможно попадание волокон в окружающую среду из рыболовных лесок и сетей [29]. Волокна пластика крайне сложно извлечь из водной среды. Их плохо задерживают фильтры и осаждаются волокна медленнее, чем фрагменты.

Следует также отметить что хоть водоочистные сооружения Санкт-Петербурга эффективно очищают воду от большинства загрязнителей, но сконструированы они были без учета загрязнения микропластиком. Данная проблема изучается не так давно и эффективных мер по удалению пластиковых частиц из воды практически нигде не предпринимается [30]. Применяемые на станциях водоочистки отстойники, песколовки и аэротенки плохо справляются с очисткой сточных вод от волокон микропластика. Это обусловлено не низкой степенью очистки, а высокими концентрациями волокон микропластика в сточных водах. Спектроскопический анализ показал, что большая часть пластиковых волокон состоит из полиэтилентерефталата [23].

Данный вид пластика относится к группе алифатически-ароматических полиэфиров и применяется в России для и изготовления различных емкостей, в основном – пластиковых бутылок. Также из него изготавливают различные пленки. В остальных странах из этого вида пластика чаще всего производят нити и волокна. Полиэтилентерефталат также необходим при производстве медицинского оборудования, бытовой техники и конвейерных технологиях.

Методы математического моделирования позволяют детально визуализировать распределение концентраций пластика в Мировом океане. Это крайне необходимо для понимания механизмов его распределения. По данным моделирования всего в Мировом океане сейчас находится 268 000 тонн пластика. Рассмотрим рисунки 1.4 и 1.5. Каждая точка на данной карте соответствует 20 кг. пластика. Данные о концентрациях пластика в пробах воды были собраны в ходе ряда морских экспедиций и мониторинга состояния прибрежных вод.

На карте, представленной на рисунке 1.4 видно, что морской мусор распределен в Мировом океане неравномерно. В местах где течения образуют замкнутые кольца в их центре пластик накапливается особенно активно. Такие места называют мусорными пятнами. В них концентрации пластика настолько велики, что попавшие в них морские обитатели фактически не могут питаться ничем кроме пластика, что приводит к их гибели.

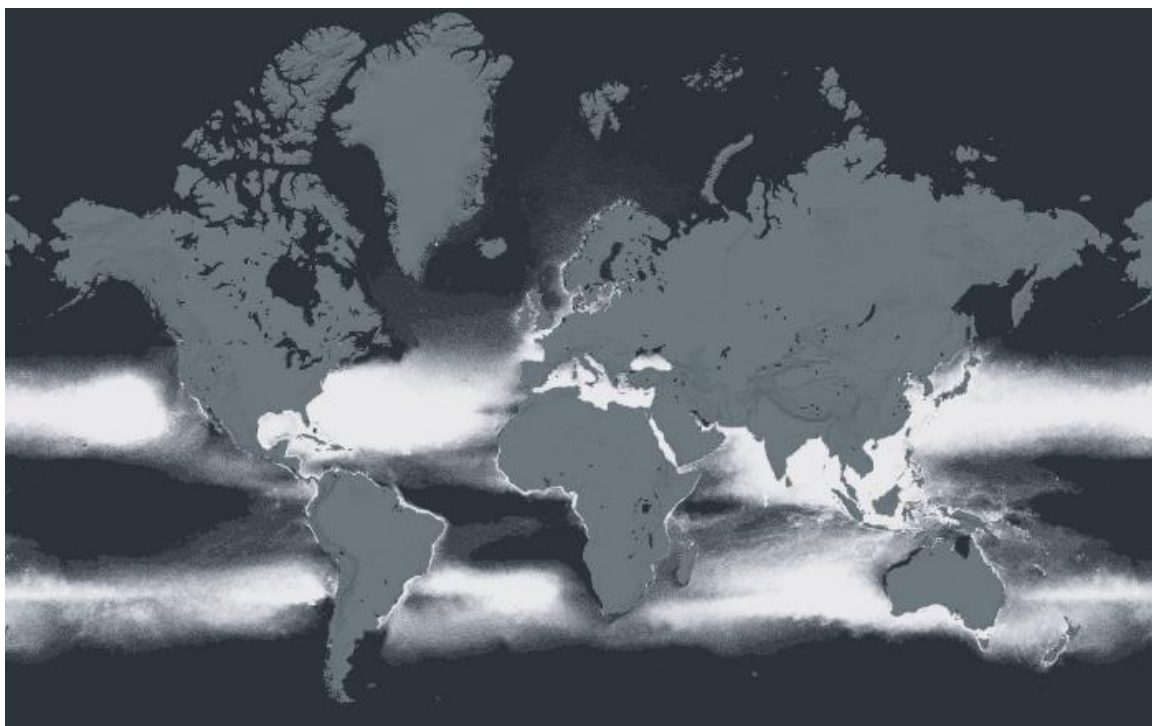


Рисунок 1.4 – Распределение морского мусора в Мировом океане [28]

Для Невской губы Финского залива же моделирование не производилось, так как данный эстуарий отгорожен комплексом гидротехнических сооружений Санкт-Петербурга.

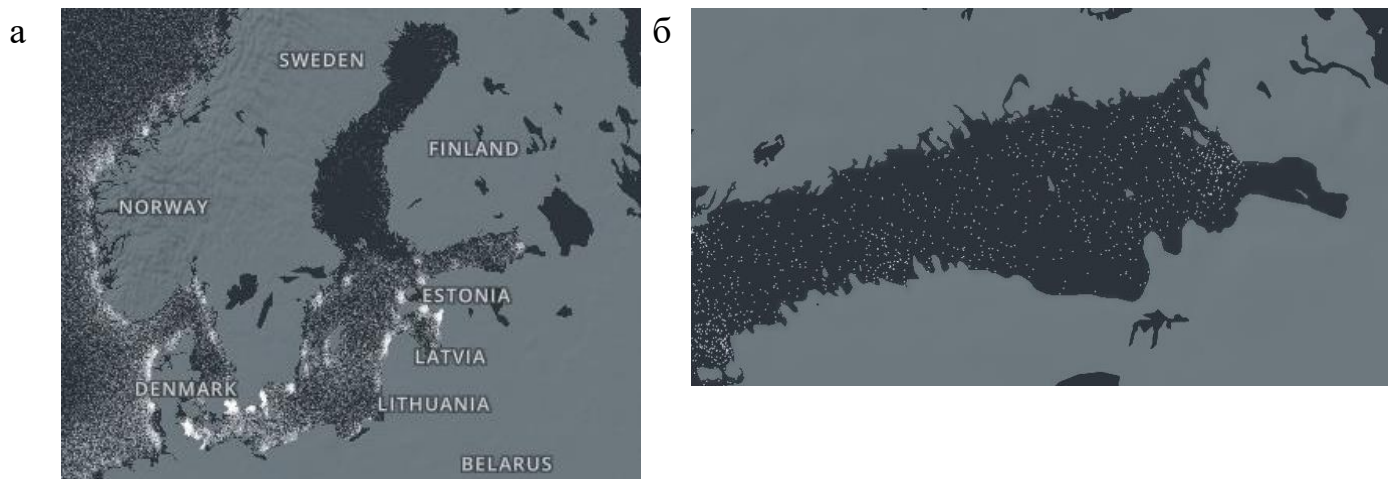


Рисунок 1.5 – Распределение пластика (а) в Балтийском море, (б) в Финском заливе [28].

Глава 2. Материалы и методы исследования

2.1 Методы исследования

Математическое моделирование является представлением моделируемого объекта его математической моделью с целью её дальнейшего изучения. Модель должна отражать основные свойства изучаемого объекта, подчиняться тем же математическим законам, что и моделируемый объект. Для изучения состояния акваторий используются гидродинамические модели. Они основаны на уравнениях гидродинамики неоднородной жидкости. Такие модели применяются в изучении механизмов распространения биогенных веществ и тяжелых металлов в водной среде, исследованиях физики океана, метеорологических явлений, в климатологии [31]. Работа с математическими моделями подразумевает создание программ вычислений, численные результаты которых сравниваются с натурными данными. В случае удовлетворительного результата сравнения есть возможность проводить эксперименты не осуществимые в реальных условиях.

Существует ряд моделей Балтийского моря, применяемых для различных исследований. Так, для описания функционирования экосистемы Балтийского моря при изменяющихся климатических условиях, распространения биогенных веществ и загрязнителей при различном уровне антропогенной нагрузки применяются такие модели, как BALTSEM (долгосрочная крупномасштабная модель эвтрофикации Балтийского моря), ERGOM (экологическая региональная модель океана), RCO-SCOBI (шведская биогеохимическая модель прибрежных и океанских вод, объединенная с моделью циркуляции океана центра Россби) и SPBEM (Санкт-Петербургская модель эвтрофикации Балтийского моря [32].

Для изучения особенностей распространения потенциально поступающего со стоком реки Невы микропластика по акватории Невской губы и восточной части Финского залива в настоящей работе использовалась трехмерная численная гидродинамическая модель, основанная на модели

Принстонского университета POM (Princeton Ocean Model) [33]. Данная модель основана на уравнениях Навье – Стокса. К достоинствам данной модели относятся учитывающие пространственную неоднородность параметризации вертикальной и горизонтальной турбулентных диффузий и подробное моделирование придонного пограничного слоя [31].

Ранее данная модель использовалась для воспроизведения ледовых условий [34], штормовых нагонов [35], взмучивания донных осадков [36], моделирования распространения микропластика в 2018 году [22] в Невской губе, а также для оценки интенсивности эрозии западных берегов острова Котлин [37].

Процессы, происходящие в реальных условиях, зависят от множества факторов. При моделировании невозможно учесть всех входных параметров поэтому исследователи сами определяют объем необходимых исходных данных. Для численного моделирования водных объектов в качестве граничных условий используются данные об уровне, солености и температуре воды, направлении и скорости течений, а также данные о состоянии атмосферы.

Такие данные представлены в океанских и атмосферных реанализах. Реанализ представляет собой данные полученные на основе численного моделирования с ассимиляцией данных наблюдений. В настоящем исследовании данные океанского и атмосферного реанализов используются для задания начальных и граничных условий.

Для получения более корректных результатов необходим период разгона (spin-up) модели – это период работы модели, за который происходит её адаптация к заданным условиям. В настоящем исследовании он занимает два расчетных месяца – июнь и июль.

В модели POM моделируемая область акватории разделяется на сигма-уровни. Это изменяющиеся во времени осредненные уровни, толщина которых в различных точках области моделирования зависит от рельефа дна, уровня воды и погодных условий в рассматриваемый момент времени. Для этого применяется сигма-координата. Она определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta}, \quad (2.1)$$

где σ – сигма-координата, η – отклонение уровня воды от спокойного положения, H – глубина акватории при невозмущенной поверхности, отсчитываемая, z – координата, определяемая расстоянием от невозмущенной поверхности воды.

Модели, в которых реализована сигма-координата широко применяются для моделирования мелководных акваторий, таких как шельфовые зоны, окраинные и внутренние моря, эстуарии рек.

Начальные и граничные (для западной границы) условия по уровню, температуре и солености воды брались из реанализа для Балтийского моря CMEMS BalticSeaPhysicalReanalysis [38], доступные с дискретностью в 1 час для уровня и ежедневные для температуры и солености с пространственным разрешением 4x4 км. На восточной границе в устье Невы задавался среднемесячный климатический расход и температура вод Невы. Соленость речных вод задавалась равной нулю.

Метеорологический форсинг включал в себя компоненты приземной скорости ветра, температуру и влажность воздуха в приводном слое, балл облачности и атмосферное давление на уровне моря. Данные брались из результатов реанализа ERA5 [39] с часовой дискретностью и с пространственным разрешением 0.25°x0.25°.

Для моделирования распространения микропластика в Невской губе используется равномерная ортогональная расчетная сетка с шагом 100 м в горизонтальной плоскости (рисунок 2.1 а), в вертикальном направлении используется 7 равномерно распределенных сигма-уровней. Поле глубин модельной области показано на рисунке 2.1 (б). Число узлов сетки с запада на восток – 600, с юга на север – 400. Максимальная глубина составляет 34.4 м, минимальная – 0.2 м.

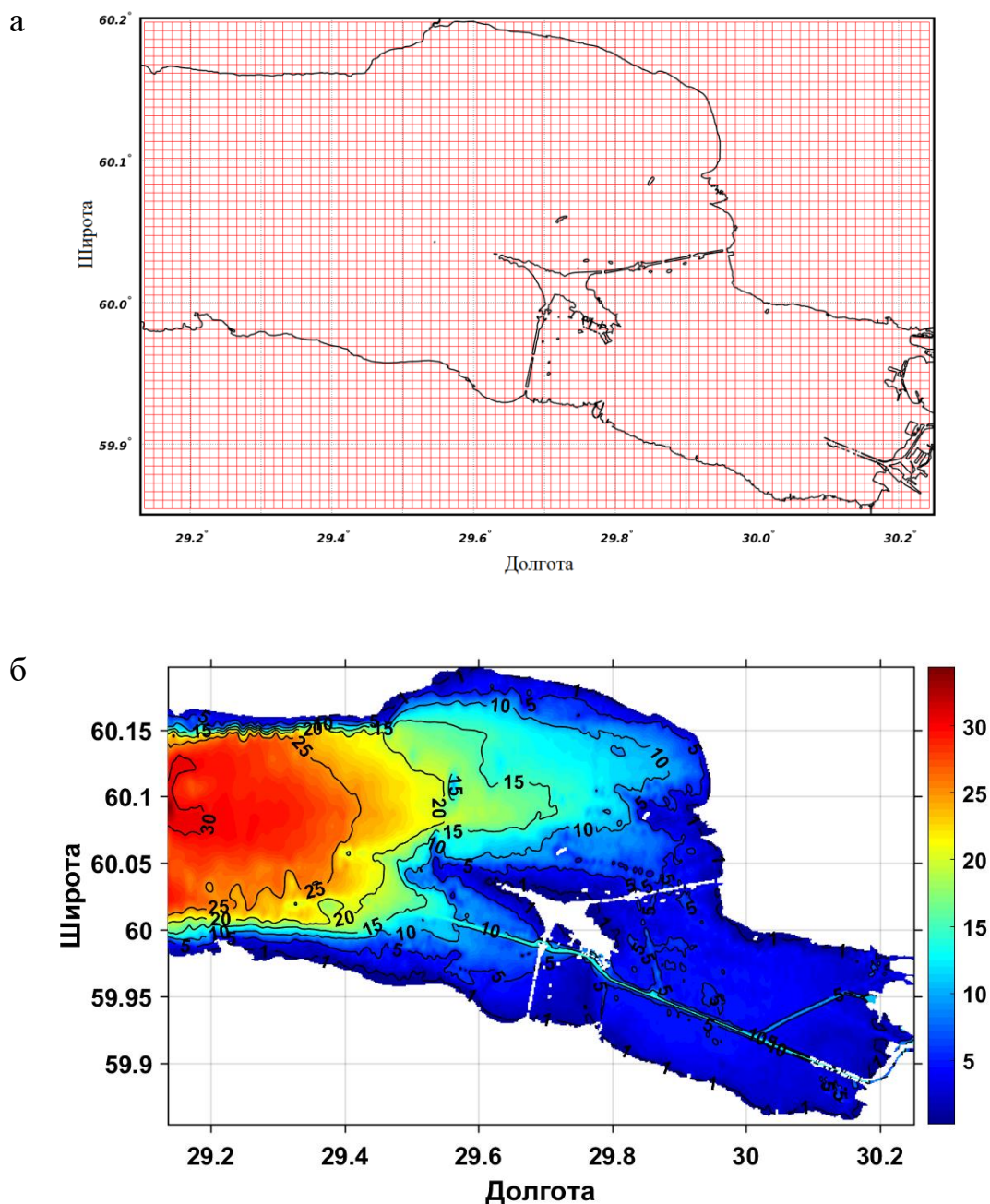


Рис 2.1 – Модельная сетка (а), показан каждый 7-й узел и поле глубин (б)

В модели рассматривались два типа взвеси, имитирующих распространение различных взвешенных частиц микропластика в воде: примесь нейтральной плавучести (C1) и оседающая взвесь (C2). Оба типа взвеси поступают с речным стоком Невы с постоянной объемной концентрацией, равной 10^{-6} , что эквивалентно содержанию 1 см^3 частиц микропластика в 1 м^3 воды. Данное значение концентрации условно, не связано с реальными

значениями концентрации частиц пластика в воде, которые на момент расчета не были известны, и применяется просто для задания внешнего источника микропластика в модели. На открытой западной границе ставилось условие поступления частиц на выходе из моделируемой области и нулевой концентрации при входе в неё. Для примеси нейтральной плавучести на верхней и нижней границе водоёма задаются нулевые потоки взвеси. Для опускающейся примеси на верхней границе задается нулевой поток взвеси, а на нижней границе задаётся поток выпадения частиц из системы, обусловленный её гравитационным оседанием.

Для расчёта толщины слоя оседающей фракции на дне используется уравнение Экснера [40], описывающее выпадение частиц из системы с образованием слоя осадочных отложений путем накопления частиц на дне. Эта модель осадконакопления была успешно применена для оценки заносимости прибрежной зоны в Ботническом заливе Балтийского моря [41]. В настоящей работе из-за недостатка натурных данных по интенсивности ресуспензии частиц микропластика со дна и их переноса в придонном слое указанное уравнение используется в упрощенном виде, не содержащем дивергенцию потока влекомых частиц и подъем частиц со дна:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -(W_b - W_s)C_b, \quad (2.2)$$

где h – толщина слоя осаждающихся частиц, м; t – время, с; C_b и W_b – объемная концентрация взвешенных частиц, м³/м³, и вертикальная скорость жидкости, м/с, на нижнем придонном сигма-уровне у дна; W_s – постоянная скорость опускания частиц, м/с, на том же уровне. В качестве такого уровня выбирается середина придонной ячейки, в которой вычисляется концентрация взвешенных частиц. Вертикальная скорость W_b на указанном уровне находится как среднее между вертикальной скоростью жидкости на верхней и нижней границе ячейки сетки самого нижнего модельного слоя. Следует отметить, что в модели

предусмотрено недопущение отрыва частиц со дна даже при превышении значения, стоящего в скобках в формуле (2.2), нулевого значения.

Пространственное распределение примеси нейтральной плавучести С1 использовалось в качестве контрольной оценки переноса, а также для анализа общей картины циркуляции за расчетный период.

Следует отметить, что на данный момент в модель не вводились какие-либо гипотезы о биологическом цикле частиц микропластика [42].

Для проведения численного эксперимента был выбран период июнь–август 2020 года, когда проводился мониторинг количества и состава пластика на пляжах вдоль берегов Невской губы и восточной части Финского залива. Проведение численных экспериментов для более продолжительного периода осложнено большим временем счета. Высокое пространственное разрешение (100 м) и характер динамики вод рассматриваемого района (наличие высоких скоростей течения в Невской губе при колебаниях уровня на западной границе и сильных ветрах) требует использования очень малых шагов по времени для обеспечения вычислительной устойчивости модели. В настоящей работе временной шаг составлял 0.3 секунды.

2.1.1 Выбор средней скорости гравитационного оседания

Одним из ключевых параметров распределения частиц микропластика в водной толще после их выхода из источника (устья Невы) является скорость гравитационного оседания. Данные по скоростям оседания частиц микропластика, обнаруженных в ходе полевых работ в 2020 году, отсутствуют.

Известно, что скорость гравитационного оседания частиц взвеси зависит от плотности частиц, их размера и формы.

Частицы и волокна микропластика часто агрегированы с минеральными и органическими взвесями. Поэтому, даже зная скорости гравитационного оседания частиц определенной плотности, размера и формы (см. [43]) и распределения микропластика по составу (плотности) и размерам в морской

среде, которые в настоящее время неизвестны, определить среднюю скорость гравитационного оседания микропластика вряд ли возможно. Поэтому учитывая тот факт, что на ближайших к западной границе модельной области пляжах были обнаружены значительные количества микропластика морского происхождения, скорость гравитационного оседания задавалась такой, чтобы частицы микропластика, поступающие с водами Невы, в заметных количествах могли достичь этой границы. Согласно результатам численных экспериментов, при задании скоростей опускания, большей или равной 0.5 м/сут, концентрации существенно понижаются, что не дает взвеси распространяться в заметных количествах западнее о. Котлин, так как частицы практически полностью выпадают на дно в непосредственной окрестности устья Невы. После ряда калибровочных экспериментов была выбрана скорость оседания 0.2 м/сут для, обеспечивающая заметные значения концентрации в районе к западу от о. Котлин вплоть до западной границы модельной области.

2.2 Описание исходных данных

Натурные данные о распространении пластикового мусора на пляжах Невской губы и восточной части Финского залива были получены в 2020 году специалистами РГГМУ [43] в результате проведения мониторинговых исследований с применением различных международных методик сбора материала [44]. В мониторинге, проведенном в июне-июле 2020 г. были отобраны пробы воды на глубине 1 м. Также были использованы два метода отбора проб песка на пляжах:

1. Фрейм-метод (метод рамки), который применяется для побережий лагун, замкнутых заливов, эстуариев рек, и обязательно включает в себя зону заплеска (т.е. зону воздействия волн и накопления материала). Метод был основным при обследовании побережий Невской губы.

2. Рейк-метод (метод граблей), при котором исследуется вся ширина пляжа от уреза воды до начала растительности, и который направлен на обследование больших площадей пляжей, которые регулярно убираются городскими

службами от крупного мусора. Этот метод был выбран для обследования пляжей внешней части эстуария (Курортная зона, пляжи Кронштадта и южного побережья поблизости от КЗС).

В течение лета 2020 года было выполнено обследование одиннадцати пляжей. Количество и распределение антропогенного мусора по побережьям значительно различались в зависимости от расположения пляжей, погодных условий, гидрологических и морфометрических характеристик исследуемых побережий [43].

По данным мониторинга загрязнения пляжей микропластиком проводимого лабораторией PlasticLab в 2018 г. концентрации микрочастиц в целом, и пластика в частности, на северном побережье в Курортном районе, а также на северном пляже о. Котлин оказались в 5-6 раз выше, чем на южном побережье Финского залива (Б. Ижора и Лебяжье) [51].

Концентрации взвесей в воде варьируются в зависимости от погодных условий. Также влияет на их распределение и уборка пляжей, проводимая на разных пляжах в разное время.

В таблице 2.1 приведены данные мониторинга микропластика в толще воды 2020 года. В результате проведенных исследований было выявлено значительное различие в составе и количестве морского мусора в целом на северном и южном побережьях Невской губы. Наибольшее загрязнение воды было обнаружено около северных пляжей (Приморская, Тарховка). Основными видами мусора во всех изученных пробах являлись пластиковые волокна. Концентрация частиц пластика во всех пробах варьировалась в пределах от 0,33 до 1,87 частиц/литр.

Таблица 2.1 – Характеристики частиц микропластика из водной толщи Невской губы, август 2020 г [29].

Станции отбора	Нитевидные синтетические волокна		Неопределенные (фрагменты, пленки и т.д.)		Концентрация частиц на 1 л воды
	Количество, шт/л	Размер, мкм	Количество, шт/л	Размер, мкм	
Пляж Жемчужный	31	от 130 до 3380	2	от 325×260 до 390×390	0,33
Александрия	24	от 130 до 6150	14	от 130×130 до 910×1040	0,38
Ораниенбаум	32	от 130 до 2100	22	от 130×100 до 780×910	0,54
Большая Ижора	27	от 190 до 1690	14	от 130×130 до 790×650	0,41
Кронштадт, Северный пляж	22	от 130 до 1430	16	от 130×100 до 520×390	0,38
Кронштадт, Южный пляж	24	от 130 до 3640	13	от 130×90 до 390×520	0,37
Приморская	66	от 130 до 3380	64	от 72×86 до 480×130	1,3
Парк 300-летия	43	от 130 до 4030	38	от 130×100 до 390×390	0,81
Лахта	43	от 130 до 2730	33	от 130×130 до 910×260	0,76
Лисий нос	48	от 130 до 1300	34	от 130×130 до 910×1080	0,82
Тарховка	40	от 130 до 2260	16	от 100×100 до 910×1150	1,87

Таким образом, накопление микропластика на пляжах происходит в основном во внешнем эстуарии - восточной части Финского залива, в то время как во внутреннем эстуарии микропластик содержится в малых количествах. Эти данные согласуются с концентрациями микропластика в пробах воды.

В таблице 2.2 приведены координаты точек отбора проб и метеорологические условия в день отбора.

Таблица 2.2 – Условия отбора проб воды, август 2020 г [29].

Дата	Название пляжа	Координаты	Глубина, м	Погодные явления
14.08.2020	Жемчужный	59.862031N,30.137591E	0,5	Штиль, слабые волны
14.08.2020	Александрия	59.884970N,29.940474E	0,7	Штиль, слабые волны
14.08.2020	Ораниенбаум	59.919495N,29.779019E	0,7	Штиль, слабые волны
14.08.2020	Большая Ижора	59.958047N, 29.497639E	0,7	Штиль, слабые волны
14.08.2020	Кронштадт, Северный пляж	60.028518N, 29.667297E	0,5	Штиль, слабые волны
14.08.2020	Кронштадт, Южный пляж	60.028518N, 29.667297E	0,5	Штиль, слабые волны
15.08.2020	Приморская	59.953586N, 30.204094E	0,5	Штиль, слабые волны
15.08.2020	300-летия	59.980921N, 30.199844E	0,5	Штиль, слабые волны
15.08.2020	Лахта	59.987579N, 30.158824E	0,5	Штиль, слабые волны
15.08.2020	Лисий нос	60.002320N, 30.004017E	0,5	Штиль, слабые волны
15.08.2020	Тарховка	60.057276N, 29.963177E	0,8	Ветрено, средние волны

Глава 3. Анализ полученных результатов

3.1 Результаты моделирования и сравнение с данными наблюдений

Первые 2 месяца счета, июнь и июль, служили для разгона (spin-up) модели: приспособления поля скорости к внешним воздействиям и генерирования начального распределения взвеси. Как показали расчеты, этого времени вполне достаточно для установления распределения концентрации в модельном бассейне. В результате расчетов были получены распределения концентраций микропластика в Невской губе на август 2020 года. Для сравнения с данными наблюдений условная объемная концентрация взвешенных частиц (частиц/м³) была переведена в частицы/л. Для перевода единиц, концентрация частиц микропластика в устье р. Невы принята равной 1.3 частиц/л, что соответствует значениям, наблюдаемым на станции «Приморская».

На рисунке 3.1 показано пространственное распределение рассчитанной объемной концентрации частиц в поверхностном слое. Поверхностное распределение оседающих частиц, показано на рисунках 3.1 и 3.2. В целом, распределения повторяют друг друга, с той лишь разницей, что среднесуточные поля более вариативны. Приводимые на рисунке 3.2 средние за анализируемый период (август 2020г.) поля объемной концентрации оседающих частиц в верхнем слое (рисунок 3.2 а) и осредненные по вертикали (рисунок 3.2 б) практически не отличаются друг от друга. Это позволяет сделать вывод о том, что водные массы в пределах исследуемой области хорошо перемешаны, так что вертикальный профиль даже опускающейся примеси практически однороден от поверхности до дна. Существенной чертой распределения опускающейся примеси является то, что большую часть времени концентрации в северной части области оказываются выше тех, которые обнаруживаются в его южной части. Такая же картина наблюдается и по данным наблюдений.

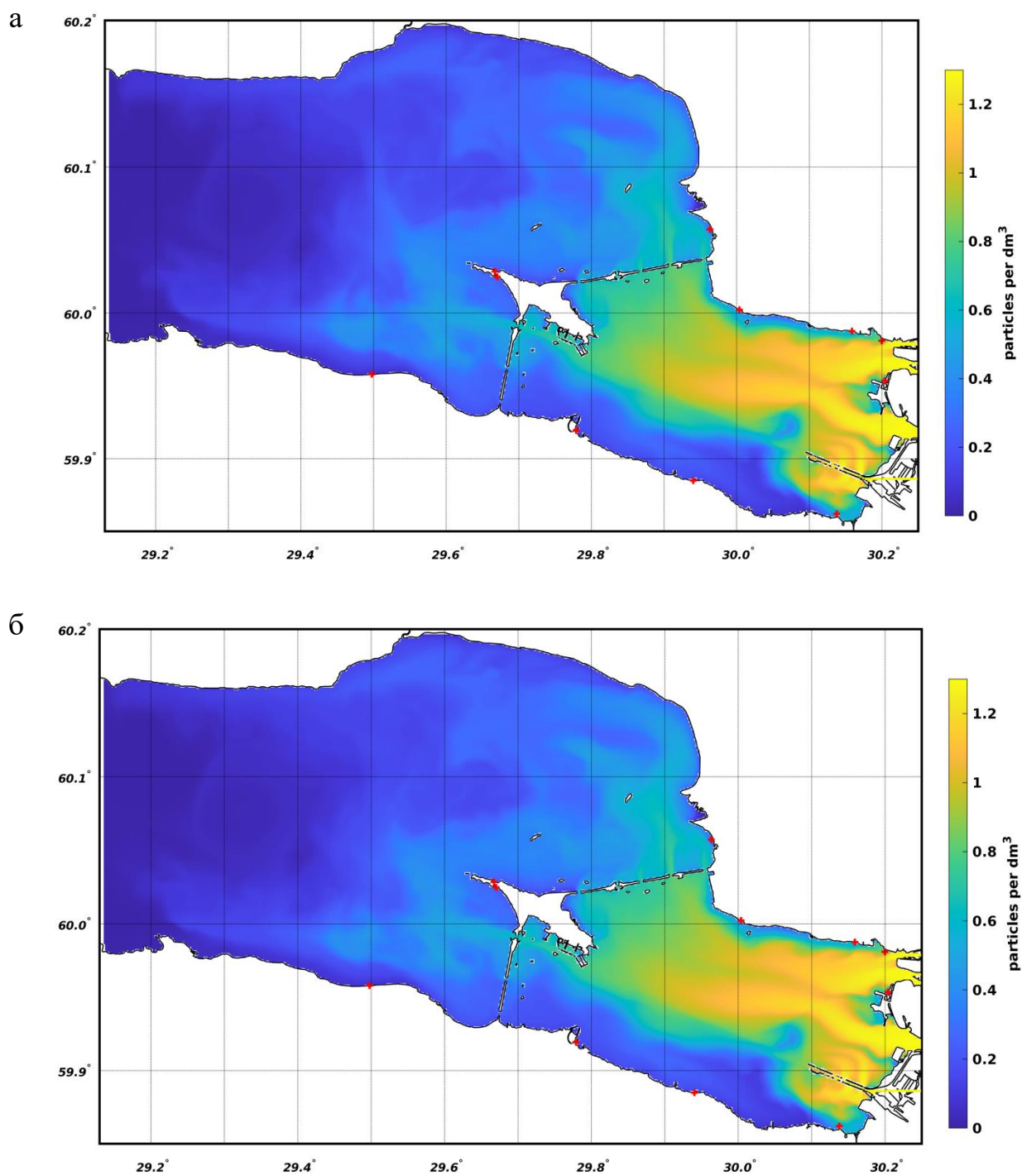


Рисунок 3.1 – Среднесуточное (15.08.2020) модельное распределение объемной концентрации оседающей примеси. а) поверхность, б) осреднение по вертикали.

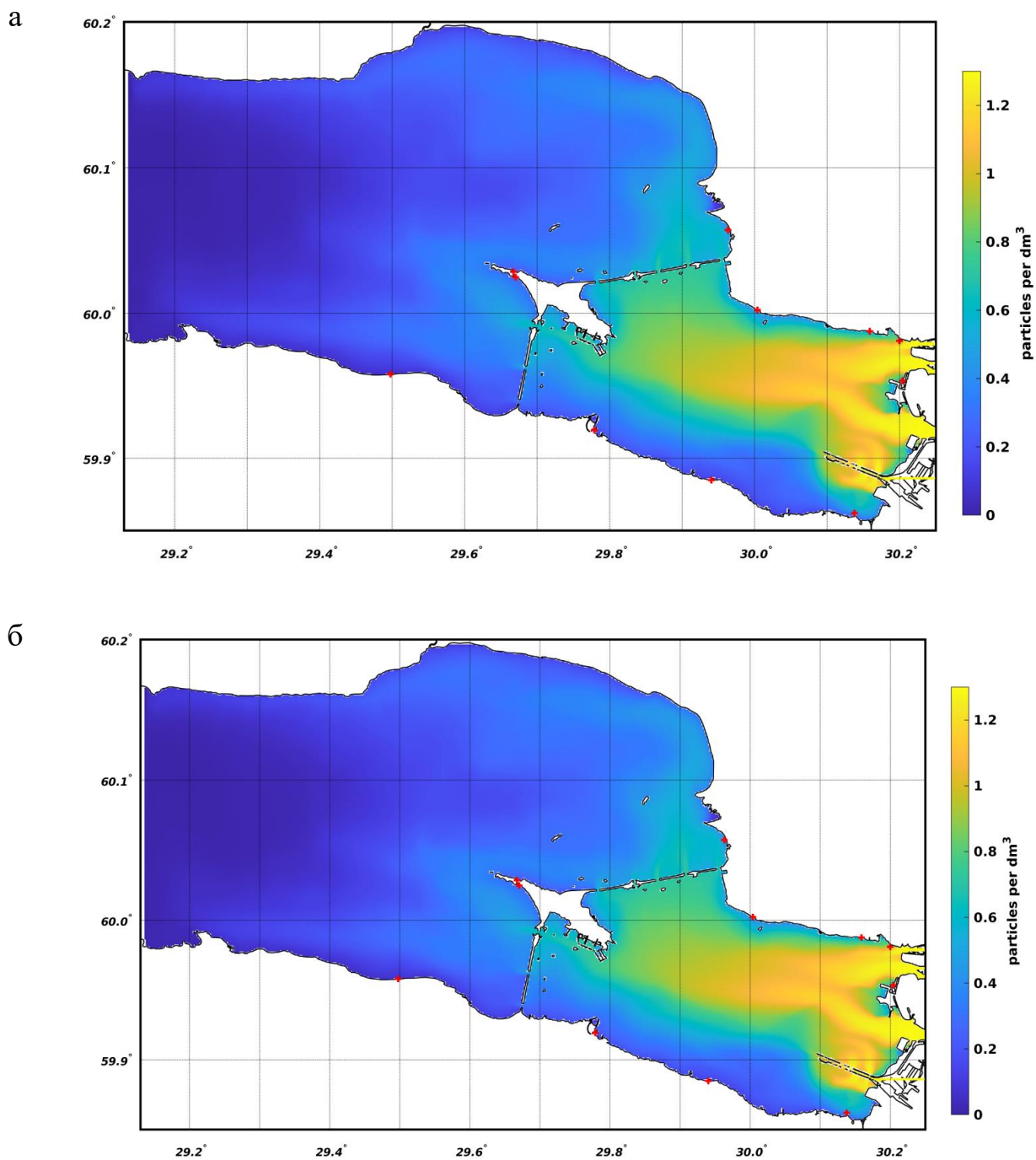


Рисунок 3.2 – Среднемесячное (08.2020) модельное распределение объемной концентрации оседающей примеси. а) поверхность, б) осреднение по вертикали.

В таблице 3.1 представлено сравнение данных наблюдений с рассчитанной объемной концентрацией оседающих частиц.

Таблица 3.1 – Сравнение данных наблюдений с рассчитанной объемной концентрацией оседающих частиц.

Дата	Станция	Долгота	Широта	Глубина измерения	Концентрация, выявленная при наблюдениях, частиц/л	Среднемесячное (август 2020) рассчитанное значение, осредненное по вертикали, частиц/л	Среднесуточное (14 августа 2020) рассчитанное значение, осредненное по вертикали, частиц/л
14.08.2020	Жемчужный	30,14	59,86	0,5	0,33	0,391	0,494
14.08.2020	Александрия	29,94	59,88	0,7	0,38	0,144	0,151
14.08.2020	Ораниенбаум	29,78	59,92	0,7	0,54	0,145	0,119
14.08.2020	Большая Ижора	29,50	59,96	0,7	0,41	0,077	0,071
14.08.2020	Кронштадт, Северный пляж	29,67	60,03	0,5	0,38	0,232	0,232
14.08.2020	Кронштадт, Южный пляж	29,67	60,02	0,5	0,37	0,268	0,213
15.08.2020	Приморская	30,20	59,95	0,5	1,3	0,751	0,602
15.08.2020	Парк 300-летия	30,20	59,98	0,5	0,81	0,943	0,845
15.08.2020	Лахта	30,16	59,99	0,5	0,76	0,536	0,558
15.08.2020	Лисий нос	30,00	60,00	0,5	0,82	0,424	0,402
15.08.2020	Тарховка	29,96	60,06	0,8	1,87	0,448	0,329

Из данных таблицы 3.1 видно, что модель в целом недооценивает концентрации частиц на всем побережье не Невской губы. Исключения составляют станции Жемчужный, Парк 300-летия, Лахта и станции о. Кронштадт. Такие различия можно объяснить принятыми в расчете допущениями.

Следует отметить, что несмотря на обычно малые значения вертикальной скорости в придонном слое, в некоторые моменты времени, например, при значительных колебаниях уровня и эпизодических конвергенциях потока в придонном слое, они могут превысить скорость гравитационного оседания частиц. Таким образом, взмучивание выпавших на дно частиц микропластика турбулентной диффузией, как и "подсос" частиц вследствие вертикальной адвекции, в настоящем исследовании не рассматривается. Тем не менее, в реальности подъем частиц со дна происходит, поэтому следующим этапом работы будет определение влияния данного механизма на общую картину распространения микропластика в прибрежной зоне рассматриваемой акватории.

Упомянутые в разделе 2.1 упрощения уравнения Экснера для уравнения (2.2) сделаны по причине того, что отсутствуют какие-либо натурные данные по интенсивности ресуспензии частиц микропластика со дна и количественные оценки их переноса в придонном слое. Сравнивать эти процессы со схожими, например, для песка, для которого они относительно известны, – означало бы вводить в модель множество заранее неизвестных переменных, что необоснованно усложнило бы интерпретацию результатов.

Накопление частиц оседающей фракции на дне на конец счета представлено на рисунок 3.3. Максимальные значения толщины донного слоя частиц оседающей фракции отмечаются вблизи устьевых рукавов Невы, западнее эта толщина равномерно уменьшается до КЗС и далее за ними вплоть до западной границы. Важной особенностью является большие значения толщины донного слоя в северной части модельной области, как в пределах Невской губы, так и за КЗС. Следует отметить повышенные значения толщины слоя у северного побережья о. Котлин.

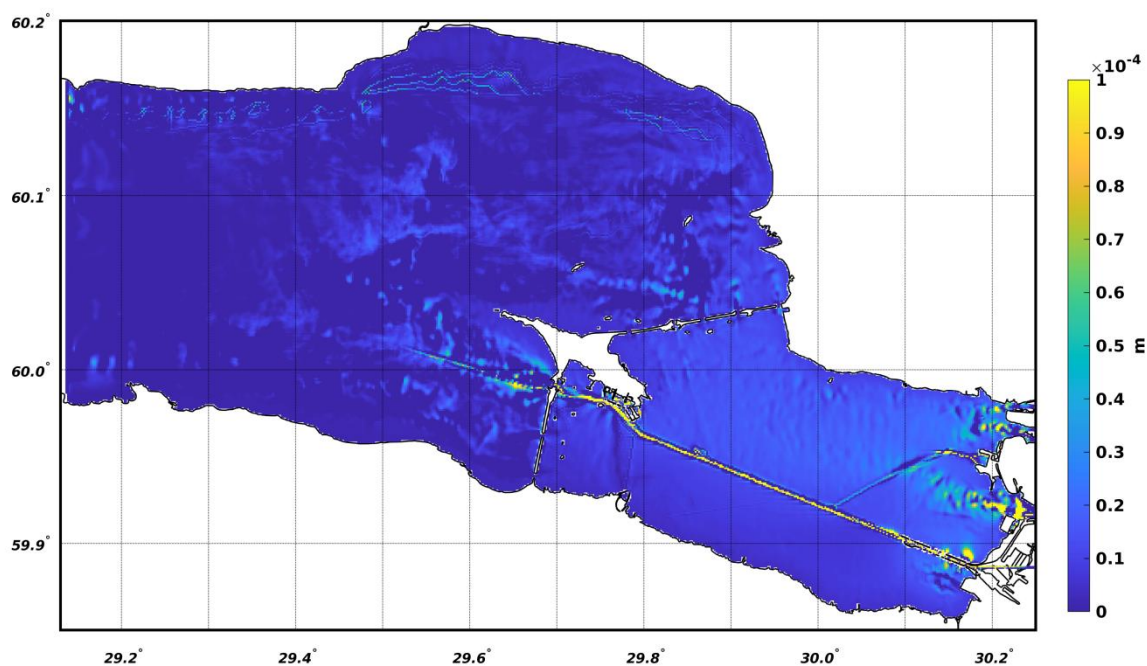


Рисунок 3.3 – Изменение толщины слоя донных осадков частиц оседающей фракции (м) на конец счета 31 августа 2020 года.

Все указанные особенности распределения толщины донного слоя частиц обусловлены генеральной картиной циклонической циркуляции вод в этом эстуарии. Что касается повышенных значений толщины донного слоя частиц в морском (судоходном) канале, то они являются скорее всего артефактами, вызванными ошибками в расчете градиента давления при резких изменениях глубины в сигма-моделях. Следует отметить, что в районе резкого изменения глубины, модельную вертикальную скорость жидкости нельзя трактовать как строго вертикальную, так как она на самом деле лишь перпендикулярна сигма-поверхностям. Поэтому при больших уклонах дна возможны ошибки в расчете потока оседающей взвеси. Большая часть модельного домена имеет относительно небольшие горизонтальные градиенты глубины, и вполне справедливо ожидать, что результаты расчета данного потока там корректны, но это вряд ли имеет место в районах границ морского канала.

Данные по мониторингу загрязнения прибрежной зоны микропластиком в определенной степени косвенно подтверждают полученные результаты, если

предположить, что концентрация мусора, попавшего на берег выше там, где накопление пластика в придонном слое больше.

Наглядно рассмотреть соотношение результатов натурных наблюдений и моделирования в конкретных точках можно на рисунок 3.4. Здесь представлены диаграммы, иллюстрирующие соотношение данных мониторинга и моделирования по нескольким пляжам [43].

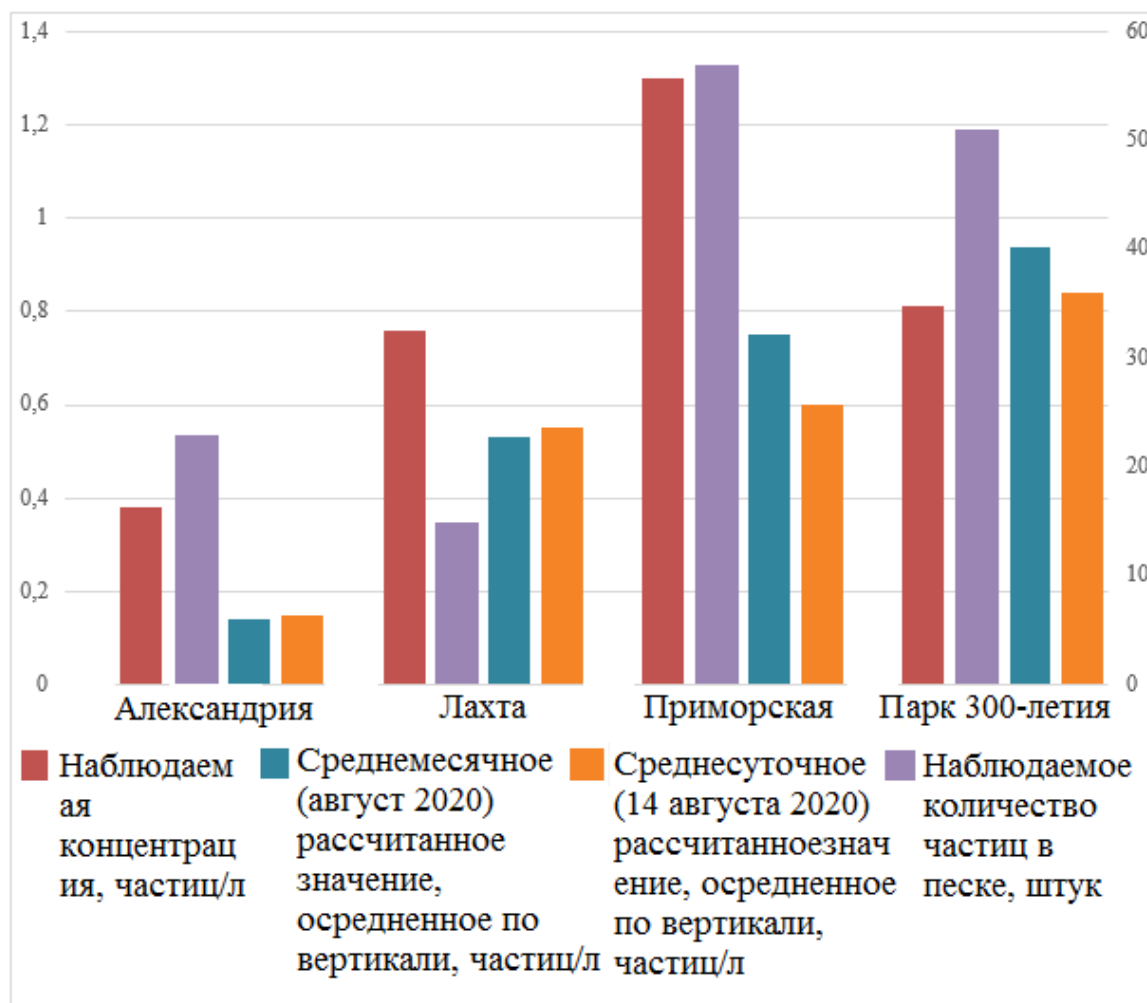


Рисунок 3.4 – Диаграмма сравнения концентраций микропластика в воде и данных мониторинга пляжей [43].

Диаграммы были построены на основе данных таблицы 3.1 и данных мониторинга пляжей, предоставленных лабораторией PlasticLab РГГМУ (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Количество частиц микропластика, обнаруженных в песке при мониторинге, август 2020 г.

Станция	Александрия	Лахта	Приморская	Парк 300-летия
Количество частиц, шт.	23	15	57	51

Действительно, на южном побережье исследуемой восточной части Финского залива за пределами КЗС практически не было пластикового мусора в период с июня по август 2020 года, хотя он был обнаружен в значительных количествах на северном побережье залива [43].

Ранее проводившиеся исследования имеют схожие результаты. Моделирование распределения микропластика в тоще вод Невской губы производилось в 2018 году работниками Санкт-Петербургского отделения института океанологии им. И.П. Ширшова РАН.

Большая часть взвешенных частиц и донных отложений микропластика была локализована в северной части Невской губы. Данные моделирования согласовывались со сведениями мониторинга морского мусора [22].

В настоящей работе расчет изменений толщины слоя оседающих на дно частиц реализован с целью получения некоторой интегральной по времени картины пространственного распределения зон, в которых осаждается переносимая потоком взвесь при заданной скорости ее гравитационного опускания. Полученную оценку можно использовать для обоснования выбора районов для будущих работ по мониторингу загрязнения микропластиком вод прибрежной зоны и побережья восточной части Финского залива.

Оценивая результаты расчетов, следует отметить, что здесь рассматривался только один из возможных источников поступления микропластика в Финский залив – воды Невы. Среди других возможных источников, которые предстоит исследовать в будущем бытовые городские стоки, а также перенос с городских свалок на суше на поверхность воды штормовыми ветрами.

3.2 Рекомендации по снижению поступления микропластика в окружающую среду

Рассмотрим схему, приведенную на рисунке 3.5 синие блоки характеризуют пути поступления микропластика в окружающую среду. Содержание зеленых блоков содержит информацию о путях возможного решения проблемы микропластика, которые необходимо применить на каждом этапе его жизненного цикла.

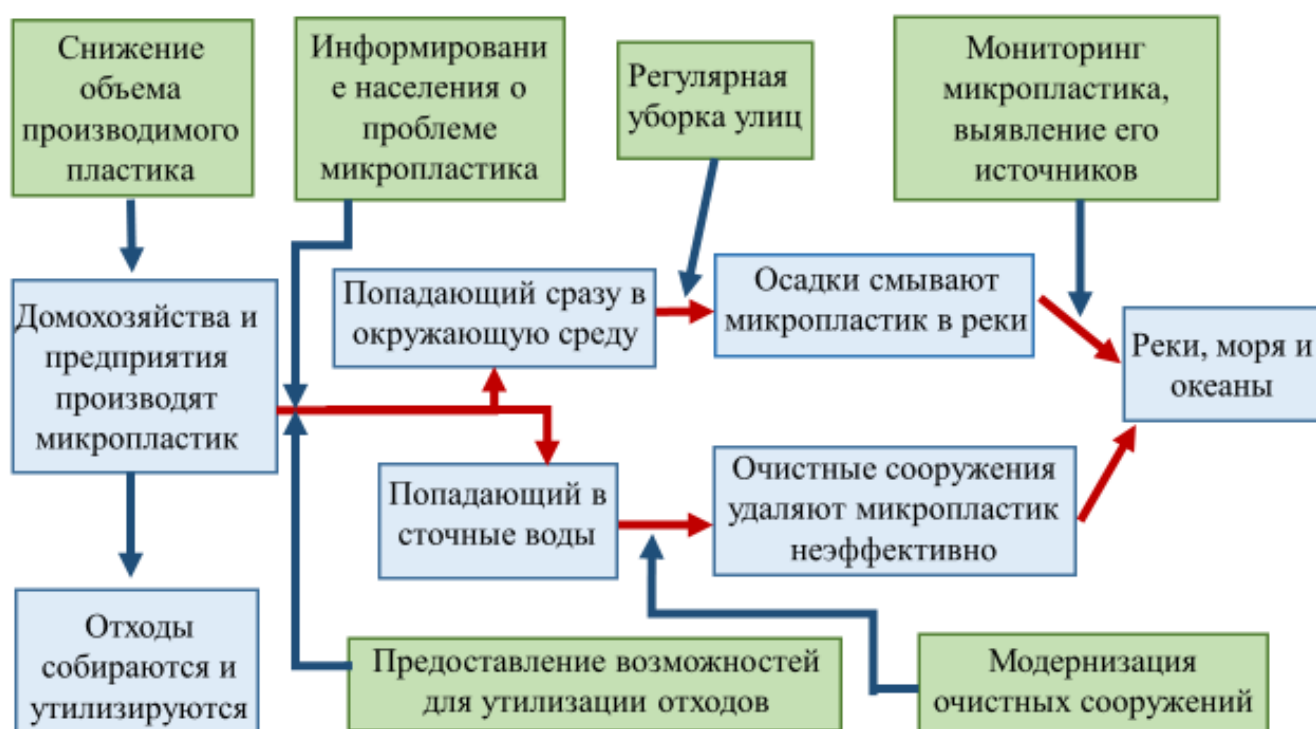


Рисунок 3.5 – Схема поступления микропластика в окружающую среду и путей борьбы с ним.

Мероприятия по повышению информированности дистрибьюторов/розничных торговцев и потребителей могут помочь сократить объемы морского мусора. Улучшение дизайна продукции и упаковки может уменьшить количество отходов, увеличить процент перерабатываемых отходов и увеличить

эффективность использования ресурсов. Также необходимо формирование у населения привычек, связанных с правильным сбором отходов и устойчивым потреблением.

Применение принципа расширенной ответственности производителей (EPR) может помочь устранить определенные виды морского мусора. Экономические стимулы, такие, как схемы возврата платежей и плата за использование пластиковых пакетов, могут воздействовать на выбор потребителя и/или способствовать развитию новых привычек.

Запреты (например, на пластиковые пакеты, курение на пляже, сжигание пластика на судовой палубе или пластиковые микрогранулы в косметике) могут ценой малых затрат помочь решению вопроса минимизации массы морского мусора. Также необходимо инвестирование в инфраструктуру управления отходами и сооружения для очистки водных стоков.

Вылавливание мусора может быть полезной конечной мерой, но будет касаться лишь определенных видов морского мусора. Все же стоимость морского пластика, идущего на переработку, обходится дешевле, если он не подвергся заражению или частичному разложению в морской окружающей среде. Это происходит вследствие того, что, пребывая определенное время в океане, пластик может абсорбировать химические или биологические вещества, или частично разлагаться до состояния, когда использовать его для обычных процессов переработки более не представляется возможным, поскольку он может отрицательно влиять на качество получаемого материала.

Эффективным методом снижения количества производимого микропластика может быть запрещение производства микропластика (микрогранул).

В то время как одним из источников микропластика является естественно происходящая фрагментация более крупных кусков пластикового мусора, другой носит более намеренный характер. Микрогранулы – это мягкие абразивные пластиковые частицы, которые с 90-х годов целенаправленно добавляются в товары домашнего и личного потребления, такие как, очистители кожи лица, шампунь и зубная паста. Так, в июне 2016г, правительство Канады добавило

микрогранулы в список токсичных веществ согласно закону об охране окружающей среды Канады. В свете этого, у правительства появилась возможность разрабатывать правила, запрещающие производство, импорт, продажу и предложение к продаже товаров личной гигиены, содержащих микрогранулы, для очистки или в качестве отшелушивающего скраба. В США, ограничивающее использование микрогранул в производстве продуктов личного потребления законодательство приняли семь штатов, а именно: Мэриленд, Иллинойс, Мэн, Нью-Джерси, Колорадо, Индиана и Калифорния. Закон, принятый в Мэриленде, к примеру, запрещает производство и продажу любых продуктов, содержащих биологически не распадающиеся микрогранулы. Меры, предпринимаемые против микрогранул во многих странах, таких как Нидерланды, со стороны промышленности носят на настоящий момент добровольный характер [45]. Также эффективным может быть законодательный запрет на пластиковые пакеты. Данная практика реализована в Руанде [46, 47].

Касательно микропластика, поступающего в окружающую среду с производственных предприятий, в 2007г в Калифорнии был принят закон для коммерческих компаний касательно наиболее правильных практик производства, обращения и транспортировки гранул [47]. Закон касается “предпроизводственного пластика,” к которому “относятся шарики пластиковых полимеров и порошковые красители для пластиков. Он предусматривает, что все разрешения, выдаваемые в рамках программы национальной системы ликвидации сбросов загрязнителей (NPDES), регулирующей средства производства пластика, обращения с ним или транспортировки” должны включать требование обязательного выполнения некоторого набора практических мер.

К таким мерам относится установка систем локализации утечек в местах всех коллекторов ливневой канализации, расположенных ниже места присутствия или перемещения предпроизводственного пластика. Система локализации утечки представляет собой устройство или комплект устройств, которые способны улавливать любые частицы, задерживаемые сетчатым (1мм) экраном, и имеющие плановую производительность очистки не менее пиковой пропускной способности,

соответствующей одночасовому штормовому ливню в год в каждом из расположенных ниже бассейнов канализации». Во всех пунктах складирования, а также при транспортировке предпроизводственного пластика, такой пластик должен храниться в запечатанных контейнерах, достаточно прочных, чтобы выдерживать обычные процедуры погрузки и разгрузки. Также предприятие должно предоставлять своим работникам пылесос или вакуумное устройство для быстрой уборки рассыпанного предпроизводственного пластика [49].

Для решения проблемы микропластика важным является изменение привычек общества в целом. Это сокращение потребления пластиковых изделий и отказ от косметики, содержащей микропластик и правильный сбор пластиковых отходов. Также весьма эффективным может оказаться усовершенствование технологий бытовых приборов. Так как основным источником микропластика в наших домах являются стиральные машины, то следует устанавливать на них фильтры, задерживающие волокна микропластика [48, 50].

Заключение

В ходе данной работы была рассмотрена проблема загрязнения микропластиком водных экосистем. Выявлена необходимость принимать меры по предупреждению его распространения в окружающей среде. Особенно актуальной данная проблема является для водных экосистем, испытывающих высокое антропогенное воздействие, таких как Невская губа Финского залива.

В качестве исходных данных были использованы результаты ежегодно проводимого лабораторией PlasticLab РГГМУ мониторинга загрязнения микропластиком вод и прибрежной зоны исследуемой акватории. При помощи методов математического моделирования были получены данные о распределении частиц микропластика в Невской губе, а также об изменении донного слоя оседающих частиц.

Была получена интегральная картина пространственного распределения зон, в которых осаждается переносимая потоком взвесь при заданной скорости ее гравитационного опускания. Полученную оценку можно использовать для обоснования выбора районов для будущих работ по мониторингу загрязнения микропластиком вод прибрежной зоны и побережья восточной части Финского залива.

Максимальные значения толщины донного слоя частиц оседающей фракции отмечаются вблизи устьевых рукавов Невы, западнее эта толщина монотонно уменьшается до КЗС и далее за ними вплоть до западной границы. Также имеется тенденция к накоплению оседающих частиц в северной части изучаемой области. Данные мониторинга загрязнения пляжей косвенно подтверждают полученные результаты. Наибольшее количество микромусора было обнаружено в песках северной части Невской губы.

Полученные данные свидетельствуют о том, что речной сток и циркуляция вод оказывают значительное влияние на формирование областей повышенной концентрации пластика в прибрежной зоне и их аккумуляции в осадочных отложениях. Однако в данном исследовании рассматривался только один из

возможных источников поступления микропластика в Финский залив – воды Невы. Следует провести исследования, включающие другие возможные источники микропластика. Среди них бытовые городские стоки, перенос с городских свалок на суше на поверхность воды штормовыми ветрами.

Список использованных источников

1. Agamuthu, P., Fauziah S.H., Emenike C.U. Waste management in asia: the associated toxicity. // Agamuthu, P., Fauziah S.H., Emenike C.U. – International Conference on Ecotoxicology and Environmental Sciences (issue Nov 28-30), Institute of Biological Sciences, University of Malaya, – 2011.
2. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made // Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. – Sci. Advances. – 2017. – V. 3. № 7. – p. 5.
3. Duis K. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects // Duis K. // Sci. Eur. – 2016 – 28 (1):2. – DOI 10.1186/s12302-015-0069-y.
4. Duis K., Coors A. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. / Duis K. – Environ. Sci. Eur. – 2016 – vol. 28 – p. 2. DOI: 10.1186/s12302-015-0069-y.
5. Хатмуллина Л. И. Свойства частиц морского микропластика и его вертикальное распределение в водной толще балтийского моря / Хатмуллина Л. И. – Калининград.: дис. канд. физ.- мат. наук:– 2019.
6. R. Russell, Huang J., Anand P., Kucera K., G. Sandoval A., W. Dantzler K., Hickmn D., Jee J., M. Kimovec F., Koppstein D., H. Marks D., A. Mittermiller P., Joel Núñez S., Santiago M., A. Townes M., Vishnevetsky M., Neely E., Núñez Vargas M., Boulanger L., Bascom-Slack C., A. Strobel S. Biodegradation of Polyester Polyurethane by Endophytic Fungi // Appl Environ Microbiol. – 2011 – № 77. Doi: 10.1128/AEM.00521-11.
7. Gregory M.R. Environmental implications of plastic debris in marine settings – entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions / M.R. Gregory // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. – 2009. – Vol. 364. – № 1526. – P. 2013–2025.

8. Коул М., Линдек П., Файлман Э., Халсбанд К., Гудхед Р., Могер Дж. и ГалЛоуэй, Т.С. Проглатывание микропластика зоопланктоном. // Коул М., Линдек П., Файлман Э., Халсбанд К., Гудхед Р., Могер Дж. и ГалЛоуэй, Т.С. – Наука об окружающей среде и технологии №47, – 2013 – С. 6646-6655.
9. Maximenko, N., Hafner, J., &Niiler, P. Pathways of marine debris derived from trajectories of Lagrangian drifters. // Maximenko, N., Hafner, J., &Niiler, P. – Marine pollution bulletin. №65. – 2012. – P. 51-62.
10. Lusher A.L. Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel / A.L. Lusher, M. Mchugh, R.C. Thompson // Marine Pollution Bulletin. – 2013. – Vol. 67. – № 1–2. – P. 94–99.
11. 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. – № 1. – P. e85433
12. Ragusaa A., Svelatoa A., Santacroceb C., Catalanob P., Notarstefanoc V., Carnevalic O., Papab F., Ciro M., Rongiolettib A., Baioccoa F., Draghia S., D'Amorea E., Rinaldod D., Mattae M., Giorgini E. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta // Ragusaa A. – Environment International., Rome. №146. – 2021.
13. Зобков М. Б., Есюкова Е. Е. Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов. // Зобков М. Б., Есюкова Е. Е. – М.: Океанология. – 2018. – т. 58, № 1. – С. 149–157. Doi: 10.7868/S0030157418010148
14. Верес Ю.К. Руководство по общественному мониторингу микропластика в водных объектах. / Верес Ю.К. – Plastic Free Baltic. – 2018.
15. Гугл карты. – : электронный // : [сайт]. – URL: <https://www.google.com/maps/@60.0482167,29.6982454,9.5z?hl=ru>. (дата обращения: 13.03.2022).
16. Бродский, А.К., Кудрявцева М.В. Исследование влияния Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений на биоту эстуария реки Невы / А.К. Бродский, М.В. Кудрявцева. – СПб.: 2009. – http://ecosafe.spbu.ru/Nature/KZS/kzs_cp.htm (дата обращения: 24.04.2022).

17. *Телеш И.В.* Влияние биологических инвазий на разнообразие и функционирование сообществ зоопланктона в эстуарных экосистемах Балтийского моря. / Телеш И.В. – Зоологический институт РАН, Санкт-Петербург, 2006 г.
18. HELCOM activities report for the year 2019 / – Helsinki, Finland.: Baltic Marine Environment Protection Commission. – 2020. – № 169.
19. *Есюкова Е. Е, Чубаренко И. П.* Микропластик в водной толще, донных осадках и песках пляжей юго-восточной части Балтийского моря: концентрации, распределение частиц по размерам и формам // Есюкова Е. Е, Чубаренко И. П. – СПб.: Региональная экология. – 2019. – № 2 (56). – С. 16-29. DOI: 10.30694/1026-5600 -2019-2-16-29.
20. HELCOM 2014, BASE project 2012-2014: Preliminary study on synthetic microfibers and particles at a municipal waste water treatment plant /– Helsinki, Finland.: Baltic Marine Environment Protection Commission. – 2019.
21. Виды и классификация пластика, – Текст : электронный // : [сайт]. – URL: betosteel.ru/plastic/model-2.html, (дата обращения: 14.04.2022).
22. *Мартьянов С.Д., Рябченко В.А., Ершова А.А., Ерёмина Т.Р., Мартин Г.* К оценке распространения микропластика в восточной части Финского залива // Мартьянов С.Д., Рябченко В.А., Ершова А.А., Ерёмина Т.Р., Мартин Г. – СПб.: Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 32—41.
23. *Поздняков Ш.Р., Иванова Е.В., Гузева А.В., Шалунова Е.П., Мартинсон К.Д., Тихонова Д.А.* Исследование содержания частиц микропластика в воде, донных отложениях и грунтах прибрежной территории Невской губы Финского залива // Поздняков Ш.Р., Иванова Е.В., Гузева А.В., Шалунова Е.П., Мартинсон К.Д., Тихонова Д.А. – Водные ресурсы. – 2020. – №4. – С. 411-420. DOI: 10.31857/S0321059620040148.
24. Эпоха антропоцена: как пластик изменяет мир. — Текст : электронный // Techinsider : [сайт]. — URL: <https://www.techinsider.ru/science/16519-epokha-antropotsena-kak-plastik-izmenyaet-mir/> (дата обращения: 26.04.2022).

25. A sea of plastic. — Текст : электронный // Swiss National Science Foundation : [сайт]. — URL: <https://www.snf.ch/en/A5pPdxFzghb4zmKh/news/news-150619-horizons-sea-of-plastic> (дата обращения: 16.04.2022).

26. Besley A., Vijver M.G., Behrens P., Bosker T. A standardized method for sampling and extraction methods for quantifying microplastics in beach sand // Besley A., Vijver M.G., Behrens P., Bosker T. – Marine Pollution Bull. – 2017. – V. 114. № 1. – P. 77–83.

27. Barnes D.K.A., Galgani F., Thompson R.C., Barlaz M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments // Barnes D.K.A., Galgani F., Thompson R.C., Barlaz M. – Philosophical Transactions of the Royal Society B. – 2009. – V. 364. № 1526. – P. 1985– 1998.

28. Sailing Seas of Plastic. — Текст : электронный // Sailing Seas of Plastic : [сайт]. — URL: <https://app.dumpark.com/seas-of-plastic-2/> (дата обращения: 20.04.2022).

29. Логинова Н. В., Макеева И. Н., Ершова А. А. Исследование загрязненности микропластиком водной среды Невской губы Финского залива // Логинова Н. В., Макеева И. Н., Ершова А. А. – Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции для молодых учёных по проблемам водных экосистем, посвященной 150-летию Севастопольской биологической станции - ФИЦ "Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН". Севастополь, – 2021. – С. 67-69.

30. Качество очистки стоков, – Текст : электронный // ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»: [сайт]. – URL: http://www.vodokanal.spb.ru/kanalizovanie/ochistka_stochnyh_vod/ , (дата обращения: 14.04.2022).

31. L. Mellor G. Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. / L. Mellor G. – Program in Atmospheric and Oceanic Sciences Princeton University, Princeton, NJ 08544-0710 – 2002.

32. Ерёмина Т.Р. Балтийское море в настоящем и будущем – климатические изменения и антропогенное воздействие./ Ерёмина Т.Р. –СПб.: ЛЕМА, – 2016. – С. 59-91.

33. *Blumberg, A.F., Mellor, G.L.* A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. // *Blumberg, A.F., Mellor, G.L.* In: Heaps, N. – (Ed.), *Three-dimensional Coastal Ocean Models. American Geophysical Union*, – 1987. – P. 208.
34. *Ryabchenko V.* Modelling ice conditions in the easternmost Gulf of Finland in the Baltic Sea. // *Ryabchenko V. – Continental Shelf Research*. – 2010. – V.30. – P.1458–1471.
35. *Андреев П.Н., А.Ю. Дворников, В.А. Рябченко, В.Ю. Цепелев, К.Г. Смирнов.* Воспроизведение штормовых нагонов в Невской губе на основе трехмерной модели циркуляции в условиях маневрирования затворами Комплекса Защитных Сооружений // *Андреев П.Н., А.Ю. Дворников, В.А. Рябченко, В.Ю. Цепелев, К.Г. Смирнов.* – *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. Т.6, – 2013. – №4. – С.23-31.
36. *Martyanov, S., Ryabchenko, V.* Bottom sediment resuspension in the easternmost Gulf of Finland in the Baltic Sea: A case study based on three-dimensional modeling. // *Martyanov, S., Ryabchenko, V. – Cont. Shelf Res.* –2016. – №117, – P.126-137. Doi: 10.1016/j.csr.2016.02.011.
37. *Ryabchenko V. A., Leontyev I. O., Ryabchuk D. V., Sergeev A. Yu., Dvornikov A. Yu., Martyanov S. D., Zhamoida V. A.* Mitigation measures of coastal erosion on the Kotlin Island's shores in the Gulf of Finland, the Baltic Sea. // *Ryabchenko V. A., Leontyev I. O., Ryabchuk D. V., Sergeev A. Yu., Dvornikov A. Yu., Martyanov S. D., Zhamoida V. A. – Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. – 2018. – №11. – P. 36—50. Doi: 10.7868/S207366731802003X.
38. *BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011/INFORMATION.* — Текст : электронный // *Copernicus Marine Service* : [сайт]. — URL: https://resources.marine.copernicus.eu/productdetail/BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011/INFORMATION. Doi:10.48670/moi-00013. (дата обращения: 07.02.2022).
39. *Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N.* (2018): ERA5 hourly data on single levels from 1979 to

present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on < 19-NOV-2021 >), Doi: 10.24381/cds.adbb2d47. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>. Электронный ресурс. (дата обращения 19.02.2022).

40. Parker, G., Paola, C., Leclair, S. Probabilistic Exner sediment continuity equation for mixtures with no active layer. // Parker, G., Paola, C., Leclair, S. – J. Hydraul. Eng., – 2000. – Vol. 126, No. 11, – P. 818-826.

41. Martyanov S.D., Dvornikov A.Yu., Ryabchenko V.A., Sein D.V. Modeling of sediment transport in Bothnian Bay in the vicinity of the nuclear power plant 'Hanhikivi-1' construction site. // Martyanov S.D., Dvornikov A.Yu., Ryabchenko V.A., Sein D.V. – J. Mar. Sci. Eng. – 2019. – №7, – P.229; Doi:10.3390/jmse7070229

42. Maximenko, N., Hafner, J., & Niiler, P. Pathways of marine debris derived from trajectories of Lagrangian drifters. // Maximenko, N., Hafner, J., & Niiler, P. – Marine pollution bulletin, – 2012. – №65 (1-3), – P. 51-62.

43. Eremina T., Ershova A., Martin G., Shilin M. Marine litter monitoring: review for the Gulf of Finland coast. // Eremina T., Ershova A., Martin G., Shilin M. – IEEE/OES Baltic International Symposium (BALTIC), – 2018. – p.8. DOI: 10.1109/BALTIC.2018.8634860.

44. Haseler, M., Schernewski, G., Balciunas, A. et al. Monitoring methods for large micro- and meso-litter and applications at Baltic beaches // Haseler, M., Schernewski, G., Balciunas, A. – J Coast Conserv – 2018. – №22: – P. 27.

45. Закон об устранении микрогранул из водоемов, 2015г, 21 U.S.C. 331 – 2015, – Текст : электронный // : [сайт]. – URL: <https://www.congress.gov/bill/114th-congress/house-bill/1321>. (дата обращения: 13.05.2022).

46. Закон N°57/2008 от 10/09/2008г, Закон касательно запрета на производство, импорт, пользование и продажу полиэтиленовых пакетов, Административное управление Руанды, С. 78, – Текст : электронный // : [сайт]. – URL: http://rema.gov.rw/rema_doc/Laws/Plastic%20bags%20law.pdf. (дата обращения: 13.05.2022).

47. Общественный кодекс Калифорнии, – Текст : электронный // : [сайт]. – URL: § 42360, https://leginfo.legislature.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill_id=201520160AB888, (дата обращения: 13.05.2022).
48. The most efficient washing machine filter ever designed., – Text : // PlanetCare: [web-site]. – URL: <https://planetcare.org/>, (date of access: 26.05.2022).
49. Водный кодекс Калифорнии. – Текст : электронный // : [сайт]. – URL: § 13367(b)(1), <http://www.leginfo.ca.gov/cgi-bin/displaycode?section=wat&group=13001-14000&file=13367>. (дата обращения: 13.05.2022).
50. *Essel R., Engel L., Carus M.* Sources of microplastics relevant to marine protection in Germany. / *Essel R., Engel L., Carus M.* – nova-Institut GmbH, Hürth, Germany. – 2015.
51. *Ершова А.А., Пашкевич Д.В., Ковалева С.В.* Исследование загрязненности морским мусором пляжей восточной части Финского залива в 2018 году. / *Ершова А.А., Пашкевич Д.В., Ковалева С.В.* – В книге: Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции. – 2019. – С. 799-800.