



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной и системной экологии

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Магистерская диссертация)**

На тему Исследование процессов накопления и распределения микропластика
на побережьях Финского залива

Исполнитель Кузьмина Анастасия Сергеевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Ершова Александра Александровна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Алексеев Денис Константинович
(фамилия, имя, отчество)

«20» 06 2022 г.

Санкт-Петербург 2022

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Описание проблемы микропластикового загрязнения морской среды.....	6
1.1 Зарубежные исследования пляжного мусора на побережьях Балтийского моря.....	9
1.2 Исследования пляжного мусора на российских побережьях Балтийского моря.....	12
2 Физико-географическая характеристика Финского залива	15
2.1 Климат Балтийского региона.....	15
2.1.1 Ветровой режим в районе Балтийского моря	16
2.1.2 Перемещение водных масс в Финском заливе	17
2.1.3 Перемещение водных масс в Невской губе	18
2.2 Геологическое строение и рельеф побережий восточной части Финского залива	22
2.3 Антропогенное воздействие на Невскую губу	26
3 Материалы и методы исследования	29
3.1 Описание методик отбора проб микромусора на песчаных пляжах	29
3.2 Описание методов обработки и анализа данных с помощью программного обеспечения	33
3.3 Описание пляжей, исследованных в 2018-2021 гг.	35
4 Результаты исследования загрязненности микромусором побережий Невской губы и Финского залива в 2018-2021 гг.	46
4.1 Исследование зоны заплеска	46
4.2 Исследование пляжей по всей ширине	58

4.3 Анализ процессов накопления и распределения микропластика на побережьях Финского залива	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	71
Список использованных источников	74

ВВЕДЕНИЕ

Морской мусор присутствует во всех морских средах обитания, от городских пляжей до самых отдаленных уголков океана. Пляжный мусор, вероятно, является одним из наиболее заметных последствий этой проблемы. Однако это нечто большее, чем просто эстетическая проблема. Морской мусор, в частности, пластиковый, представляет опасность для морских организмов на всех трофических уровнях, начиная от запутывания и заканчивая переносом стойких органических загрязнителей по пищевой цепи (данный эффект связан с микропластиком – частицами пластика менее 5 мм).

Чтобы уменьшить поступление мусора в морскую среду, необходимо определить его источники и пути распространения. Самым эффективным способом достижения этой цели является проведение регулярного мониторинга морского мусора на пляжах, а также сравнение результатов в разных регионах.

Исследование морского мусора в регионе Финского залива проводится в течение нескольких лет. Эта деятельность включает разработку методов мониторинга как макромусора, так и микромусора, а также экспериментальную работу по изучению поведения микромусора в окружающей среде и в пищевой цепи.

В восточной части Финского залива мониторинговые исследования пляжного мусора начаты в 2018 году и осуществляются ежегодно, что позволяет изучать процессы накопления и распределения морского мусора разных размерных фракций. Поэтому целью данного исследования является анализ загрязненности частицами микромусора и, в частности, микропластика пляжей Невской губы и восточной части Финского залива на основе сезонных съемок РГГМУ 2018–2021 гг. для выявления источников и путей попадания микрочастиц на пляжи Финского залива, а также для понимания факторов, влияющих на их распространение в прибрежной зоне. Для этого были поставлены следующие задачи:

- рассмотреть особенности распределения морского мусора на пляжах российской части Финского залива,
- провести классификацию пляжей по степени их загрязненности в 2018–2021 гг.,
- произвести сравнение полученных данных с результатами других исследований в данном регионе,
- выявить источники поступления мусора на пляжи восточной части Финского залива,
- сформулировать рекомендации по снижению микропластиковой нагрузки на Невскую губу и Финский залив.

1 Описание проблемы микропластикового загрязнения морской среды

Долгое время отходы считались проблемой для территорий вблизи промышленных площадок и густонаселенных городских районов, но не для морских экосистем, однако после открытия Большого Тихоокеанского мусорного пятна проблема морского мусора стала известна широкой аудитории [1]. В настоящее время морской мусор оказывает негативное воздействие как на экономику и благосостояние людей, живущих у моря, так и на морские экосистемы [2]. Ежегодно в Мировой океан попадает до 20 млн т пластиковых отходов [3]. Морской мусор легко преодолевает границы между странами; он может быть найден рядом с местом его происхождения, а может переноситься течениями и ветрами. Это затрудняет оценку распределения морского мусора и поиск его источников.

Микромусор – это частицы как природных, так и синтетических материалов с наибольшей размерностью до 5 мм. Микропластик бывает первичным (гранулы – мелкие полимерные частицы, используемые при производстве различной продукции) и вторичным (фрагменты, возникающие при разрушении более крупных пластиковых изделий) [4].

Микропластик был обнаружен в организмах-фильтраторах и прочих бентосных организмах [5]. Лабораторные исследования показали, что многие морские беспозвоночные, такие как двустворчатые моллюски, иглокожие, амфиподы и зоопланктон, могут поглощать микропластик. Результаты этого исследования можно дополнительно оценить, рассмотрев варианты трофического переноса и его потенциальное значение. Оба вида двустворчатых моллюсков, и особенно голубые мидии, проглатывали большое количество гранул, с которыми они контактировали. Способность двустворчатых моллюсков поедать микромусор недавно была продемонстрирована и в других морских районах. Было подсчитано, что в Балтийском море за один год голубые мидии фильтруют объем воды, эквивалентный всему морскому бассейну. Таким образом, голубые мидии

образуют важные связи между пелагическими и бентосными экосистемами, а заросли голубых мидий являются важным источником пищи для позвоночных, таких как плотва (*Rutilus rutilus*) и обыкновенная гага (*Somateria mollissima*). Также балтийский моллюск *M. balthica* является добычей придонных видов рыб, таких как камбала. Таким образом, нет никаких сомнений в том, что в случае воздействия микропластика двустворчатые моллюски будут действовать как эффективное связующее звено с более высокими трофическими уровнями. Инвазивные полихеты-спиониды *Marenzelleria spp.* в настоящее время являются наиболее распространенными мягкотелыми животными в Балтийском море, максимальная численность которых, по оценкам, превышает 5000 особей на м². Хотя количество проглоченных гранул у *Marenzelleria spp.* было заметно ниже, чем у двустворчатых моллюсков, они, несомненно, могли способствовать трофическому переносу микропластика из-за их широкого распространения и высокой численности, а также в прибрежной среде, подверженной интенсивному антропогенному воздействию, поскольку они могут жить в условиях эвтрофного, обедненного кислородом дна, где микропластика больше, чем в открытом море. Таким образом, вполне вероятно, что в «горячих точках», таких как городские прибрежные зоны, микропластик может стать реальной и долговременной проблемой для морских обитателей, поскольку он ошибочно принимается за пищу и поглощается различными распространенными и многочисленными таксонами. Бентосные животные подвержены наибольшему риску поглощения микропластика, особенно организмы-фильтраторы [6].

Было обнаружено, что присутствие гранул размером 7,3 мкм значительно снижало количество водорослей, поедаемых веслоногими *Centropages typicus*, тогда как гранулы размером 20,6 мкм не оказывали заметного влияния на потребление водорослей. Это говорит о том, что *C. typicus* может питаться водорослями больше, чем гранулами размером 20,6 мкм (но не может отличить водоросли от гранул размером 7,3 мкм), или что

только более мелкие гранулы влияют на питание копепод (т. е. объекты размером 7,3 мкм достаточно малы, чтобы застрять между внешними придатками или быть повторно проглоченным). Сходные данные наблюдались у науплиев *Acartia clausi* и *Calanus pacificus*, которые выборочно питались мелкими водорослями, избегая более крупных гранул, но не могли отличить водоросли от гранул одинакового размера. Было обнаружено, что концентрации 4000 гранул/мл было достаточно, чтобы привести к значительному снижению скорости поглощения водорослей. Это соотношение достигало насыщения при концентрациях >5000 гранул/мл. Сокращение питания водорослями может иметь серьезные последствия для копепод, поскольку ограниченное потребление энергии, особенно у видов с минимальным запасом липидов (например, *Centropages*, *Acartia*), может привести к снижению плодовитости и роста или увеличению смертности. Не известно, можно ли считать 5000 частиц/мл экологически значимой концентрацией для микропластика размером <10 мкм. Постоянная фрагментация пластикового мусора в сочетании с растущей популярностью товаров для дома, содержащих микропластик, предполагает, что морской пластиковый мусор со временем становится в среднем меньше. Однако из-за сложностей отбора и извлечения проб, а также в связи с отсутствием унифицированных методологий отбора проб микропластик по-прежнему считается малоизученной фракцией морского мусора, при этом нет согласованных данных, касающихся пластикового детрита <333 мкм в диаметре. Результаты исследования подтверждают, что проглатывание морского микропластика зоопланктоном в океане возможно. Потенциальные воздействия включают влияние на здоровье человека, трофическую передачу загрязняющих веществ хищникам и возникновение фекалий, содержащих микропластик. В настоящее время необходимы более полные знания о степени загрязнения вод Мирового океана микропластиком [7].

Пластик часто содержит опасные добавки, может адсорбировать гидрофобные стойкие органические загрязнители и переносить эти вещества в морские пищевые цепи [8].

1.1 Зарубежные исследования пляжного мусора на побережьях Балтийского моря

Мониторинговые исследования морского и, в частности, пляжного мусора важны для выявления источников его поступления в морскую среду. В Балтийском регионе исследования пляжного мусора проводятся на протяжении нескольких лет [9-12]. Первые масштабные исследования пляжного мусора были проведены в 2011–2013 гг. в рамках проекта MARLIN, в ходе которых на побережьях Швеции, Финляндии, Эстонии и Латвии было обнаружено от 75 фрагментов макромусора на 100 м пляжа на сельских пляжах до 236 – на городских [9]. Было установлено, что основными источниками морского мусора в Балтийском море являются морской транспорт, рыболовство, бытовые стоки, а также рекреационная деятельность на побережье [10].

В 2014-2016 гг. были проведены широкомасштабные исследования микропластикового загрязнения немецких пляжей. В пляжных отложениях вдоль немецкого побережья Балтийского моря обнаружены концентрации микропластика 0–7 частиц/кг сухого осадка и 2–11 волокон/кг. Эти значения являются своего рода нижним пределом, так как выбор был основан на интенсивно окрашенных элементах. Концентрации как окрашенных частиц, так и волокон были самыми высокими в устье Пене, впадающей в Балтийское море, и в бухте Ядебузен. В сочетании с аналогичными выводами предыдущих исследований, близлежащие места промышленных выбросов (завод по переработке бумаги, очистные сооружения) и районы портов могут быть определены как основные пути поступления микропластика. Концентрации окрашенных частиц и волокон были сопоставимы с цифрами,

полученными на острове Нордерней в Северном море и на бельгийских пляжах, и были на порядок ниже, чем аналогичные наблюдения на острове Зюльт, в районе шельфа Хельгоlanda и бельгийской гавани. Хотя это делает побережье Балтийского моря одним из наименее загрязненных микропластиком районов, следует помнить, что собственно Балтийское море служит местом конечной аккумуляции загрязняющих веществ. В то же время тот факт, что почти все пробы с пляжа содержали несколько однозначно идентифицированных частиц или волокон микропластика, означает, что загрязнение микропластиком повсеместно распространено на немецком побережье Балтийского моря и должно рассматриваться как загрязнитель морской пищевой сети.

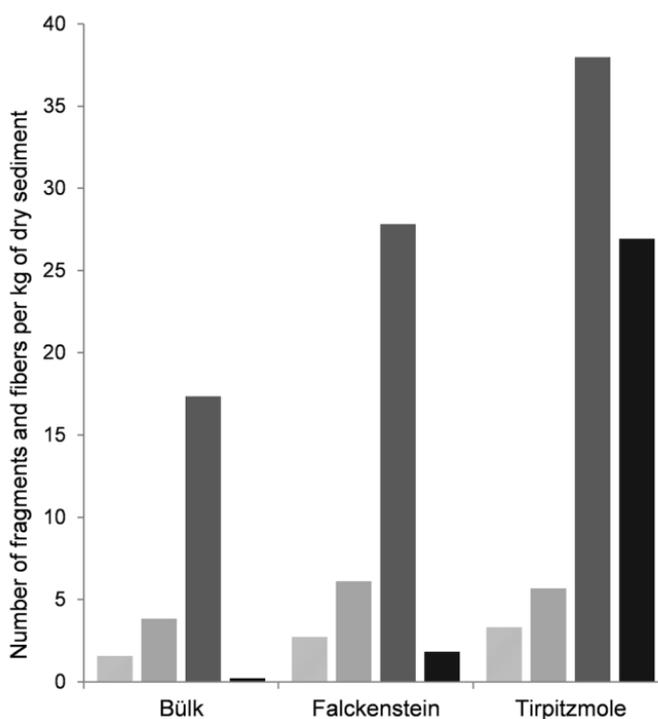


Рисунок 1.1 – Количество синтетических волокон (светло-серый); цветных волокон (серый); всех волокон, включая прозрачные, черные и белые (темно-серый); и пластиковых фрагментов (черный) в пересчете на килограмм сухого веса [14]

Сравнительно высокие концентрации частиц размером с зоо- и фитопланктон, обнаруженных в устьевой среде, особенно важны, поскольку эти места служат местом размножения и развития молоди рыб и других видов [13]. На пляжах Кильского фьорда количество найденных частиц колеблется от 2 до 30 частиц на килограмм сухой массы (Рисунок 1.1) [14].

При этом на пляжах немецкого острова Рюген количество микропластика составило уже 80–100 частиц на килограмм сухой массы в слое песка (Рисунок 1.2) [15].

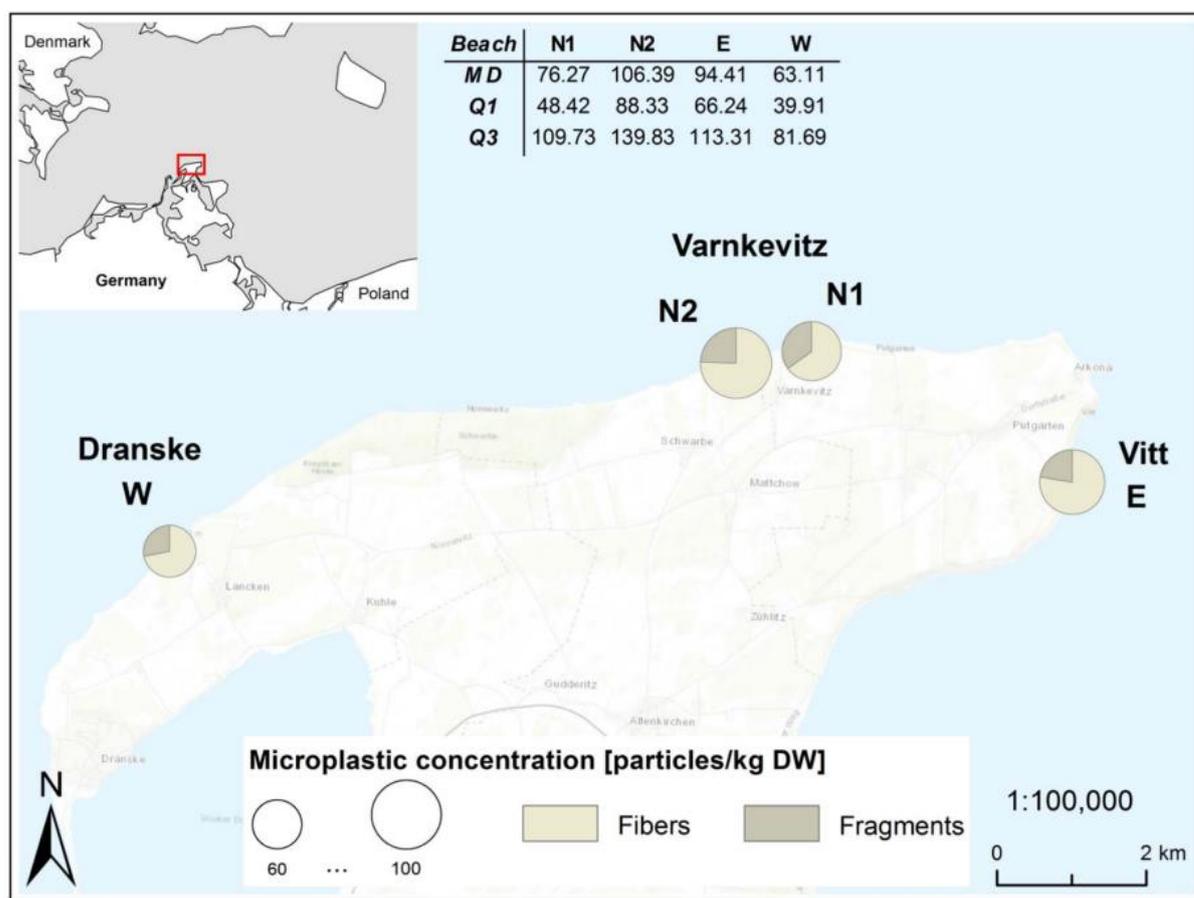


Рисунок 1.2 - Концентрация (медианная) частиц микропластика на кг сухого веса по форме на разных участках пляжа на острове Рюген. В таблице показаны медианы, а также значения нижнего и верхнего квартилей [15].

Пляжи на территории Польши также загрязнены микропластиком, его концентрации на поверхности песка составили от 25 до 43 частиц на

килограмм сухого веса в 2014 г. Полученные результаты показывают, что важным фактором, влияющим на концентрацию микропластика в пляжных отложениях южной части Балтийского моря, может быть степень урбанизации ближайших районов водосбора. Высокие концентрации (до 43 частиц/кг сухого веса) были характерны для дюнных пляжей сильно урбанизированной бухты. Заметно более низкие концентрации (25 частиц/кг сухого веса) наблюдались на пляжах открытого моря, где урбанизация слабее. Нижний предел размера микропластика, обнаруженного в морских донных и пляжных отложениях, составлял 0,1 мм. Наиболее часто встречающиеся размеры микропластика колебались в пределах от 0,1 до 2,0 мм, при этом в исследуемой области преобладали прозрачные волокна [16].

В 2014–2016 гг. на пляжах Германии и Литвы были проведены мониторинговые исследования [11] загрязненности визуально различимым микромусором (2–5 мм) с помощью методик, которые в дальнейшем были использованы в настоящей работе. Были получены следующие результаты: встречаемость частиц микромусора составила от 0,02 до 3,9 частиц/м². Исследования разных авторов показывают, что микромусор обнаруживается на всех пляжах. Однако очень сложно сравнивать результаты оценки загрязнения из-за различий в используемых методиках. К тому же авторы могут описывать загрязнение всеми типами микромусора, а могут акцентировать внимание только на микропластике.

1.2 Исследования пляжного мусора на российских побережьях Балтийского моря

Юго-восточная Балтика.

В российском секторе Балтийского моря исследования микропластика в пляжевых песках ведутся с 2015 г. Первые исследования были проведены в Калининградской области; изучение загрязненности морских экосистем микропластиком началось именно с прибрежной зоны. Установлено, что на

пляжах Калининградской области микропластик присутствует и на поверхности песка, и на глубине больше 1 м, а концентрации варьируются от 2 до 572 частиц на килограмм сухого веса (среднее значение для всех проб — 99 единиц/кг сухого веса, а среднее значение, исключая образцы из линий заплеска и слои с пиковыми значениями — всего 56 единиц/кг сухого веса) [17].

Также на наличие микропластика исследуются и другие морские среды. Во-первых, образцы донных отложений, отбираемые на различном отдалении от берега. В 2015-2016 гг. в них обнаружено в среднем 416 частиц микропластика/кг сухого веса [18].

Во-вторых, исследуются пробы морской воды из водной толщи над разными глубинами. В 2015-2016 гг. средняя концентрация микропластика в воде составила 37,4 шт/м³ для всех проб и 50,6 шт/м³ для проб, взятых над прибрежным мелководьем [18].

Финский залив

На побережьях восточной части Финского залива изучение морского мусора было начато РГГМУ в 2018 г. [19]; было обнаружено, что все побережья Финского залива и Невской губы загрязнены пластиковым мусором всех фракций – от макро- до микромусора. Параллельное исследование на станциях РГГМУ 2019 г. [20] показало разброс концентраций микропластика в пляжевых отложениях от 15 до 210 частиц на килограмм сухой массы в Невской губе. Модельные исследования 2019 г. выявили тенденции распространения микропластика в Невской губе (Рисунок 1.3) [20].

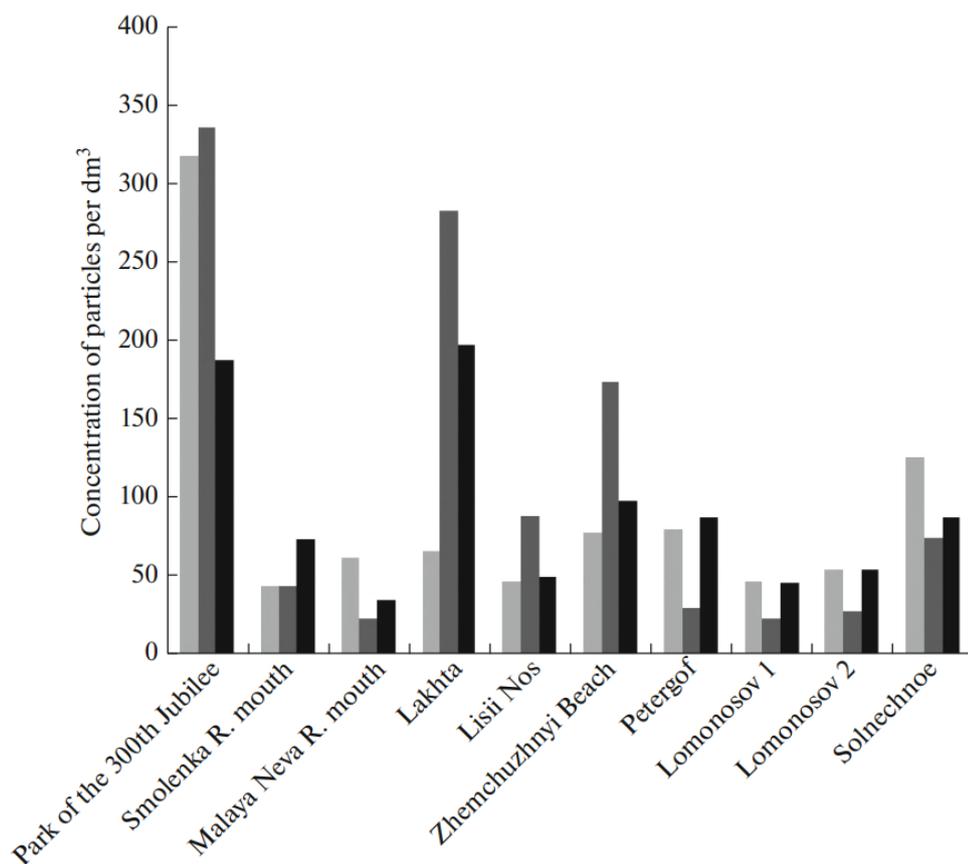


Рисунок 1.3 - Распределение микропластика в донных отложениях и прибрежных грунтах по результатам исследования проб из Невской губы Финского залива (частиц/дм³) [20].

В целом исследования в Невской губе и Финском заливе указывают на гораздо более высокие концентрации микропластика на российском побережье по сравнению с прибрежной зоной других стран Балтийского моря.

2 Физико-географическая характеристика Финского залива

Удлиненный, узкий и относительно неглубокий Финский залив является восточной частью Балтийского моря, на его побережье расположены Эстония, Финляндия и Россия. Исторически его западная граница определяется по линии Пыясаспеа – Осмуссаар – город Ханко. Он расположен между $59^{\circ} 11'$ с.ш. $22^{\circ} 50'$ в.д. и $60^{\circ} 46'$ с.ш. $30^{\circ} 20'$ в.д. [21]. Даже в масштабе Балтийского моря, Финский залив является относительно небольшим водоемом. Его длина составляет около 400 км, а ширина варьируется в западной и средней частях от 48 км между Таллином и Полуостровом Порккала до 135 км между Нарвским заливом и Коткой. Его объем $1\ 103\ \text{км}^3$ и площадь поверхности $29\ 948\ \text{км}^2$ составляют около 5% объема и около 7,5% площади поверхности Балтийского моря. Тем не менее, он имеет относительно большое влияние на Балтийское море из-за площади его водосбора - $420\ 990\ \text{км}^2$, то есть около четверти общей площади водосбора Балтийского моря, и связанного с этим стока рек [21].

2.1 Климат Балтийского региона

Балтийское море расположено между морской умеренной и континентальной субарктической климатическими зонами. Влажные и относительно мягкие морские воздушные массы из Северной Атлантики и континентальные воздушные массы из России противодействуют друг другу и, таким образом, создают крайне изменчивый климат Балтики.

Климат формируется под действием западных ветров и арктических фронтов. Вместе они обуславливают значительные сезонные и межгодовые изменения климата. Балтийское море располагается на североатлантическом штормовом пути, и поэтому циклоны часто приходят на Балтику, принося теплые воздушные массы и уменьшая разницу температур между северными и южными широтами. Западные ветры особенно важны для рассеивания

тепла зимой, когда разница температур между морскими и континентальными воздушными массами максимальна.

Южная и западная части Балтийского моря относятся к средневропейской зоне мягкого климата. Северная часть обычно располагается на пути полярного фронта, который отделяет холодную арктическую воздушную массу от более теплых и влажных воздушных масс на юге. Полярный фронт находится на Балтике в течение зимы; центральная часть Балтийского моря, включая Финский залив, может быть в теплой или холодной стороне фронта в зависимости от года. Летом фронт расположен дальше на севере.

Во время теплого лета и холодной зимы погода может быть очень стабильной в течение нескольких недель.

2.1.1 Ветровой режим в районе Балтийского моря

Ветровой режим в районе Балтийского моря определяется общей атмосферной циркуляцией над Северной Европой. Район относится к зоне западных ветров. Как правило, на Балтике существует сильный зональный тип циркуляции, в котором появляются движущиеся на восток циклоны. Широты, где расположен Финский залив, испытывают большую сезонную изменчивость солнечной активности, что, в свою очередь, влияет на характер ветра.

Ветровой режим открытых вод регулируется юго-западными ветрами, которые преобладают на Балтике. Местные западные и восточные ветры, дующие вдоль Финского залива, также относительно часты. Умеренный (от 6 до 10 м/с) и сильный ветер (> 10 м/с) дуют в основном с юга или юго-запада на северном побережье, но на южном побережье чаще с юго-запада или запада. Юго-восточные ветры редки и относительно слабы [22].

Измерения на борту судов и на маяках показывают, что средняя скорость ветра в открытом заливе значительно выше, чем на побережье. Самые сильные ветры дуют с юга или юго-запада; средняя трехчасовая

скорость ветра может достигать 25 м/с один раз в столетие. Восточные ветры могут достигать 23 м/с [22].

Местные ветры играют важную роль в летнее время. Частые и относительно сильные ветры во второй половине дня, наблюдаемые вдоль северного побережья летом, возникают как результат взаимодействия основного течения, морского бриза и формы залива.

2.1.2 Перемещение водных масс в Финском заливе

Водные массы в Финском заливе постоянно перемещаются. Общая схема циркуляции является циклонической (против часовой стрелки) с восточным течением в южной части и западным течением в северной части. Регулярный приток воды в залив происходит вблизи южного побережья. В северной части Финского залива водные массы движутся в обратном направлении как у поверхности, так и на глубине.

Истинная циркуляция намного более изменчива и зависит от местных кратковременных ветровых условий. Классические исследования [23] выяснили циклоническую циркуляцию водных масс, то есть циркуляцию против часовой стрелки, но также отметили значительную изменчивость на уровне отдельных небольших течений. Фактически, мгновенные течения почти полностью маскируют долгосрочную среднюю циркуляцию. Хотя в южной части залива наблюдается движение водных масс на восток, а в северной – на запад, мгновенное течение может быть направлено в обратную сторону. Например, в восточной части Финского залива в определенные годы водные массы могут двигаться по часовой стрелке [24].

Вещества, сброшенные в Финский залив, могут широко распространиться от точки их сброса в течение нескольких месяцев. Знание схем циркуляции водных масс имеет важное значение для оценки нанесенного ущерба, например, от аварий при транспортировке нефти.

Существует множество мезомасштабных направлений поверх общей структуры движения водных масс [25]. Схема циркуляции содержит

многочисленные относительно устойчивые вихри с неизменным размером, которые, вероятно, в некоторой степени зависят от сложного рельефа дна.

2.1.3 Перемещение водных масс в Невской губе

В Невской губе и на мелководье восточного побережья залива наблюдается устойчивая и сильно извилистая схема течения в западном или северо-западном направлении, очевидно, подкрепленная обильным стоком реки Невы. Движение водных масс в Невской губе требует отдельного, более подробного рассмотрения.

Волнение в Невской губе. Невская губа – беспокойный водоем. Так, около 90% всего времени здесь наблюдается волнение и лишь 10% времени – штиль. Довольно сильное волнение может продолжаться 5 – 7 суток подряд. Ветровое волнение из Финского залива через Южные и Северные ворота у острова Котлин почти не проникает в Невскую губу, этому препятствуют отмели и другие подводные преграды. Волнение развивается в самой губе и находится в большой зависимости от силы, продолжительности и направления ветра. При прочих равных условиях восточный и в особенности западный ветры вызывают большее волнение, чем ветры северного и южного направлений.

Частая смена силы и направления ветра, сложный рельеф дна и прибрежной зоны, наличие многочисленных препятствий – все это создает неупорядоченную систему волн в Невской губе. В одно и то же время здесь имеются волны различной высоты, крутизны и длины. В целом же длина волны в 10-15 раз превышает ее среднюю высоту. Наибольшая высота волны, считая от подошвы до гребня, повторяемостью примерно 1 раз в 30-50 лет, указана в Таблице 1 [26].

Течение воды в Невской губе. Расход и уровень воды, сила и направление ветра, наконец, толщина ледяного покрова – вот перечень основных факторов (кстати, весьма переменчивых во времени), воздействующих на систему течений в Невской губе.

Таблица 1 – Наибольшая высота ветровой волны в Невской губе Финского залива [26]

Район, участок	Высота волны, м
Прибрежная зона (0,5-1,0 км от берега), отмели бара реки	1,5-2,0
Центральная часть губы, Южные и Северные ворота у острова Котлин, фарватеры бара реки Невы	2,0-2,5

Вопрос о системе течений в Невской губе долгое время оставался недостаточно изученным и прояснился лишь в последние годы.

Коснемся вначале системы течений в Невской губе в маловетренную погоду. Воды Невы вливаются в губу по фарватерам взморья и Морскому каналу. Часть воды при этом растекается по отмели у взморья, образуя водоворотные зоны. Наибольшая из этих зон находится между северной дамбой Морского канала и Корабельным фарватером в пределах Белой мели и Канонерской отмели. Далее вся вода соединяется в один мощный поток, охватывающий срединную и северную часть губы. С подходом к острову Котлин большая часть воды уходит в Северные ворота и меньшая – в Южные. Этот последний поток воды встречает на своем пути преграду в виде Ораниенбаумской отмели, и часть его отклоняется в южном, а затем и восточном направлениях, образуя слабое противотечение вдоль южного берега губы. Вблизи оголовка дамбы Морского канала противотечение сворачивает к северу, соединяясь с потоком воды, выходящим из Морского канала. Тем самым замыкается обширная водоворотная зона в южной части губы. У северного побережья из-за резкого изменения рельефа дна также возникает небольшое противотечение (Рисунок 2.1). Около 80% всей воды в Невской губе находится в транзитной зоне, остальные 20% вовлекаются в водоворотные зоны.

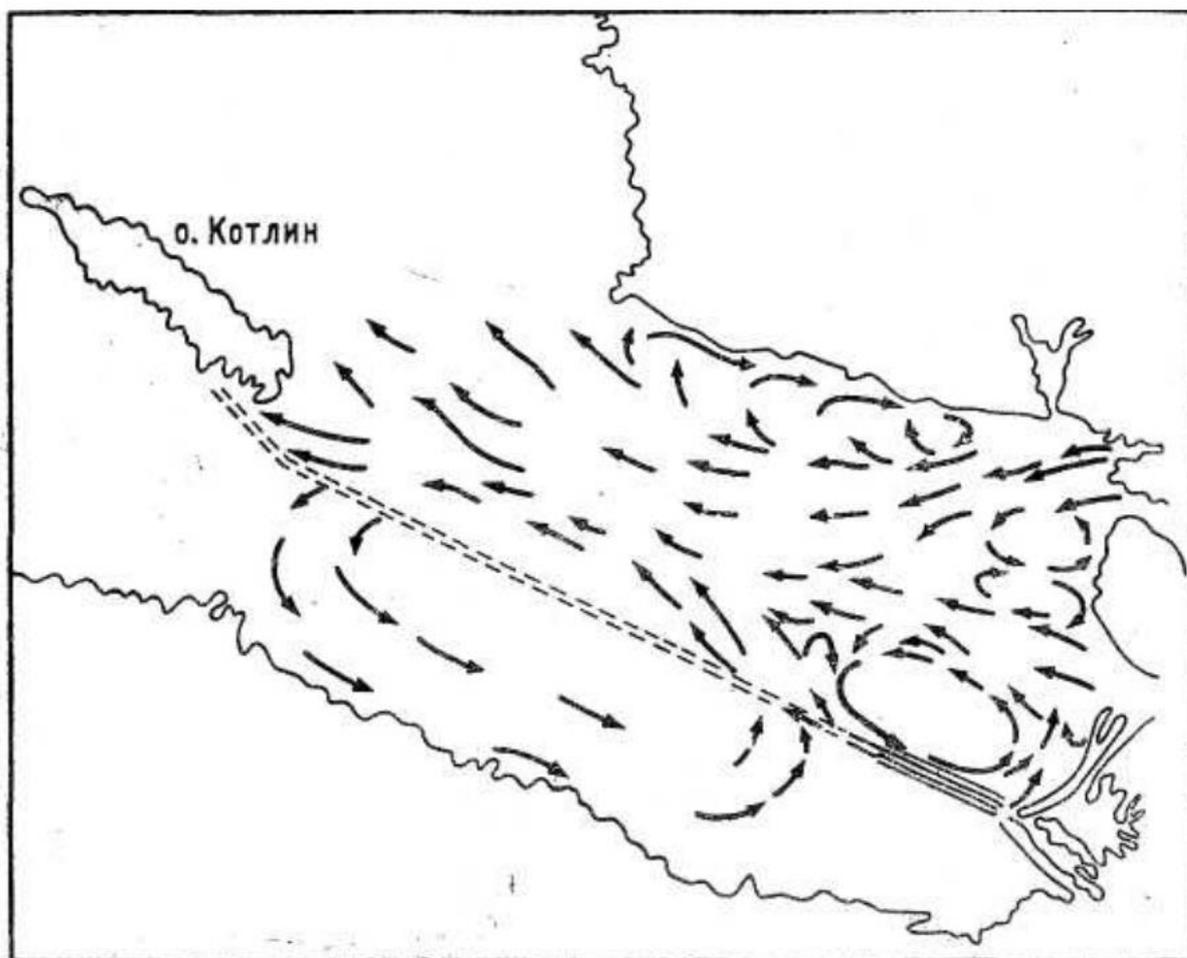


Рисунок 2.1 – Система течений в Невской губе (при отсутствии ледяного покрова в маловетренную погоду) [26]

Поверхностная скорость стокового течения в начале фарватеров бара 0,40-0,50 м/сек, в конце фарватеров 0,15-0,20, в основной транзитной зоне Невской губы 0,10-0,20, в водоворотных зонах 0,02-0,05 м/сек [26].

Такая система стоковых течений сохраняется в губе в продолжение 50-70% навигационного периода. С увеличением же расхода в реке Неве возрастает площадь транзитной зоны и соответственно уменьшается площадь водоворотных зон.

Ветер над Невской губой во многом меняет нарисованную картину. Водные массы губы вовлекаются ветром в движение, которое называется дрейфовым течением. Западный, встречный ветер сокращает транзитную

зону и увеличивает водоворотную. Восточный, попутный ветер приводит к обратному эффекту.

Коренная же перестройка системы течений происходит не столько из-за самого ветра, сколько в результате вызванных ветром колебаний уровня воды. Всякое повышение уровня в Невской губе означает, что из Финского залива в губу поступает морская вода. В случае же спада уровня часть воды из Невской губы перетекает в Финский залив.

При умеренном западном ветре и небольшой интенсивности повышения уровня (1-3 см/час) резко расширяются водоворотные зоны и сужается транзитная зона. При свежем западном ветре и интенсивности подъема уровня 3-5 см/час поток воды расслаивается: в поверхностном слое течение почти всюду направлено на восток, а в придонном сохраняется западное направление. Наконец, при сильном западном ветре и очень интенсивном повышении уровня (5 см/час и более) течение восточного направления охватывает в губе всю толщу воды от поверхности до дна.

Свежий восточный ветер, сопровождаемый падением уровня воды с интенсивностью 1-3 см/час, приводит к тому, что транзитная зона резко расширяется, а водоворотные зоны соответственно сужаются. В случае сильного восточного ветра и интенсивности спада уровня 4-6 см/час и более поток в губе повсеместно направлен на запад в сторону Финского залива.

Зимой с появлением ледяного покрова и уменьшением расхода воды заметно падает скорость течения в Невской губе. Частичное же перемерзание Ораниенбаумской отмели у острова Котлин и уменьшение пропускной способности Южных ворот приводит к тому, что обширная водоворотная зона в южной части губы вообще превращается в застойную зону.

На систему течений в невской губе определенное влияние оказывает деятельность человека, и это приводит порой к самым неожиданным последствиям. Так, в последние годы для нужд строительства города из подводных карьеров в северной части губы вынуто около 20 млн м³ грунта. В результате этого воды Большой Невки и Средней Невки сконцентрировались

в наиболее глубокой части Елагинского фарватера. Расход воды, поступающей на мористые кромки Собакиной и Северной Лахтинской отмелей, резко уменьшился, а вдольбереговое северное противотечение усилилось. Северный берег Невской губы во многих местах начал смещаться к югу. В частности, вблизи устья Лахтинского разлива берег отступил на 200-300 м к югу [26].

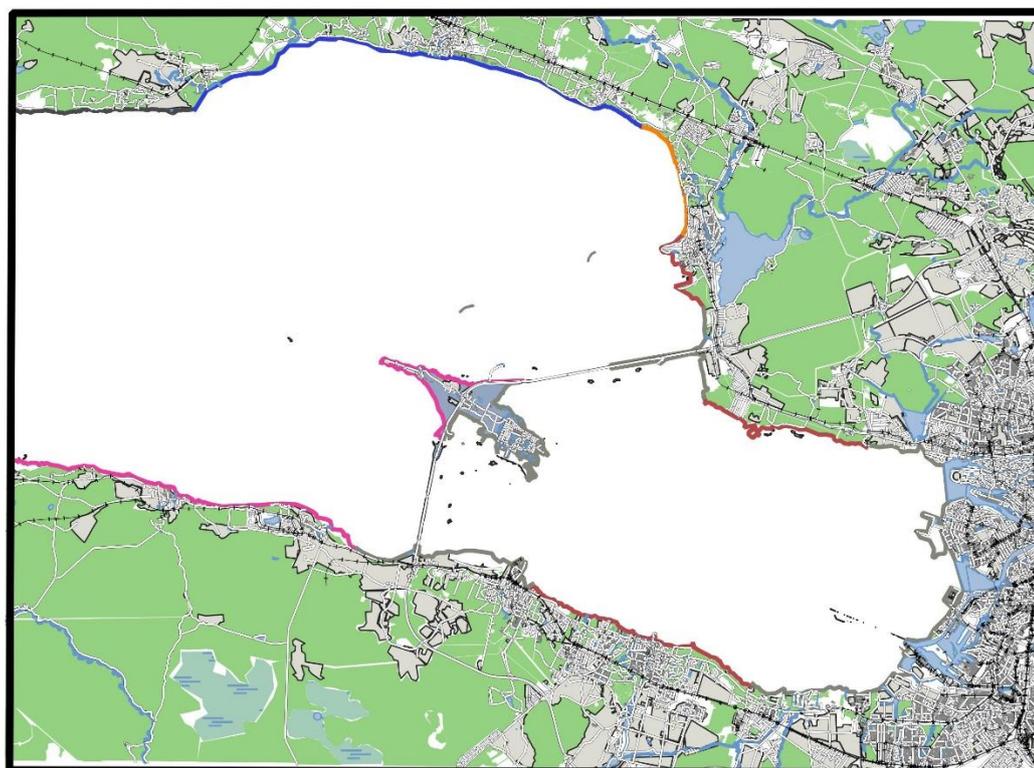
2.2 Геологическое строение и рельеф побережий восточной части Финского залива

Практически повсеместно в пределах восточной части Финского залива и его береговой зоны верхняя часть геологического разреза представлена поздне- и послеледниковыми четвертичными отложениями. Обнажения коренных пород встречаются на отдельных участках берегов и подводного берегового склона, а также на вершинах подводных поднятий западной части Выборгского залива.

В основании разреза четвертичных отложений залегает комплекс поздневалдайских ледниковых моренных образований неоплейстоцена (осташковский горизонт). Флювиогляциальные отложения в береговой зоне занимают незначительные площади и распространены в виде затопленных озовых гряд. Озерно-ледниковые отложения охватывают значительные площади морского дна. На суше эти отложения представлены в основном песками, за исключением наиболее восточной части рассматриваемой площади, где поверхность выходят ленточные глины. Голоценовый разрез донных осадков подразделяется на два слоя. Осадки нижнего слоя в пределах дна акватории представлены глинами и алевроглинами. В пределах суши встречаются также песчаные отложения этого возраста. Выше по разрезу залегают осадки морского слоя, время формирования которого приходится на литориновую и постлиториновую стадии развития Балтики. Для береговой

зоны как выше, так и ниже уровня моря характерно развитие песчаных литориновых и постлиториновых осадков волнового генетического типа [27].

В восточной части Финского залива к группе берегов, сформированных субаэральными и тектоническими процессами и мало измененных морем, относится берег Выборгского залива (Рисунок 2.2). К группе берегов, формирующихся преимущественно под воздействием неволновых факторов, относятся берега устьевых участков крупных рек.



Типы и подтипы берегов

— Техногенный

— Абразионный валунный с локальными песчаными пляжами в бухтах

— Аккумулятивный песчаный

— Абразионно-аккумулятивный валунный с песчаными пляжами в вогнутостях берега

— Абразионный валунный

— Абразионно-аккумулятивный песчаный

Рисунок 2.2 – Типы и подтипы берегов Восточной части Финского залива

На остальном протяжении Финского залива берега сформированы преимущественно волновыми процессами. Наиболее распространен тип

выравнивающихся абразионно-аккумулятивных бухтовых, выделяются также небольшие по протяженности участки выровненного абразионного берега (мыс Флотский – мыс Песчаный), выровненного аккумулятивного берега (от поселка Солнечное до Сестрорецка и в восточной части Нарвского залива), вторичнорасчлененного абразионно-аккумулятивного бухтового берега (в районе поселка Большая Ижора). Берега восточной части Невской губы испытали настолько значительное антропогенное воздействие, что могут быть отнесены к техногенному типу.

Для большинства берегов характерен невысокий (около 1 м) уступ размыва. Наибольшей высоты (до 30 м) активные абразионные уступы достигают в южной береговой зоне в районе форта Красная Горка [27].

Интенсивность размыва (абразии) берегов восточной части Финского залива неодинакова. Северный берег Финского залива, относящийся к шхерному типу, стабилен. Береговая зона состоит здесь из коренных пород (граниты Выборгского массива) и ледниковых отложений и характеризуется обилием островов и узких заливов, изрезанной береговой линией, крайне слабой морфо- и литодинамикой. Широко распространены такие формы рельефа, как друмлины, бараньи лбы, курчавые скалы и валунные банки. В Выборгском заливе и мелких бухтах, особенно в их кутовых частях, защищенных островами и мысами от воздействия волн, имеют место застойные условия с развитием на подводном береговом склоне водной растительности.

Относительно стабильны также берега Копорской и Лужской губ, за исключением зоны активного техногенного воздействия в районе порта Усть-Луга. На наиболее ценных в рекреационном отношении участках береговых зон (Курортный район Санкт-Петербурга, Невская губа, южный берег Финского залива в районе поселка Большая Ижора) преобладают процессы абразии и отступления береговой линии. Так, скорости отступления берега с 1990 по 2005 г., по данным анализа материалов дистанционного зондирования, 50 см/год, максимальные – 2 м/год. Максимальное отступление

берега с 1990 по 2005 г. (до 35–40 м) установлено на участках пляжей в поселках Серово, Ушково, Комарово и Репино [27]. Локальные зоны аккумуляции и выдвигения берега наблюдаются лишь в устьевых участках небольших водотоков. Большинство участков стабильной береговой зоны приурочено к выходам ледниковых отложений с бронирующим валунным бенчем.

Размыв отмечен также на ряде участков северного берега Невской губы – отступление берега в поселке Лисий Нос и Ольгино с 1990 по 2005 г. составило 20–25 м [27]. Для южного берега Невской губы более характерно зарастание подводного берегового склона гидрофитной растительностью, и процессы размыва здесь незначительны.

Активная деградация песчаного пляжа происходит на юго-западном берегу острова Котлин. В 2006 г. на участке, примыкающем к Комплексу защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений, наблюдалась аккумуляция песчаного материала. Ширина перемычки, отделяющей заполненный водой карьер от акватории залива, в 2006 г. составляла около 40 м, а в 2008 г. она сократилась до 20–25 м, и непосредственно у КЗС карьер соединился с заливом [27].

Активной литодинамикой характеризуется южная береговая зона залива в районе поселков Лебяжье – Большая Ижора. На субширотном участке берег активно размывается с формированием в толще голоценовых морских песков абразионного уступа высотой от 1 до 3–5 м. На участке береговой зоны в районе поселка Большая Ижора на протяжении позднего голоцена происходило образование сложных песчаных кос, напоминающих по строению косы так называемого азовского типа. Между косами расположены постепенно отчленяемые от акватории и зарастающие лагуны. Здесь наблюдается чередование зон активного размыва, транзита и аккумуляции наносов, амплитуда изменений береговой линии достигает 5–7 м как в зонах абразии, так и на аккумулятивных участках [27].

Изменения происходят в результате вдоль берегового перемещения аккумулятивных выступов. С 2004 по 2009 г. наблюдалась тенденция их перемещения в направлении потока наносов (на восток) со скоростью 13–15 м в год. К западу от устья реки Черная за последние 30 лет сформировался крупный аккумулятивный выступ [27]. К востоку от устья расположена сложная петлевидная коса, дистальный конец которой продолжает расти, в то время как в прикорневой части наблюдается интенсивный размыв и на урезе обнажаются голоценовые лагунные илы.

В южной береговой зоне к востоку от мыса Серая Лошадь абразионные процессы наиболее интенсивны у форта Красная Горка, а также на восточном побережье Лужской губы, где береговая линия отступает со скоростью 2–2,5 м/год. Песчаные пляжи в вершинах Лужской и Копорской губ относительно стабильны, за исключением участка строительства Усть-Лужского порта. Стабилен сейчас и пляж в российской части Нарвского залива, который испытал катастрофический размыв после шторма 1975 г. Он имеет ширину около 50 м, в тыловой его части сформировалась устойчивая авандюна [27]. Признаком стабилизации литодинамических процессов является также наличие на прибрежном мелководье девяти подводных вдоль береговых валов, сложенных хорошо сортированным мелкозернистым песком. Выступающие в море участки берега Кургальского и Сойкинского полуостровов на значительном протяжении укреплены валунным бенчем.

2.3 Антропогенное воздействие на Невскую губу

В результате антропогенных изменений седиментационных процессов к 2007 г. песчаные мелководья северной береговой зоны Невской губы покрылись тонкозернистыми техногенными осадками. Увеличение содержания взвеси в воде было связано с одновременным осуществлением работ по намыву новых территорий, дноуглублению в пределах фарватеров и

сбросу грунта («дреджингового материала») в отвалы Южной и Северной Лахты.

В 2005—2008 гг. в отвалы Северной и Южной Лахты было сброшено 21,39 млн м³ грунта, изъятая при реконструкции фарватеров вблизи восточных берегов Невской губы и при реализации проекта «Морской фасад Санкт-Петербурга» [28]. Сброс грунта производился с помощью пульпопроводов, оборудованных специальными рассеивателями для равномерного распределения сбросов по площади. Это более экономичный способ, чем перевозка баржами, но менее приемлемый с точки зрения ущерба, причиненного экосистеме именно данного района, который является транзитной зоной эстуария Невы.

Взмученные легкие фракции глинистого грунта распространялись со шлейфами мутных вод далеко от зоны сброса, поэтому зона рассеяния на порядки превышала площадь отвалов. Высокие значения концентрации взвешенных осадков наблюдались по спутниковым данным на расстоянии более 100—120 км от источников их образования. Особо выделялся шлейф в отвале Северной Лахты в 2006 г., когда сброс при строительстве Морского фасада достигал максимальных объемов [28].

С учетом количества жителей города – 5,3 млн человек и норматива накопления ТКО – 381 кг на человека в год, в Санкт-Петербурге образуется примерно 2 млн тонн ТКО. Учитывая долю пластика в структуре ТКО – 15% - можно судить о примерно 300 тысячах тонн полимерных отходов. Согласно Территориальной схеме, большинство ТКО, образующихся в городе, транспортируют на объекты размещения, обработки и утилизации отходов в Янино и на Волхонском шоссе. Емкость этих предприятий меньше, чем предполагаемое количество образующихся отходов, поэтому можно предположить, что не все отходы в Санкт-Петербурге утилизируют или размещают на полигонах.

Большое количество мусора может оставаться в местах отдыха людей, в том числе на побережьях водоемов города и области. Также пластиковые

отходы могут попадать в канализацию (случайно или намеренно) и при неисправности очистных сооружений со сточными водами оказываются в водоемах и водотоках. По причине того, что Финский залив имеет колоссальную площадь водосбора, весь мусор, поступающий в Ладожское озеро, малые реки и в Неву, выносится течением последней в воды залива и накапливается в Невской губе. Из-за особенностей течений и ветровых нагонов, этот мусор рано или поздно выносится на побережье.

3 Материалы и методы исследования

3.1 Описание методик отбора проб микромусора на песчаных пляжах

Отбор проб из пляжных отложений относительно прост и является самым дешевым способом оценки загрязнения пластиком. Методики отбора проб пляжного микромусора можно разделить на две большие группы.

Первая группа методов представляет собой отбор проб песка. Типовой набор оборудования – деревянно-металлическая рама, стальная ложка/лопата и сито с ячейкой 5 мм для отделения МП от песка на площадке. Типичная процедура сбора выглядит следующим образом: рама помещается в песок; зачерпываются верхние 1–5 см песка и помещаются в металлическую или стеклянную емкость; таким способом отбирается несколько образцов вдоль и поперек пляжа, если это необходимо, а затем они транспортируются в лабораторию. Для отбора песка также может использоваться металлическая трубка, которая опускается в песок вертикально на определенную глубину, затем плотно закрывается, а песок перемещается в пластиковый пакет [29]. Затем в лаборатории пробы песка просеиваются через несколько сит с разным диаметром ячейки и с помощью оптического микроскопа и УФ-лампы отбираются частицы пластика для дальнейшего анализа. Иногда образцы подвергают плотностной сепарации с использованием раствора $ZnCl_2$, а также очищают от органического материала при помощи жидкого окисления [30]. Данный метод применяется при изучении микропластикового загрязнения российского побережья юго-восточной Балтики и является модифицированным методом, предложенным NOAA [31].

Вторая группа методов представляет собой непосредственно отбор частиц микромусора прямо на пляже. Крупные частицы могут отбираться вручную с поверхности песка на отрезке 100 метров [32]. Также для отбора частиц микромусора существуют различные приспособления. Например, сито с размером ячейки 2 мм для отделения визуально различимого

микромусора от мелкого песка. Через него просеивают слой песка толщиной 2 см с квадратов площадью 1 м². Их количество и расположение может различаться в зависимости от целей исследования [33]. Также для отбора проб микромусора могут использоваться песочные грабли с размером ячеек 2 мм, с помощью которых также просеиваются верхние 2 см песка, но уже на площади от 50 м² в непрерывной полосе от уреза воды до линии растительности [11].

На побережьях восточной части Финского залива с 2018 года применяются две международные методики обследования пляжей [34, 35], разработанные для балтийских побережий на основе опыта мониторинга проекта OSPAR. Первая методика – фрейм-метод, который предполагает изучение зоны заплеска с полигоном 40 м² для отбора крупного мусора (более 5 мм) и двумя квадратами площадью 1 м² для отбора микромусора размером 2–5 мм (с помощью сита с ячейкой 2 мм) (Рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Полигоны, используемые для «фрейм-метода» (а) и сито для просеивания песка (b)

Вторая – рейк-метод, который предусматривает изучение всего побережья от уреза воды до линии растительности с полигоном минимум 50 м²; песок при этом просеивается с помощью специальных граблей с ячейкой 2 мм (Рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Полигоны, используемые для «рейк-метода» (справа) и специальные грабли для просеивания (слева)

Оба метода направлены на отбор визуально-различимой фракции мусора (2–5 мм), но при этом исследуются две функционально различные зоны пляжа.

Общими преимуществами данных методик являются их простота и стандартизированность, а также относительная дешевизна используемого инвентаря и возможность модернизировать его в зависимости от типа пляжа, например, использовать сита с различным размером ячеек в зависимости от фракции песка.

Общие недостатки – ложное занижение оценок загрязненности пляжей из-за возможных уборок (в особенности для мусора крупнее 5 мм). Несмотря на то, что данные методы были разработаны для регулярно убираемых

пляжей балтийских стран, фактор проведения уборок и их качества существенно влияет на результаты. Другими неудобствами является попадание крупного песка, камней и водорослей в сито или грабли. Это характерно в том числе и для Финского залива, так как его акватория подвержена эвтрофированию, а пляжи Невской губы, являющейся эстуарием, сложены речными песками.

Дополнительные сложности возникают при исследовании пляжей с крупным песком (в данном случае это пляжи Невской губы, где размер песчинок приближается к 2 мм и встречается много гравия). Для таких пляжей методы нужно адаптировать, например, используя инвентарь с ячейкой более 2 мм (как это изначально предполагается в методике). Однако, применение последовательно сит двух размеров ячеек усложняет и увеличивает время работы как минимум вдвое.

Еще один отмеченный недостаток: даже с учетом контрольных полигонов или широких трансект не всегда возможно получить объективную картину загрязнения пляжа, так как мусор распределен крайне неравномерно между полигонами. Часто разница между полигонами составляет более 100%.

Преимуществом «фрейм-метода» является возможность работы с влажным песком, тогда как для «рейк-метода» это является фактором, сильно усложняющим просеивание песка – грабли возможно применять для просеивания исключительно мелкого и сухого песка, что для условий Финского залива с постоянно меняющейся погодой и обильными дождями является крайне важным фактором. Преимущество «рейк-метода» – возможность исследовать пляж по всей его ширине и изучить все зоны накопления мусора – от линии воды до линии растительности, тогда как «фрейм-метод» позволяет получить информацию только для одной зоны – зоны заплеска и обрушения волн.

Таким образом, два данных метода могут быть использованы параллельно, дополняя друг друга.

3.2 Описание методов обработки и анализа данных с помощью программного обеспечения

Отобранные частицы микромусора подсчитывались и классифицировались по типу материала: пластик, стекло, бумага, металл и прочие материалы (Рисунок 3.3).

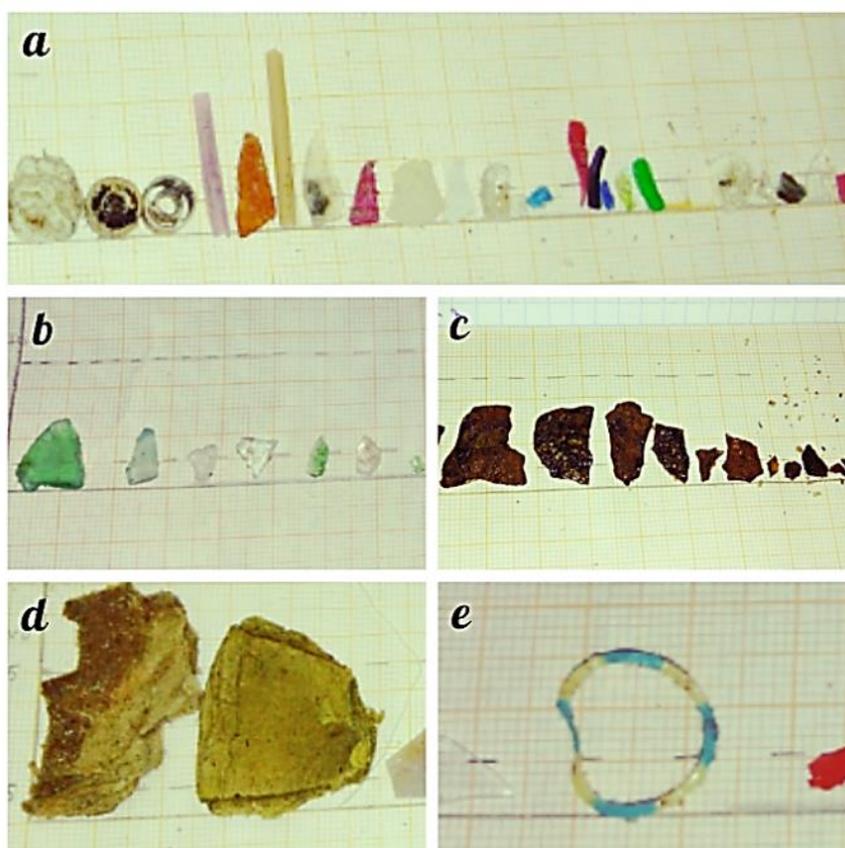


Рисунок 3.3 - Типы микромусора на пляжах восточной части Финского залива: пластик (a), стекло (b), металл (c), бумага (d), прочее (e)

Полученные данные вносились в протоколы (по пляжам) и обрабатывались с помощью программного обеспечения Microsoft Excel и PAST4 (кластеризация методом Уорда) (Рисунок 3.4). Данный алгоритм использует методы дисперсионного анализа для оценки расстояний между

кластерами. Он минимизирует сумму квадратов расстояния для двух кластеров, формирование которых происходит на каждом шаге. Метод Уорда приводит к образованию кластеров примерно равных размеров с минимальной внутриклассовой дисперсией. В целом метод Уорда эффективен, но он стремится создавать кластеры малого размера, что практически не сказывается на качестве классификации при сравнительно небольших размерах исходной выборки [36].

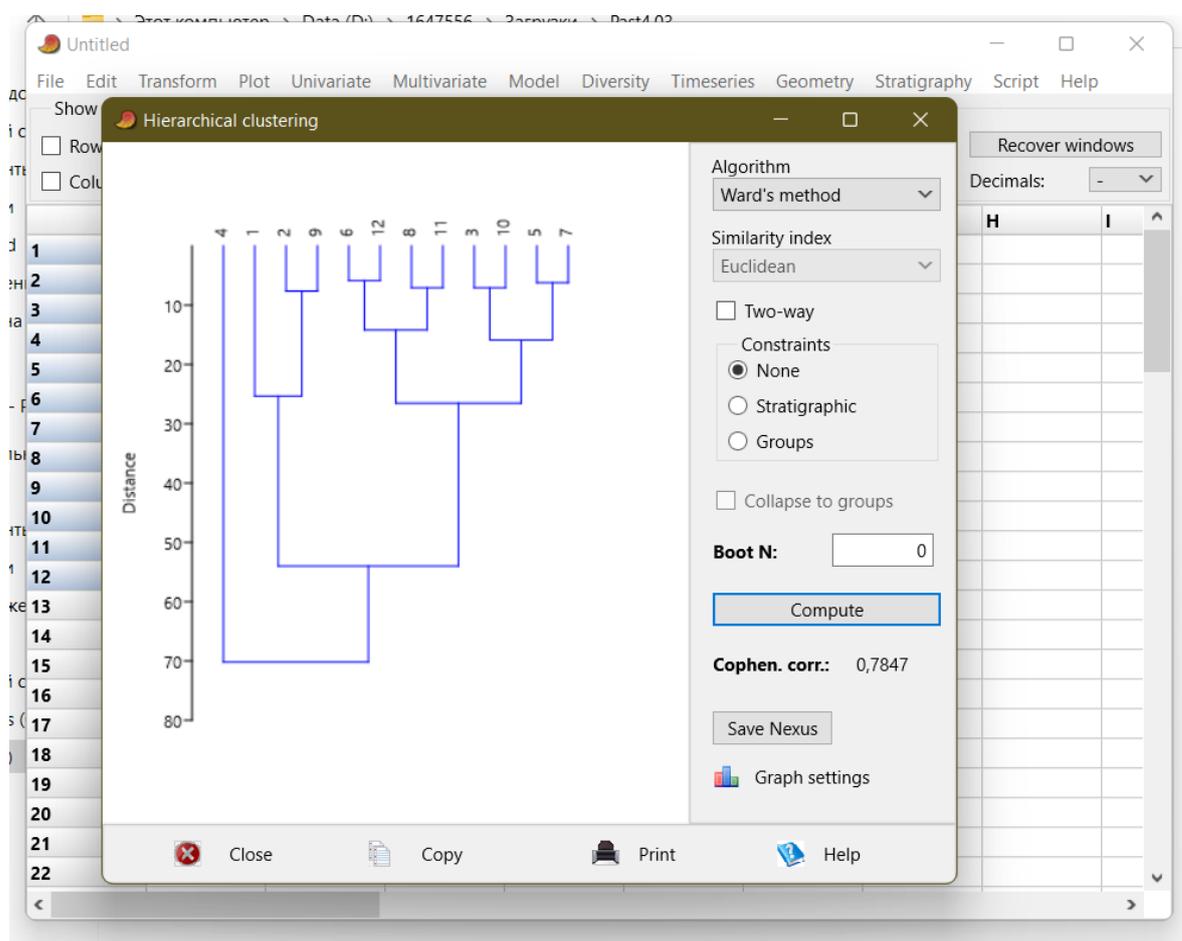


Рисунок 3.4 – Интерфейс программного обеспечения PAST 4.03

Данный метод был применен потому, что в период 2018–2021 гг. съемка проводилась раз в год и матрица данных насчитывала не более 40 значений концентраций микромусора в зоне заплеска.

Для большей наглядности с помощью программного обеспечения Quantum GIS были созданы карты (Рисунок 3.5).

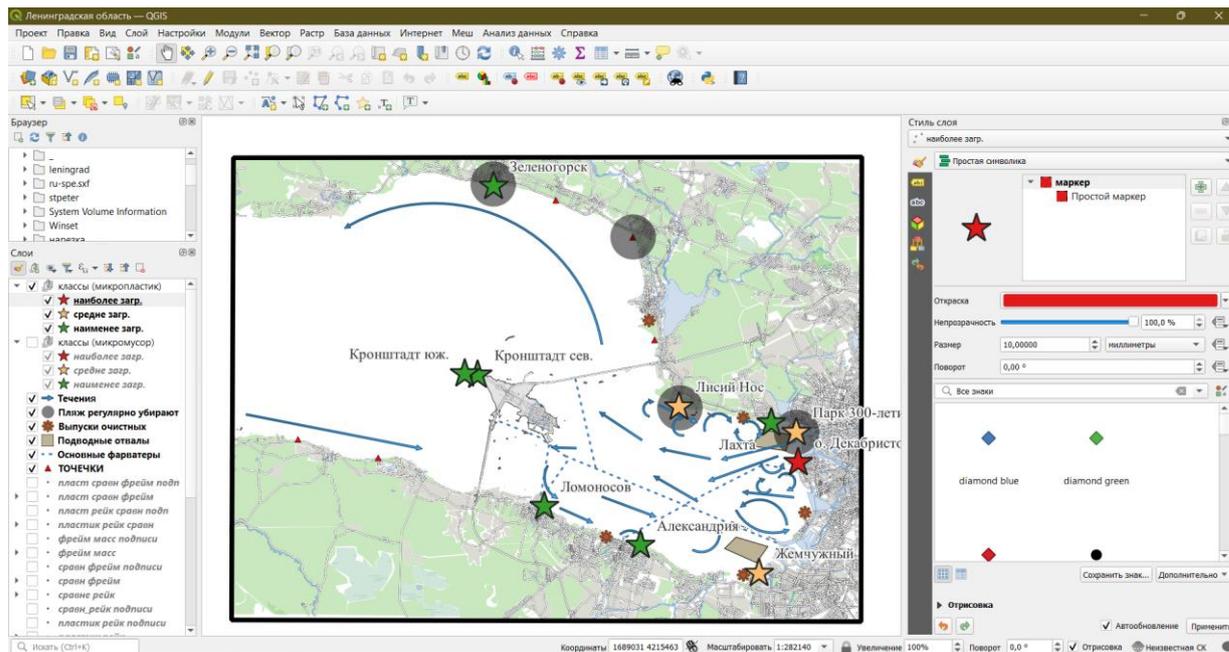


Рисунок 3.5 – Интерфейс программного обеспечения Quantum GIS

На них были нанесены результаты классификации пляжей по степени загрязненности, основные фарватеры и течения Невской губы [26], подводные отвалы грунта [28], точки выпуска сточных вод со станций водоочистки, а также отмечены пляжи, на которых производится регулярная уборка.

3.3 Описание пляжей, исследованных в 2018-2021 гг.

Исследования проводились на 13 пляжах Санкт-Петербурга и Ленинградской области (Рисунок 3.6) в летние месяцы 2018–2021 гг.

В 2018 году пробы пляжного мусора отбирались в период с 21 июня по 11 июля. В 2019 году на 10 пляжах из 13, указанных на карте. В 2019 году пробы отбирались с 26 июня по 11 июля, исследования так или иначе затронули все 13 указанных пляжей. В 2020 году сроки пробоотбора были значительно смещены и выпали на период с 4 июля по 3 августа. В 2021 году

мониторинговые исследования проводились с 14 июня по 7 июля (Таблица 2).

Таблица 2 – Периоды исследования пляжей с 2018 по 2021 гг.

Название пляжа	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
О. Декабристов	Июнь	Июнь	Июль	Июнь
Парк 300-летия	Июнь	Июнь	Июль	Июнь
Лахта	Июнь	Июнь	Июль	Июнь
Жемчужный	Июнь	Июль	Июль	Июнь
Лисий Нос	Июнь	Июль	Июль	Июнь
Александрия	Июнь	Июль	Июль	Июнь
Ломоносов	Июнь	Июль	Июль	Июнь
Солнечное	-	Июль	-	Июнь
Зеленогорск	Июль	Июль	Август	Июль
Кронштадт сев.	Июль	Июль	Август	Июль
Кронштадт юж.	Июль	Июль	Август	Июль
Большая Ижора	-	Июль	Август	Июль
Лебяжье	-	Июль	-	-

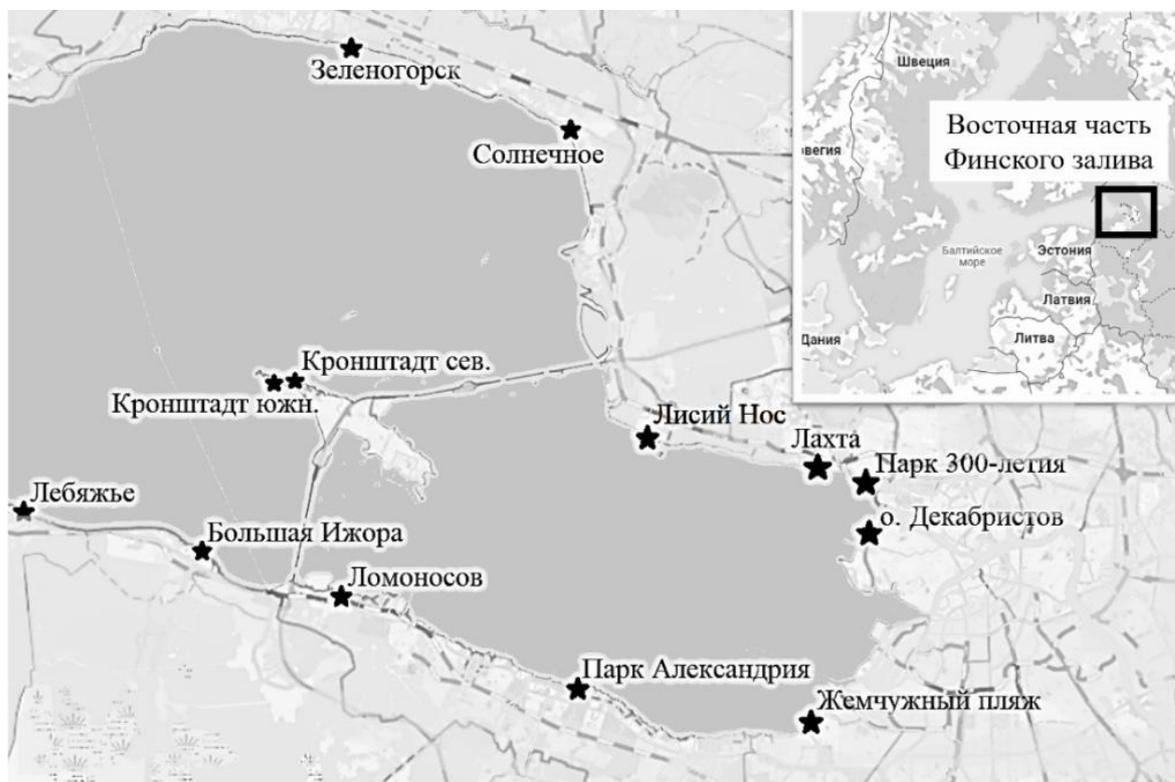


Рисунок 3.6 - Места отбора проб микромусора на побережьях восточной части Финского залива

Все исследованные пляжи достаточно сильно отличаются друг от друга по расположению относительно центра Санкт-Петербурга, уровню рекреационной нагрузки, наличию регулярных уборок и прочим факторам.

Пляж на острове Декабристов является частью насыпной территории Морского фасада Санкт-Петербурга, расположен близко к центру города (Рисунок 3.7). Он является необорудованным и находится возле высотных жилых кварталов. На нем не производятся уборки, однако количество отдыхающих людей достаточно высокое. Потенциальным источником загрязнения микромусором может быть не только рекреационная деятельность людей, но и судоходство, так как пляж расположен в непосредственной близости от пассажирского порта.

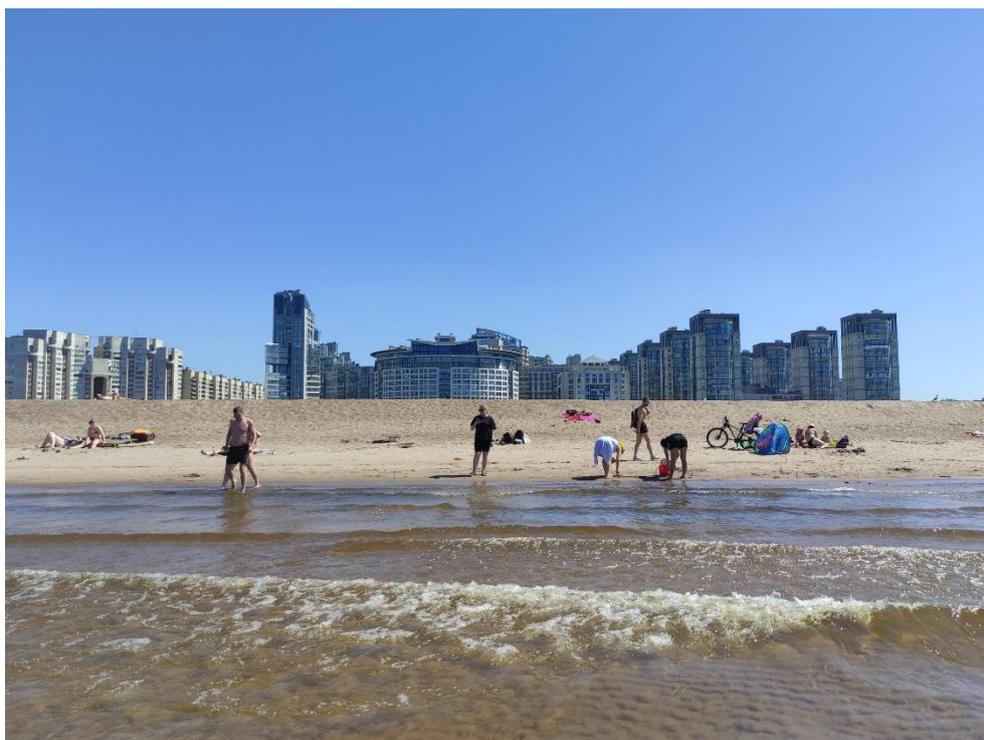


Рисунок 3.7 – Пляж на острове Декабристов, 18.06.21

Пляж в парке 300-летия Санкт-Петербурга расположен в северо-западной части Невской губы (Рисунок 3.8). Он также насыпной, является популярной зоной отдыха для петербуржцев, один из самых людных; там

периодически производятся уборки. Территория пляжа расположена рядом с жилыми кварталами, станцией метро и торгово-развлекательным комплексом, также в пешей доступности находится футбольный стадион. В 2022 году началась реконструкция пляжа и променада.



Рисунок 3.8 – Пляж в парке 300-летия, 14.06.21

Пляж в поселке Лахта расположен в северо-западной части Невской губы (Рисунок 3.9). Он является необорудованным, расположен неподалеку от строящегося Лахта-центра, яхт-клуба и выпуска сточных вод Северной станции аэрации. Сложен крупным речным песком. Из года в год наблюдается сильное загрязнение данного пляжа нетканым полотном и частями ватных палочек. На мелководье отмечены заросли тростника.



Рисунок 3.9 – Пляж в поселке Лахта, 17.06.21

Жемчужный пляж расположен в юго-западной части Невской губы рядом как с уже построенными многоэтажными кварталами, так и с теми, которые находятся на этапе строительства (Рисунок 3.10). Является одним из самых многолюдных пляжей, что очень сильно затрудняет мониторинговые исследования на наличие микромусора.



Рисунок 3.10 – Жемчужный пляж, 21.06.21

Пляж в поселке Лисий Нос расположен на северном побережье Невской губы (Рисунок 3.11). На данный момент реконструирован, и большая часть береговой линии закрыта насыпью из валунов. Рядом располагается коттеджный поселок; пляж периодически убирают. Нетронутым остался сравнительно небольшой участок пляжа, он подвергся сильному зарастанию тростником.



Рисунок 3.11 – Пляж в поселке Лисий Нос, 17.06.21

Пляж в парке Александрия располагается на южном побережье Невской губы (Рисунок 3.12). Он находится на территории парка с платным входом, поэтому рекреационная нагрузка там не очень высокая. Пляж оснащен волнорезами. Отличительной особенностью данного пляжа является бутылочное стекло в качестве основного вида микромусора.

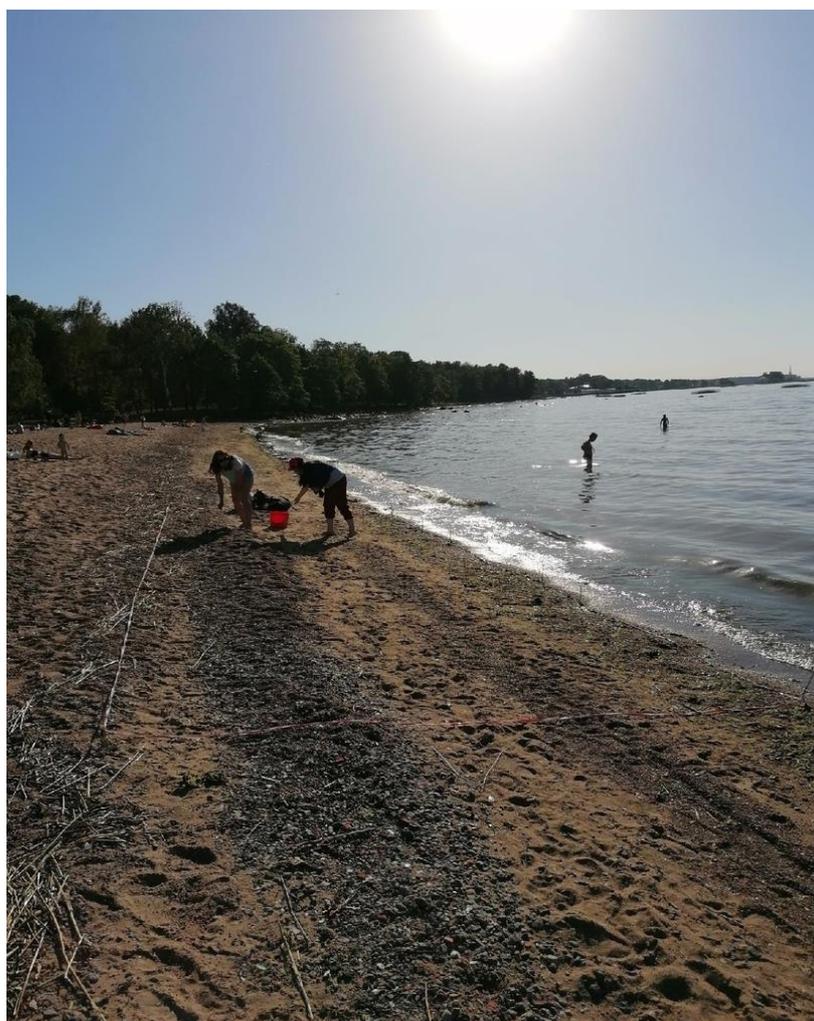


Рисунок 3.12 – Пляж в парке Александрия, 18.06.21

Последний исследованный пляж Невской губы расположен также на ее южном побережье, в городе Ломоносов (Рисунок 3.13). Данный пляж очень узкий, а из-за нагонных явлений его ширина становится еще меньше, поэтому могут возникнуть сложности с отбором проб морского мусора. Он расположен в черте города и популярен у местных жителей, однако уборки на нем не проводятся. Рядом с пляжем находится пристань и фарватер.



Рисунок 3.13 – Пляж в городе Ломоносов, 21.06.21

За пределами Невской губы было исследовано еще 6 пляжей. Ласковый пляж в поселке Солнечное расположен на северном побережье открытой части Финского залива (Рисунок 3.14). Он является обустроенным; регулярно производятся уборки. Достаточно популярен у отдыхающих.

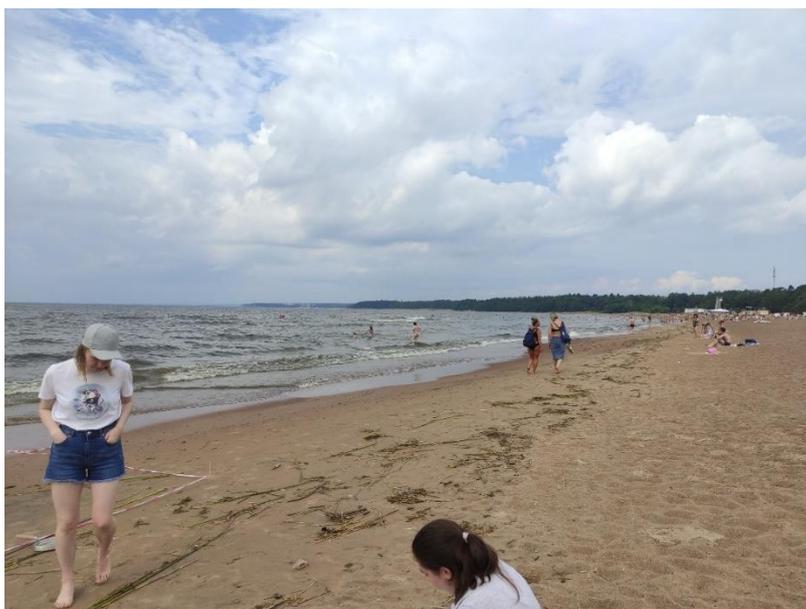


Рисунок 3.14 – Пляж в поселке Солнечное, 24.06.21

Золотой пляж в городе Зеленогорске также находится на северном побережье открытой части Финского залива (Рисунок 3.15). Он также является обустроенным и расположен на территории Зеленогорского парка культуры и отдыха. Пляж периодически убирают; он очень популярен у отдыхающих.



Рисунок 3.15 – Пляж в Зеленогорске, 27.07.20

Также исследования проводились на двух пляжах на территории заказника «Западный Котлин». Северный пляж периодически убирается (Рисунок 3.16). Южный пляж периодически убирается и находится вблизи корабельного фарватера (Рисунок 3.17). Рекреационная нагрузка на этих пляжах не очень высокая, так как они находятся на территории ООПТ и обладают плохой транспортной доступностью.



Рисунок 3.16 – Пляж на северном берегу острова Котлин, 05.07.21



Рисунок 3.17 – Пляж на южном берегу острова Котлин, 05.07.21

Кроме того, исследование морского мусора проводилось на южном побережье открытой части Финского залива на территории Ленинградской области. Во-первых, изучался пляж в поселке Большая Ижора (Рисунок 3.18). Он не обустроенный; в основном, здесь проводят время жители Большой Ижоры и окрестных населенных пунктов. Во-вторых, пляж в поселке Лебяжье, который был исследован только в 2019 году с помощью «рейк-метода».



Рисунок 3.18 – Пляж в поселке Большая Ижора, 07.07.21

4 Результаты исследования загрязненности микромусором побережий Невской губы и Финского залива в 2018-2021 гг.

4.1 Исследование зоны заплеска

В летний период 2018-2021 гг. среди всех исследованных пляжей больше всего частиц микромусора на м^2 в зоне заплеска обнаружено на пляже в самом центре города Санкт-Петербург на острове Декабристов в Невской губе. Наименьшее количество частиц микромусора было обнаружено в эти годы на отдаленных от центра пляжах – на Ласковом пляже в поселке Солнечное в открытой части Финского залива в 2019 г., на пляже в Ломоносове в 2020 г. и южном пляже острова Котлин в 2018 и 2021 г. (Рисунок 4.1). При этом в целом в 2020-2021 гг. на пляжах в зоне заплеска обнаружено меньше микромусора, чем в 2018-2019 гг.

От года к году картина загрязненности пляжей микромусором различается. В 2018 году наиболее загрязненным оказался пляж в Ломоносове в пределах Невской губы – 50 частиц микромусора/ м^2 . Наиболее чистым, как было указано выше, был южный пляж Кронштадта в открытой части Финского залива с концентрацией микромусора 3 частицы/ м^2 .

В 2019 году самым загрязненным был пляж, расположенный на острове Декабристов в Невской губе – наблюдаемая концентрация микромусора составила 56 частиц/ м^2 . Чище всего оказался Ласковый пляж в поселке Солнечное на побережье открытой части Финского залива – концентрация обнаруженного микромусора там равняется 1 частице/ м^2 .

2020 год характеризуется в целом более низкими концентраций микромусора, вероятно, из-за снижения уровня рекреационной нагрузки на побережья, поэтому даже на самом загрязненном в этом году пляже на острове Декабристов она составила всего 11 частиц/ м^2 , что в 5 раз меньше, чем это было в 2019 году. При этом сразу на нескольких пляжах эта величина

составила 1 частицу/м²: как в Ломоносове в пределах Невской губы, так и в Зеленогорске и Большой Ижоре – на обоих берегах открытой части залива.

В 2021 году снова наблюдаются более высокие уровни загрязненности. Больше всего микромусора обнаружено на Золотом пляже Зеленогорска – 27 частиц/м², тогда как меньше всего – на южном пляже Кронштадта – менее 1 частицы/м². Оба этих пляжа находятся в открытой части Финского залива.

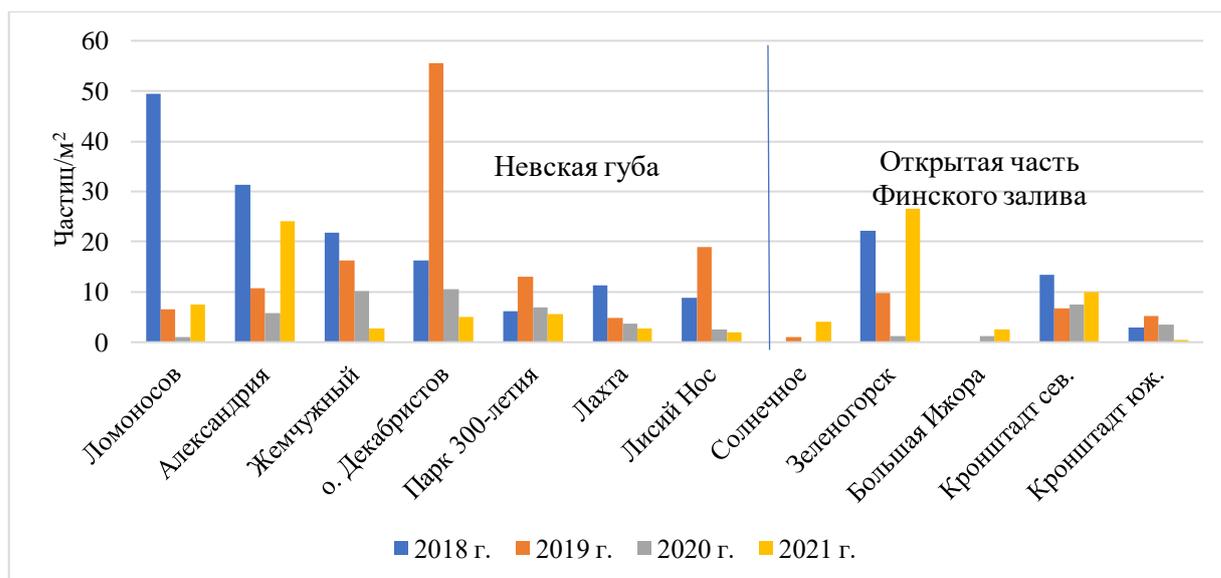


Рисунок 4.1 - Количество частиц микромусора, шт./м², в Невской губе и открытой части Финского залива в зоне заплеска, 2018–2021 гг.

Состав микромусора очень сильно различается в зависимости от пляжа и года, в котором проводились наблюдения. В 2018 году на 4 пляжах преобладал пластик (пляжи Кронштадта, Лахта и остров Декабристов), на 3 пляжах – стекло (Зеленогорск, Жемчужный и Александрия) и на 3 пляжах – прочие материалы (Лисий Нос, парк 300-летия и Ломоносов) (Рисунок 4.2).

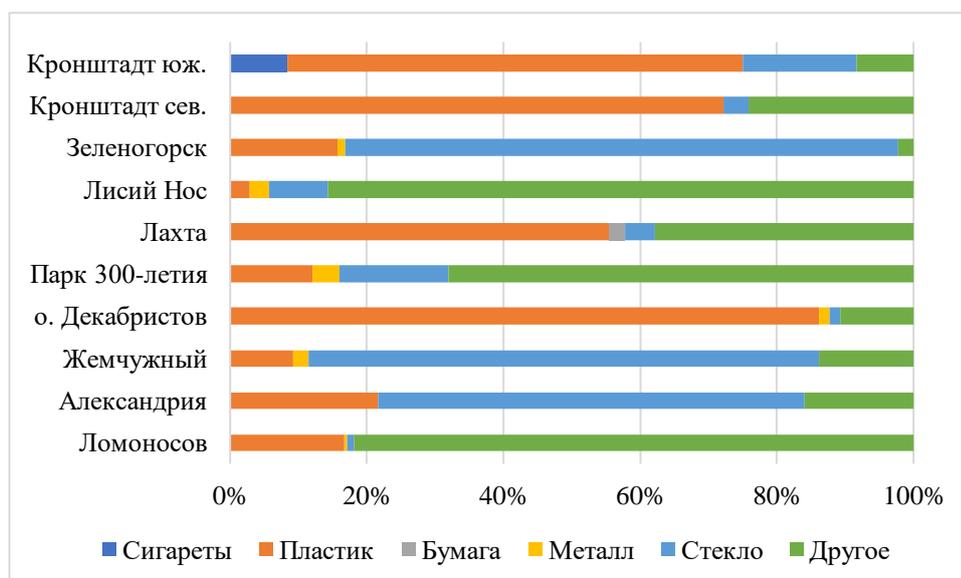


Рисунок 4.2 – Доля микромусора каждого типа, % в Невской губе и открытой части Финского залива в зоне заплеска в 2018 г.

В 2019 году пластик являлся преобладающим типом мусора на 5 пляжах Невской губы (Лисий Нос, Лахта, парк 300-летия, остров Декабристов и Ломоносов), стекло – на 2 пляжах (Александрия и Зеленогорск), металл – на 2 пляжах Кронштадта, и на 1 пляже прочие материалы (Жемчужный) (Рисунок 4.3).

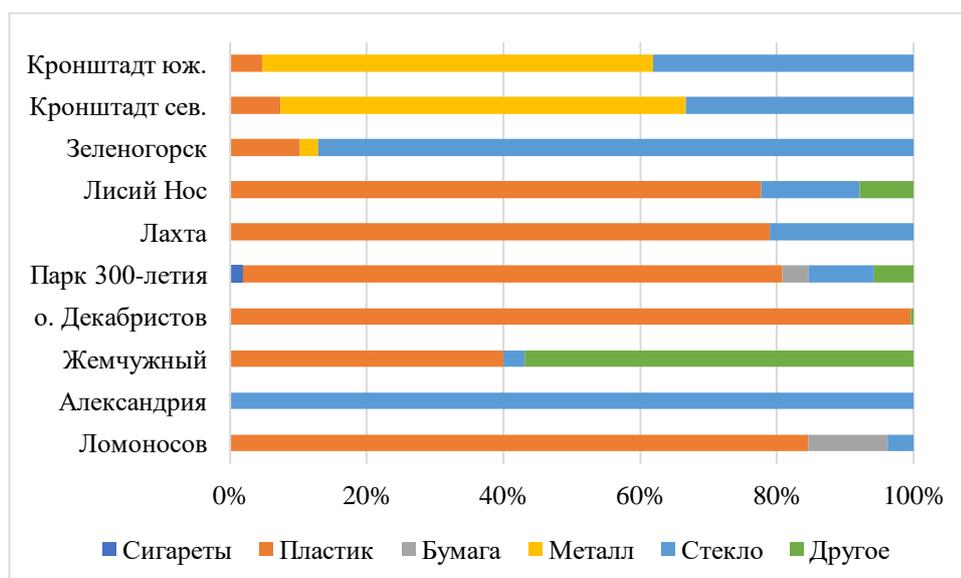


Рисунок 4.3 – Доля микромусора каждого типа, % в Невской губе и открытой части Финского залива в зоне заплеска в 2019 году

В 2020 году пластик был преобладающим типом микромусора на всех пляжах, кроме Александрии, где все так же преобладает стекло (Рисунок 4.4).

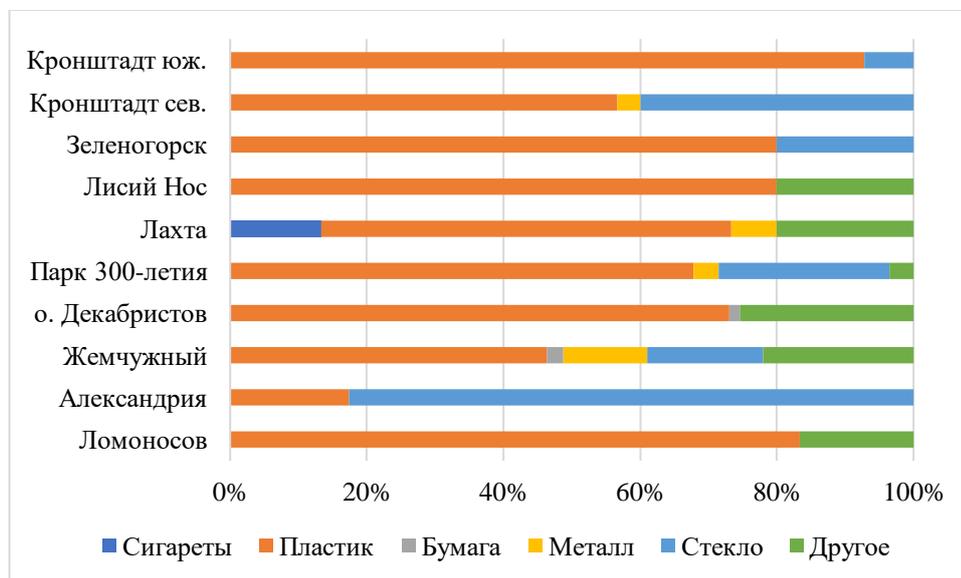


Рисунок 4.4 – Доля микромусора каждого типа, % в Невской губе и открытой части Финского залива в зоне заплеска в 2020 году

В 2021 году пластик составлял большую долю микромусора на 3 пляжах Невской губы (Лисий Нос, остров Декабристов и Ломоносов), стекло было основным типом микромусора на 5 пляжах (южный пляж Кронштадта, Зеленогорск, Лахта, парк 300-летия и Александрия), металл – на северном пляже Кронштадта, бумага – на Жемчужном пляже (Рисунок 4.5).

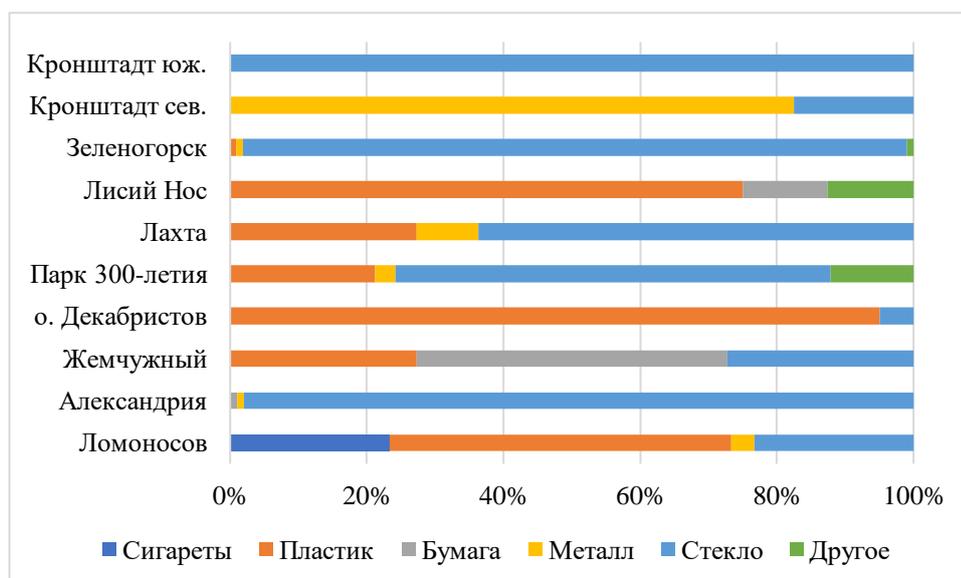


Рисунок 4.5 – Доля микромусора каждого типа, % в Невской губе и открытой части Финского залива в зоне заплеска в 2021 году

Можно наблюдать, что в Невской губе и открытой части Финского залива состав микромусора различается. На пляжах Невской губы микромусор представлен преимущественно пластиком (47%), не считая пляжа в парке Александрия, где он почти полностью представлен стеклом. За пределами Невской губы картина иная – на пляжах Кронштадта микромусор в основном состоит из металла, а на северном побережье открытой части залива – из стекла (Рисунок 4.6).

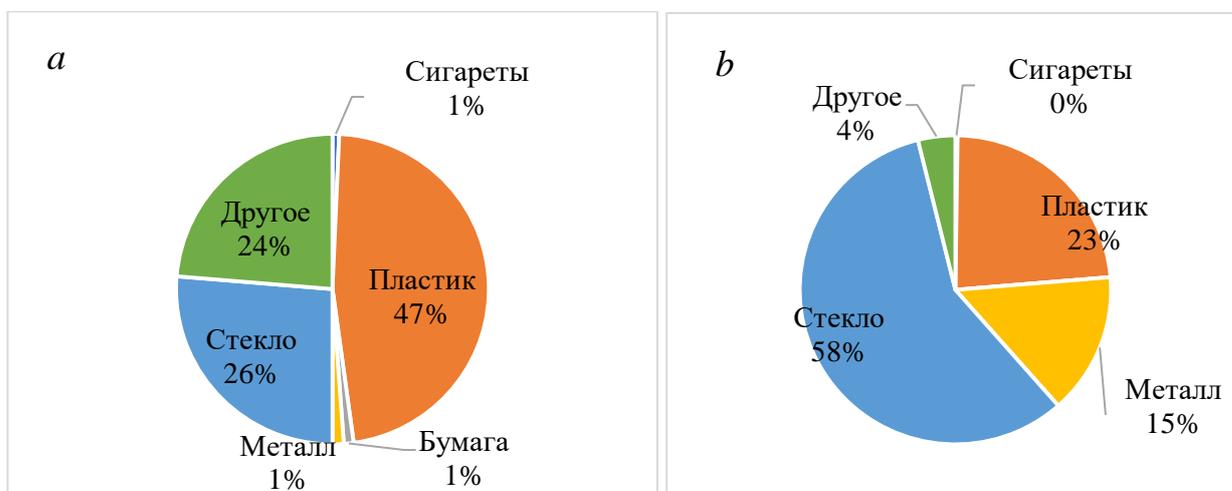


Рисунок 4.6 - Доля микромусора каждого типа, % в Невской губе (a) и открытой части Финского залива (b) в зоне заплеска, 2018–2021 гг.

Так как преобладающим типом микромусора на исследованных пляжах является микропластик, следует отдельно рассматривать его концентрации. Больше всего частиц микропластика обнаружено на острове Декабристов, меньше всего - в пробах в поселке Солнечное, в парке Александрия и на южном пляже Кронштадта (Рисунок 4.7). В целом на пляжах Невской губы в зоне заплеска микропластика больше, чем в открытой части залива за комплексом защитных сооружений от наводнений.

Что касается данных, полученных в разные годы, то они также достаточно сильно разнятся. В 2018 г. Наиболее замусоренным пластиком оказался пляж на острове Декабристов (14 частиц/м²), тогда как меньше всего микропластика было обнаружено на пляже в поселке Лисий Нос (менее 1 частицы/м²). Оба этих пляжа расположены на побережье Невской губы.

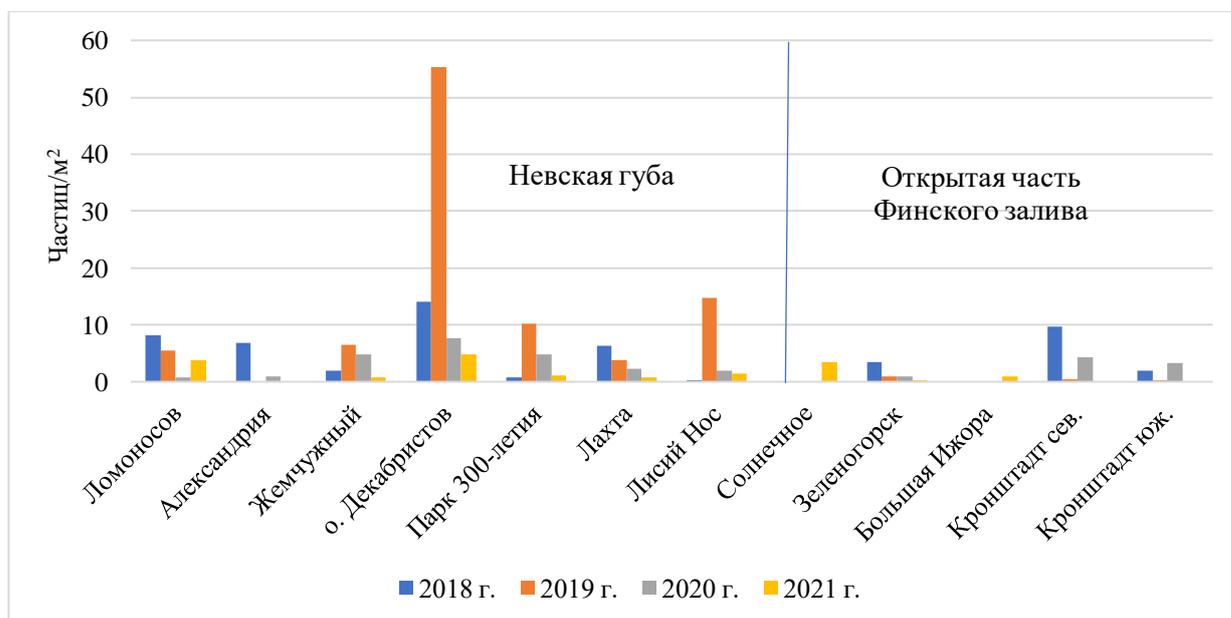


Рисунок 4.7 - Количество частиц микропластика, шт/м² в Невской губе и открытой части Финского залива в зоне заплеска, 2018–2021 гг.

В 2019 году самая высокая концентрация микропластика также наблюдались на острове Декабристов, но в этот раз была намного выше – 55 частиц/м². В этом году были пляжи, на которых микропластик не был

обнаружен – в парке Александрия (Невская губа) и в поселке Солнечное (открытая часть Финского залива).

В ходе исследования полученные данные были проанализированы с использованием статистических методов обработки. Получены среднестатистические характеристики для данных участков береговой зоны восточной части Финского залива: среднее арифметическое значение ряда (\bar{x}), медиана (Me) ряда, стандартное отклонение (σ), максимальное и минимальное значения (Таблица 3). Так, среднее количество частиц в Невской губе (12,9) выше, чем в открытой части залива (7,4), при этом величина стандартного отклонения превышает среднее значение в обоих случаях, что говорит о больших различиях между пляжами как Невской губы, так и открытой части. Действительно, на пляже на острове Декабристов в 2019 г. найдено 55,5 частиц/м², а в парке Александрия – 1 частица/м², а в 2021 г. в Зеленогорске получена концентрация 26,5 частиц/м², а на южном пляже Кронштадта – меньше 1.

Относительно микропластика наблюдается схожая картина: среднее количество частиц в Невской губе (6,1) превышает значение в открытой части залива (1,9), но в данном случае отличия более значительные.

Таблица 3 - Количество обнаруженных частиц микромусора на пляжах восточной части Финского залива в 2018–2021 гг., частиц/м²

Микромусор	\bar{x}	Me	σ	max	min
Невская губа	12,9	8,1	13,4	55,5	1,0
Открытая часть Финского залива	7,4	4,6	7,6	26,5	0,5
Микропластик	\bar{x}	Me	σ	max	min
Невская губа	6,1	3,8	10,4	55,3	0,0
Открытая часть Финского залива	1,9	1,0	2,6	9,8	0,0

Величина стандартного отклонения в обоих случаях превышает среднее значение, что, опять же, свидетельствует о сильно различающихся

концентрациях микропластика от пляжа к пляжу. Например, в 2019 г. на острове Декабристов обнаружено 55,3 частиц микропластика/м², тогда как в парке Александрия его концентрация равняется нулю. Медианное значение концентраций микропластика в открытой части Финского залива (1,0) достаточно близко к среднему значению (1,9), что говорит о чуть большей однородности данных, чем в Невской губе.

Была проведена классификация данных по загрязнению микромусором (Таблица 4) и микропластиком (Таблица 5) за 2018–2021 гг. методом Уорда с метрикой Евклида. Было выбрано разделение на 3 класса (Рисунок 4.8, 4.10) – наиболее загрязненные пляжи, средне-загрязненные пляжи и наименее загрязненные пляжи. Также были рассчитаны средние значения в каждом классе.

Наиболее загрязненным микромусором является пляж на острове Декабристов, расположенный в центре города прямо у места впадения одного из крупнейших рукавов Невы в Невскую губу, что видимо и обуславливает большое количество обнаруженного микромусора (Рисунок 4.9).

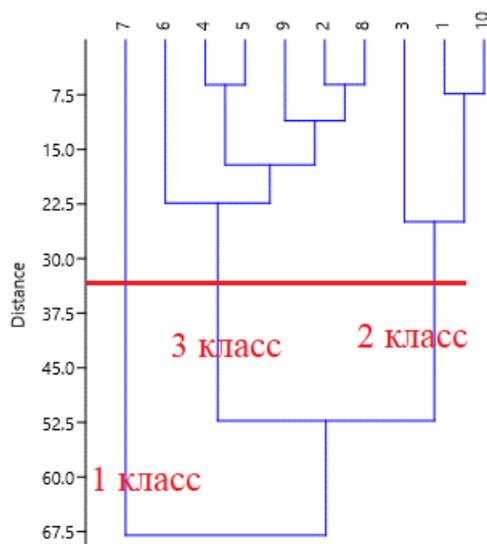


Рисунок 4.8 – Дендрограмма-результат классификации пляжей методом Уорда по загрязненности микромусором

Таблица 4 - Классификация пляжей восточной части Финского залива по концентрациям микромусора в 2018–2021 гг.

Класс	Среднее значение, частиц/кв.м	Пляжи
1 (наиболее загрязненные)	21,8	о. Декабристов
2 (средне загрязненные)	16,3	Александрия
		Ломоносов
		Зеленогорск
3 (наименее загрязненные)	7,8	Лахта
		Лисий Нос
		Кронштадт сев.
		Кронштадт юж.
		Жемчужный
		Парк 300-летия

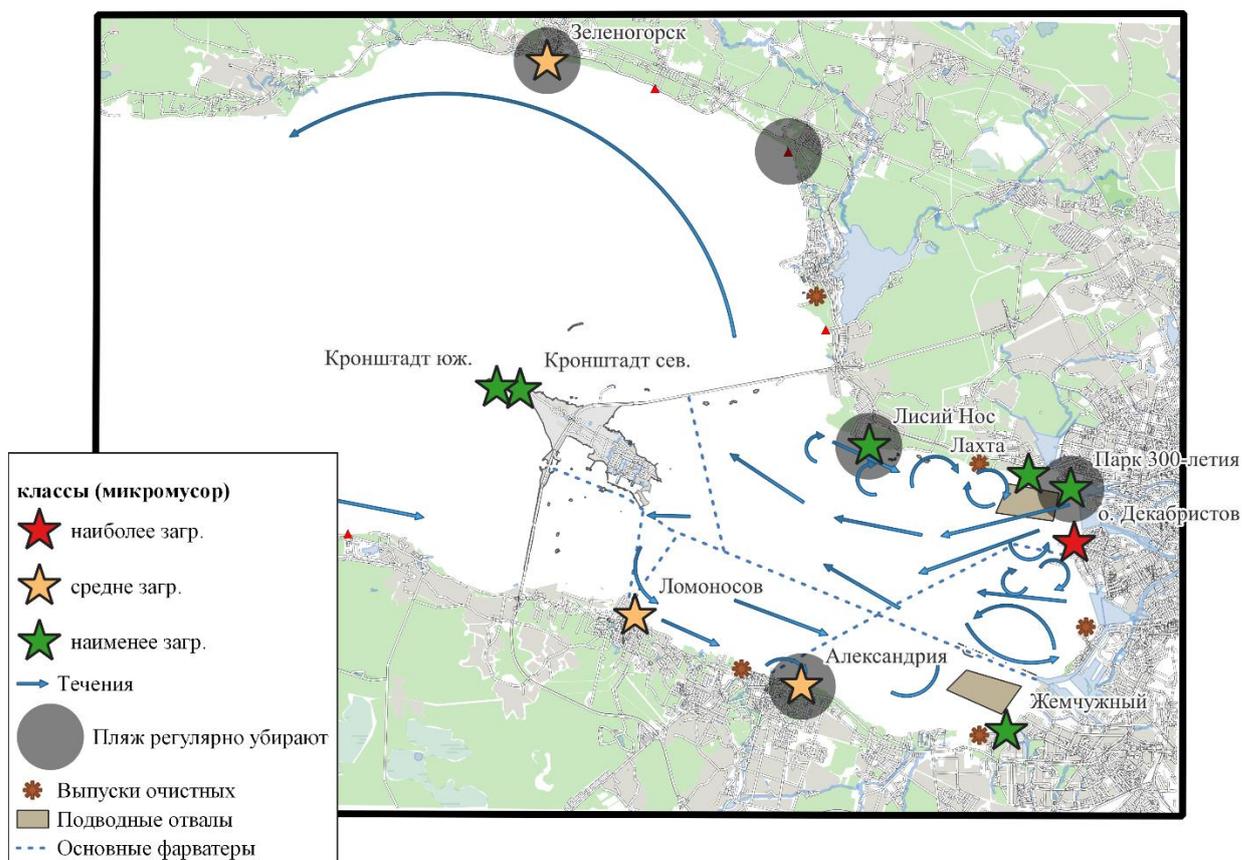


Рисунок 4.9 - Классификация пляжей восточной части Финского залива по концентрациям микромусора в зоне заплеска, 2018–2021 гг.

Средне-загрязненные пляжи расположены на южном побережье Невской губы и в Зеленогорске. Их загрязненность может быть обусловлена как близостью фарватеров, при углублении которых со дна поднимаются тяжелые фракции микромусора, например, стекло (особенно это актуально для южного берега Невской губы), так и направленностью основных течений (северное побережье открытой части залива). Наименее загрязненные пляжи находятся в Невской губе и на острове Котлин.

Однако если рассматривать классификацию по загрязненности микропластиком, то картина меняется: наиболее загрязненные пляжи расположены ближе к центру города (Рисунок 4.11). Причиной для этого может быть множество факторов:

- близость нескольких рукавов реки Нева, являющейся потенциальным источником микропластика, попадающего в Невскую губу и далее в Финский залив;

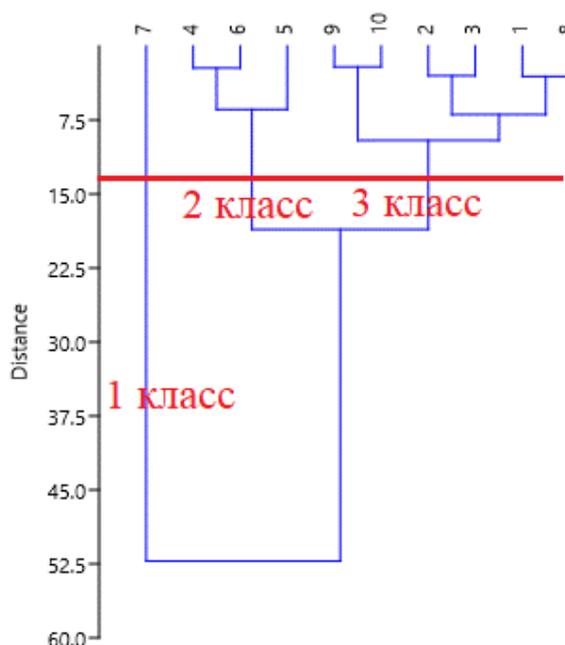


Рисунок 4.10 – Дендрограмма-результат классификации пляжей методом Уорда по загрязненности микропластиком

Таблица 5 - Классификация пляжей восточной части Финского залива по концентрациям микромусора в 2018–2021 гг.

Класс	Среднее значение, частиц/кв.м	Пляжи
1 (наиболее загрязненные)	20,4	о. Декабристов
2 (средне загрязненные)	4,1	Парк 300-летия
		Лисий Нос
		Жемчужный
3 (наименее загрязненные)	2,7	Лахта
		Ломоносов
		Кронштадт сев.
		Кронштадт юж.
		Зеленогорск
		Александрия

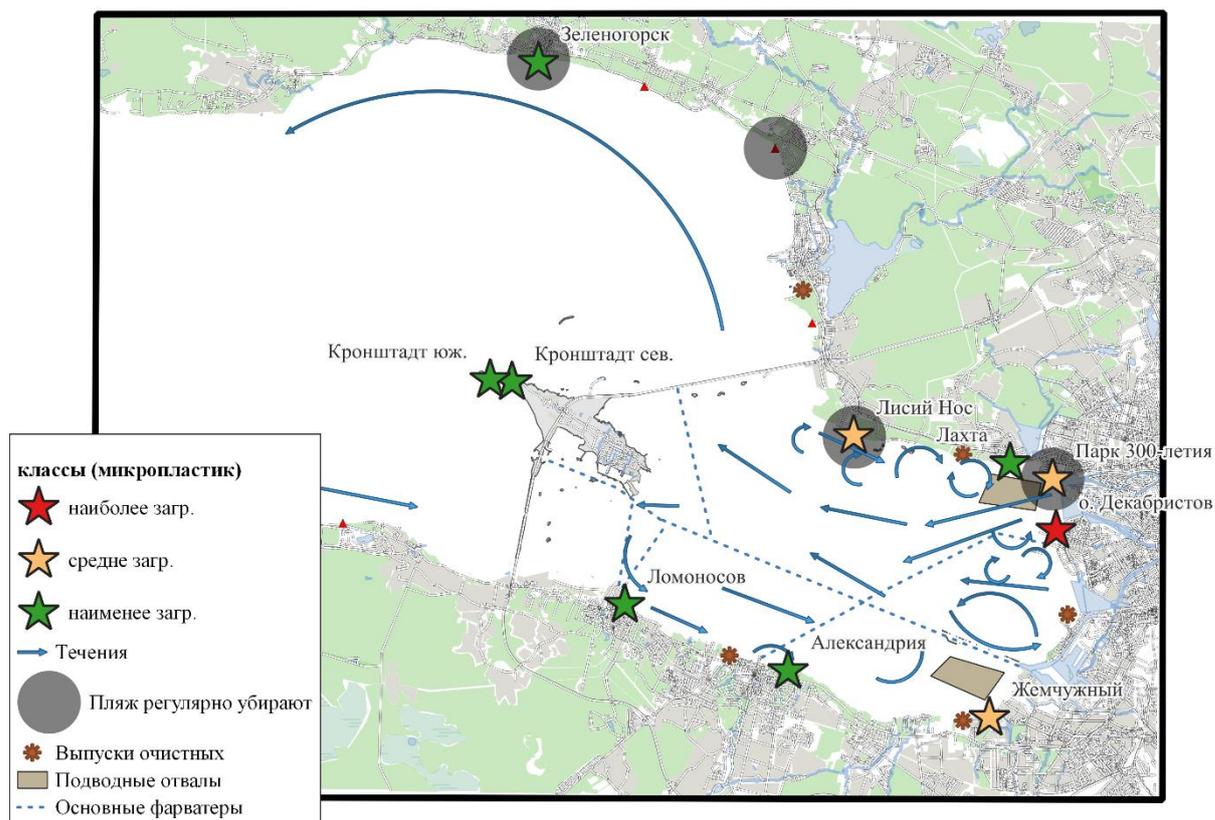


Рисунок 4.11 - Классификация пляжей восточной части Финского залива по концентрациям микропластика в зоне заплеска, 2018–2021 гг.

- наличие вблизи загрязненных пляжей донных отвалов грунта, который также может содержать микропластик;

- высокая антропогенная нагрузка на пляжи в центре города (рекреационная деятельность, строительство и т.д.);

- более высокая плавучесть пластиковых частиц по сравнению с иными типами мусора (стекло, металл) вследствие меньшей плотности полимерных материалов, что делает их более подвижными в водной среде и меняет картину распределения по пляжам в зависимости от преобладающих течений;

- выпуски станций аэрации в непосредственной близости от пляжей.

В 2014 году было проведено исследование степени очистки бытовых сточных вод от микропластика [37]. Полученные результаты указывают на высокую степень очистки, однако некоторое количество микропластика все равно поступает в Финский залив (133 частицы/сутки с Центральной станции аэрации). С учетом этих цифр можно судить о том, что в год со всех очистных сооружений Водоканала в Невскую губу и Финский залив поступает около 90 тысяч частиц микропластика, часть из которых скорее всего выносятся на близлежащие пляжи (Рисунок 4.12).

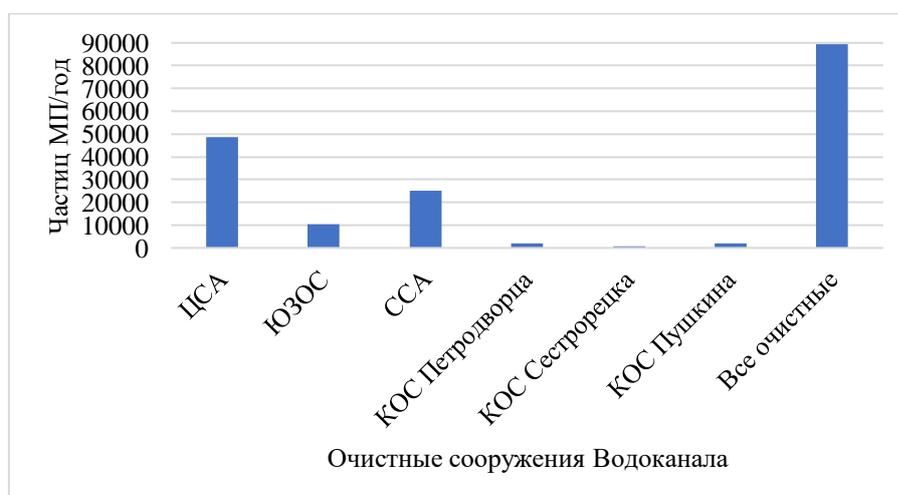


Рисунок 4.12 – Количество микропластика, на выходе из очистных сооружений Водоканала Санкт-Петербурга в Финский залив

Для изучения характеристик распространения частиц микропластика, поступающих с водами Невы, в Невской губе и в восточной части Финского залива была использована трехмерная численная гидродинамическая модель, основанная на Принстонской модели океана ROM [38]. В результате моделирования выявлено, что большинство частиц микропластика оседает на дно или выносится на побережья Невской губы, а большую часть оставшегося материала выносит на северное побережье открытой части Финского залива (Рисунок 4.13).

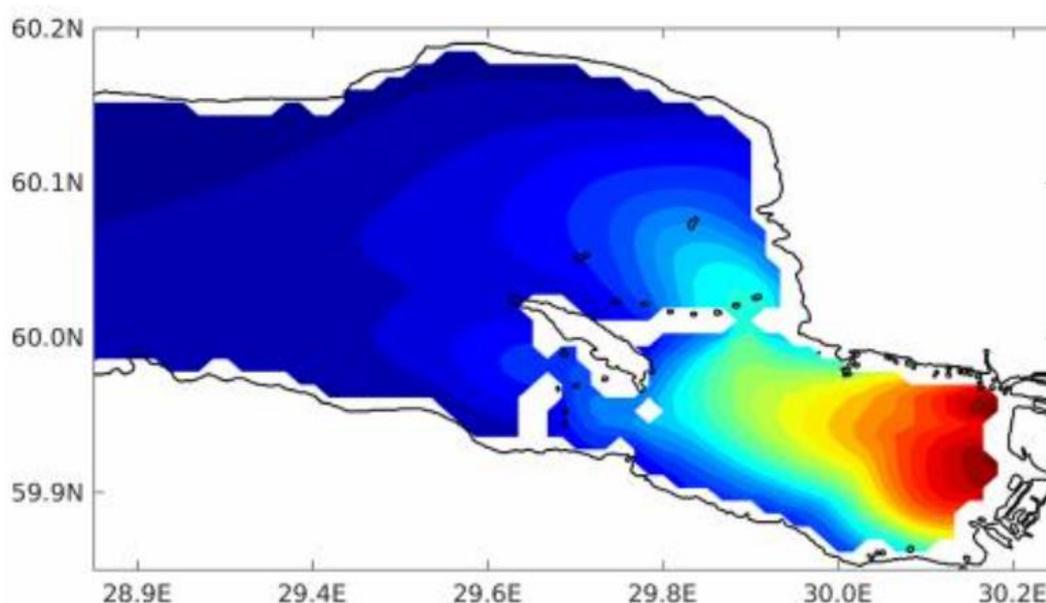


Рисунок 4.13 - Смоделированная объемная концентрация микропластика в верхнем модельном слое (0—2 м), усредненная по времени за период июнь—август 2018 г [39].

4.2 Исследование пляжей по всей ширине

Помимо зоны заплеска в 2018-2021 гг. исследовались выборочные пляжи на северном и южном побережье открытой части Финского залива методом «рейк» для получения оценки загрязненности пляжа по всей ширине от линии воды до линии растительности, включая всю его сухую часть. При

этом в отличие от 2018-2019 гг., в 2020-2021 гг. выбрано уже только два пляжа, характеризующие ситуацию на южном и северном побережье восточной части Финского залива. Помимо гидродинамических условий, выбранные пляжи отличаются по уровню рекреационной нагрузки, а также по периодичности уборок.

В 2018–2021 гг. количество микрочастиц варьировало в очень широких пределах: в 2018-2019 гг. больше всего частиц микромусора на м² обнаружено на северном пляже острова Котлин (8-9 частиц/м²), меньше всего – на пляже в поселке Большая Ижора (1 частица/м² в 2019 г.), тогда как в 2020 г. больше всего частиц обнаружено на пляже в Большой Ижоре (3 частицы/м²), а меньше всего – на пляже в Зеленогорске (менее 1 частицы/м²), а в 2021 г. на этих двух пляжах обнаружено примерно одинаковое количество микрочастиц (1 частица/м²) (Рисунок 4.14).

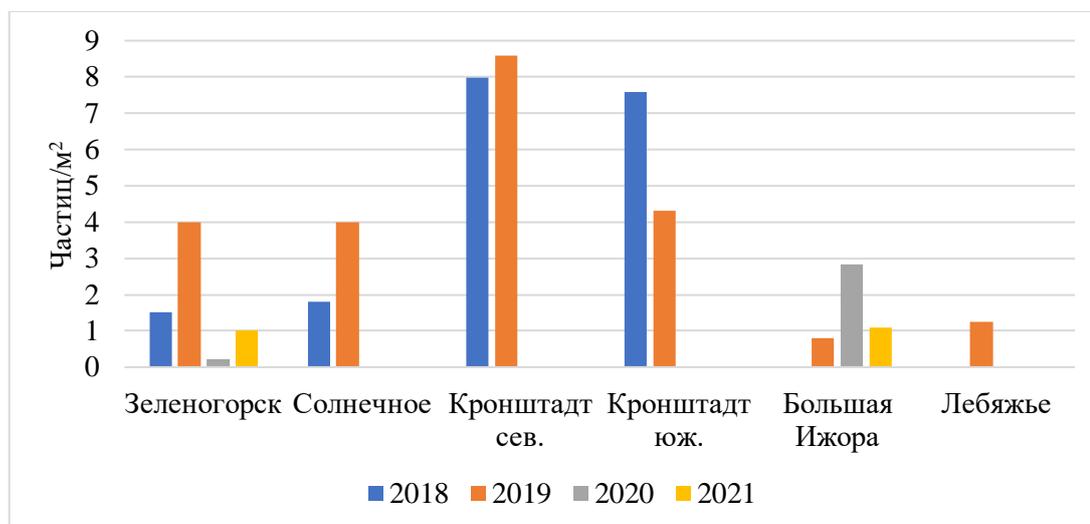


Рисунок 4.14 – Количество частиц микромусора, отобранных «рейк-методом» в восточной части Финского залива, 2018-2021 гг.

Микромусор с пляжей Кронштадта (о. Котлин) представлен большей частью металлом, тогда как на остальных пляжах открытой части Финского залива микромусор в основном пластиковый. В 2018-2019 гг. наибольшие концентрации микропластика наблюдались на северном побережье Финского

залива (в среднем 3 частицы/м²). В 2020-2021 гг. ситуация изменилась на противоположную и в этот период более высокие концентрации микропластика наблюдаются уже на Южном побережье Финского залива – в поселке Большая Ижора (Рисунок 4.15).

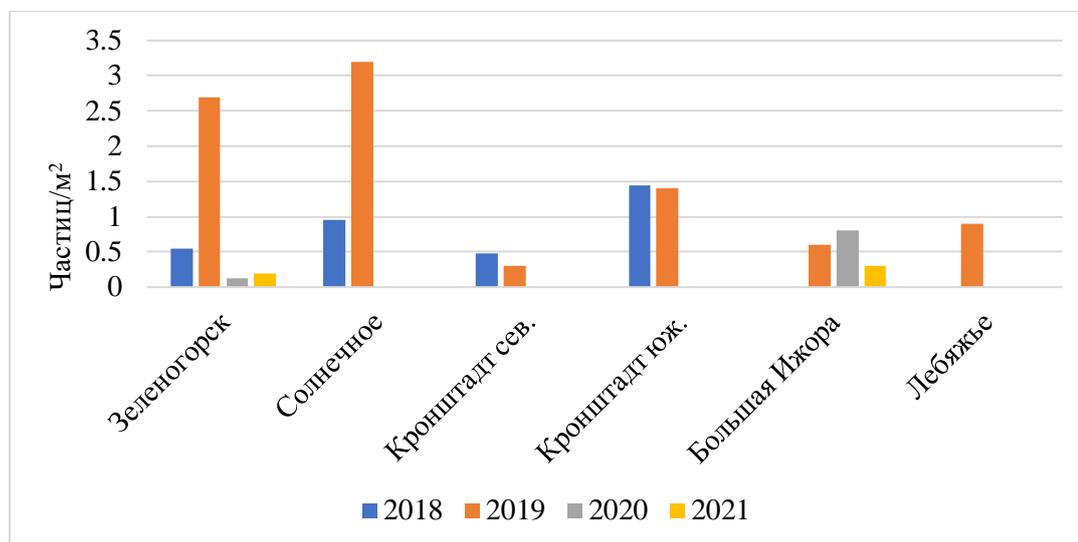


Рисунок 4.15 – Количество частиц микропластика, отобранных «рейк-методом» в восточной части Финского залива, 2018-2021 гг.

Значительное количество микропластика, обнаруженного в 2019 году, может объясняться тем, что тогда на пляжах было обнаружено большое количество пластиковых гранул (Рисунок 4.16), не свойственное для других лет наблюдения. Такие гранулы используются для производства любых пластиковых изделий и могут попадать в водные объекты при нарушении производственного цикла либо при неосторожной транспортировке.



Рисунок 4.16 - Пластиковые гранулы, обнаруженные на пляже Зеленогорска в 2019 г.

На пляже в Зеленогорске количество гранул превышает количество других пластиковых частиц, а в Солнечном гранул обнаружено ровно столько же, сколько и прочих пластиковых фрагментов. На южном пляже Кронштадта гранул обнаружено меньше, чем остальных микропластиковых частиц, однако их доля также значительна (Рисунок 4.17). Вероятно, это обусловлено особыми гидрометеорологическими условиями в этот период, так как 2019 год в целом отличается более высокими концентрациями микромусора.

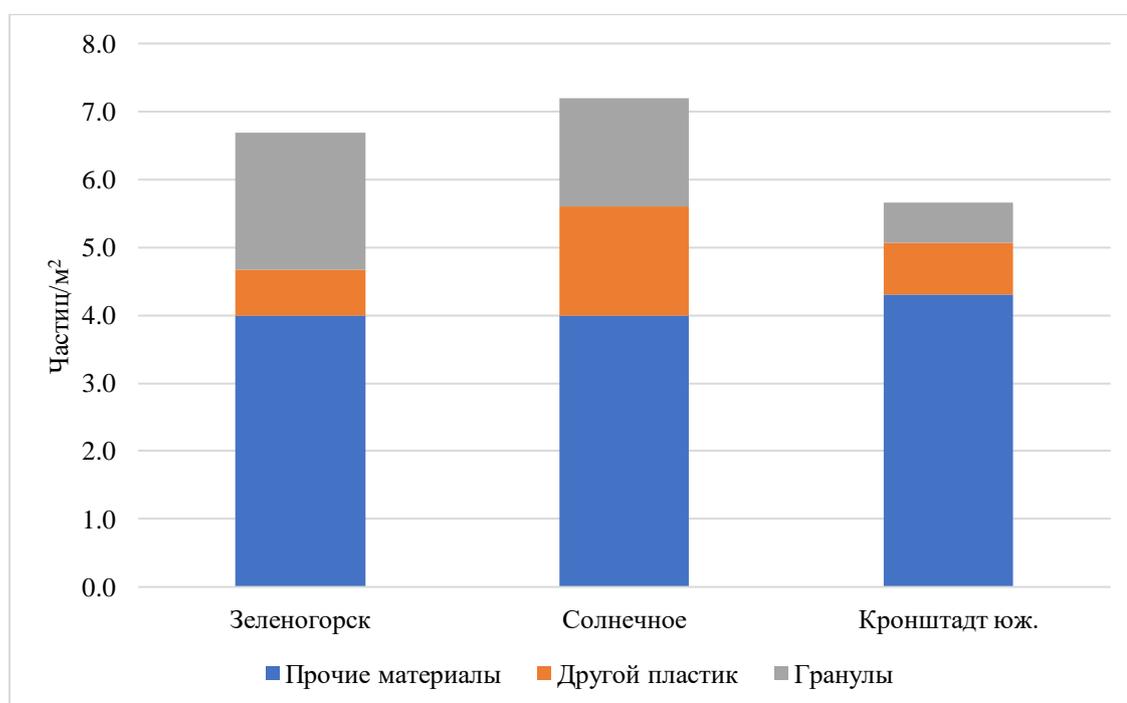


Рисунок 4.17 – Доля пластиковых гранул, обнаруженных «рейк-методом» на пляжах восточной части Финского залива, 2019 г.

Количество микромусора от уреза воды к линии растительности изменяется по-разному на каждом пляже. На Рисунке 4.18 каждый сегмент (s1-s7) обозначает отрезок пляжа длиной 5 метров. Так, в 2019 г. на пляжах Кронштадта (о. Котлин) количество микромусора снижается с удалением от уреза воды, то есть скорее всего здесь микромусор на пляже морского происхождения и поступает с волнами; об этом также косвенно говорит его

состав – в основном ржавый металл. Нужно отметить, что здесь, на территории заказника «Западный Котлин», проводятся регулярные уборки крупного мусора и в связи с удаленностью от города данный заказник посещается нечасто – количество туристов здесь на порядки меньше, чем на побережьях материковой части Финского залива. На пляжах Зеленогорска и пос. Солнечное на северном побережье Финского залива ситуация обратная – микромусора становится больше в отдалении от воды (15-25 метров), хотя Зеленогорск и Солнечное – это ежедневно убираемые популярные среди туристов пляжи Курортного района Санкт-Петербурга. Большое количество микромусора в песках этих пляжей, вероятно, говорит о недостаточности механических средств уборки, которые пропускают мелкие фракции мусора (например, остатки сигаретных окурков), собирая только крупный мусор. Однако нельзя исключать и другую причину скопления микрочастиц (преимущественно пластика) в сухой части данных пляжей – весенние и осенние штормы, забрасывающие взвешенный материал далеко вглубь пляжа. Об этом говорит большое количество пеллет (гранул) в составе микромусора, источником которых является смыв в море с промышленных и строительных площадок.

Пляжи южного побережья Финского залива – Большая Ижора и Лебяжье – это так называемые дикие пляжи, на которых убирают только местные волонтеры. Оба пляжа имеют высокую рекреационную нагрузку в летний период, однако в 2019 г. там обнаружено самое низкое количество микромусора по всей ширине пляжа. На примере этих пляжей подтверждается теория влияния доминирующих течений в Финском заливе, согласно которой взвешенный материал, поступающий со стороны города и р. Невы, выносится на северное побережье.

Исследование 2020 г. показало другую картину распределения микромусора на пляжах северного и южного побережий открытой части Финского залива: больше мусора обнаружено в Большой Ижоре при максимальном накоплении в середине пляжа (10 метров от уреза воды), а

наименьшее количество микрочастиц наблюдалось на пляже Зеленогорска, что, возможно, связано с таким фактором, как искусственное возобновление пляжа чистым привезенным песком.

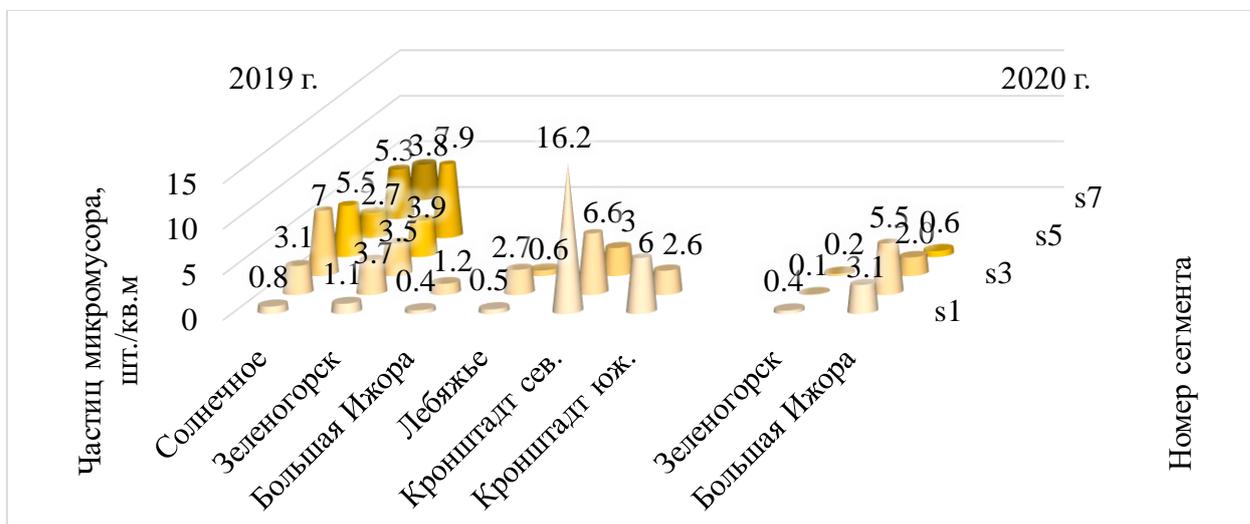


Рисунок 4.18 - Распределение микромусора по сегментам пляжа от уреза воды (S1) к линии растительности (S7) на побережьях восточной части Финского залива в 2019 и 2020 гг.

В 2021 году тенденции так или иначе повторяют те, что наблюдались в 2019 году (Рисунок 4.19-4.22). Значительные отличия 2020 года можно объяснить, например, тем, что уровень антропогенной нагрузки на пляжи был снижен, что повлекло за собой некоторые изменения в структуре распределения микромусора по ширине пляжа. Следовательно, говорить о каких-либо устойчивых закономерностях распределения мусора по сегментам невозможно.

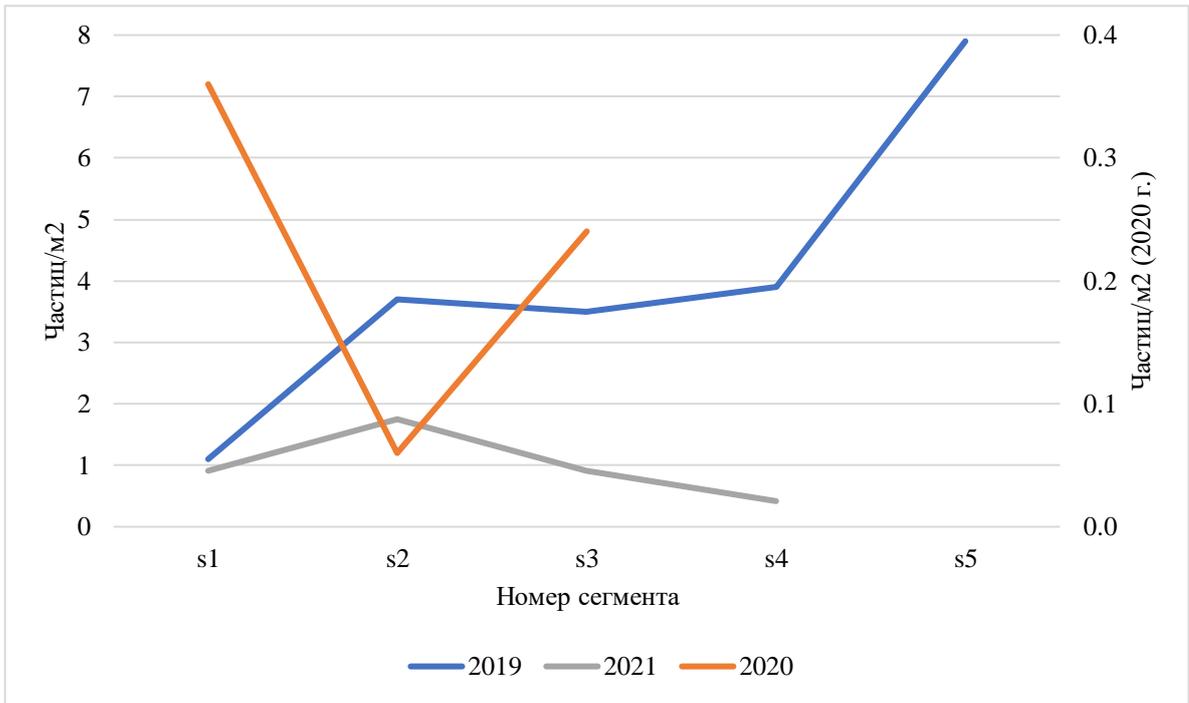


Рисунок 4.19– Распределение концентраций микромусора, частиц/м² по сегментам на пляже в Зеленогорске в 2019-2021 гг.

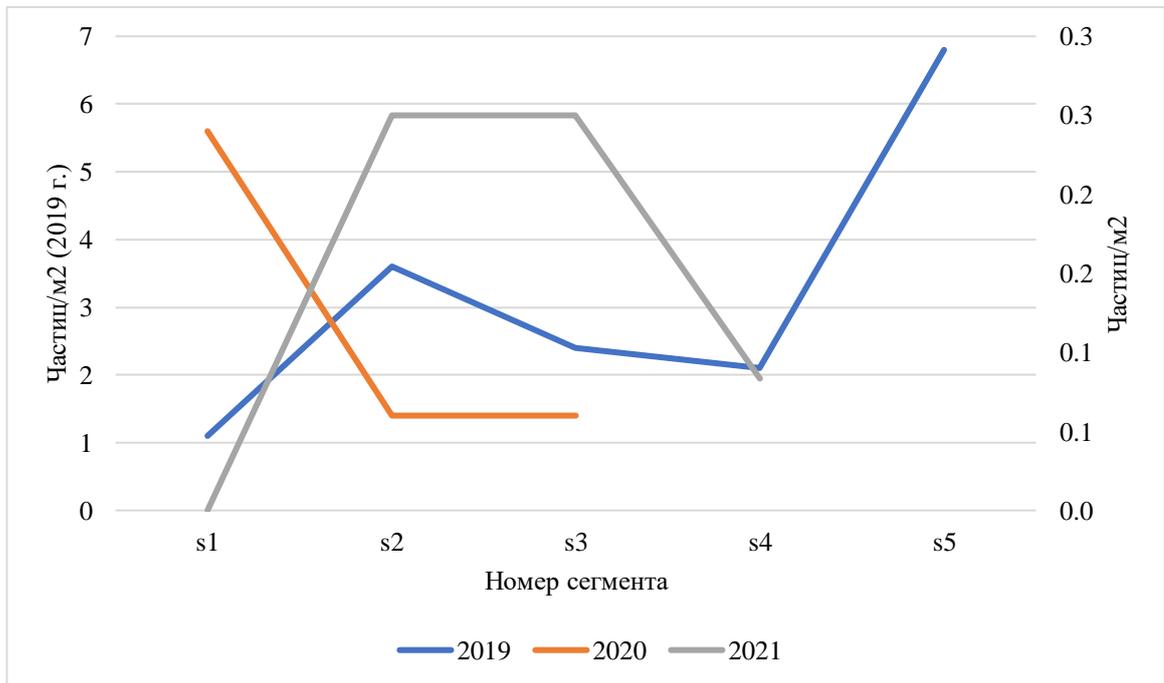


Рисунок 4.20 – Распределение концентраций микропластика, частиц/м² по сегментам на пляже в Зеленогорске в 2019-2021 гг.

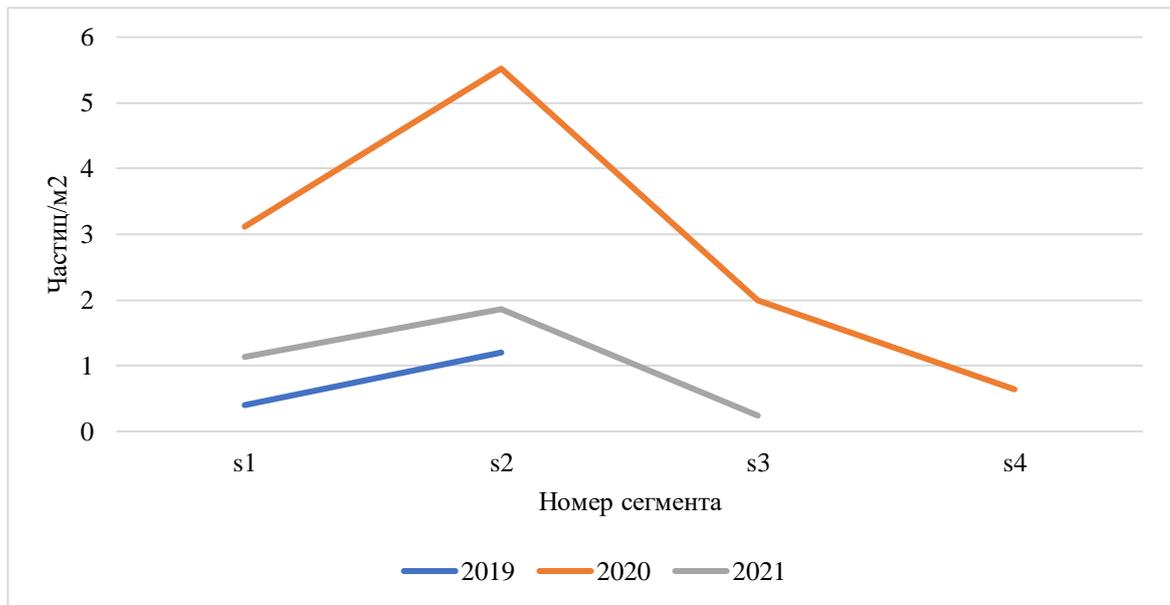


Рисунок 4.21 – Распределение концентраций микромусора, частиц/м² по сегментам на пляже в Большой Ижоре в 2019-2021 гг.

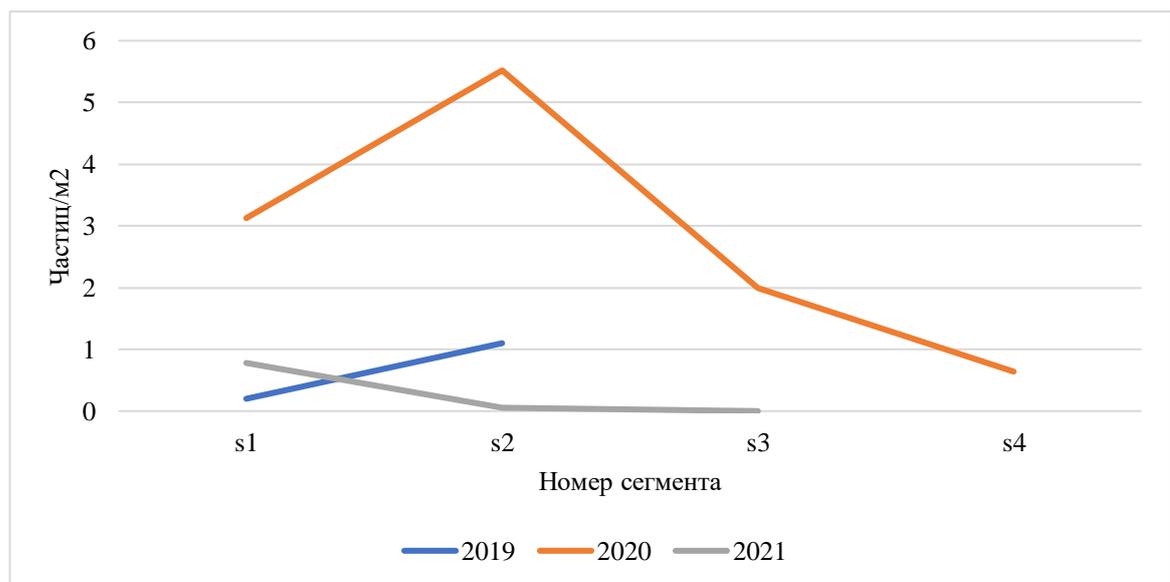


Рисунок 4.22 – Распределение концентраций микропластика, частиц/м² по сегментам на пляже в Большой Ижоре в 2019-2021 гг.

4.3 Анализ процессов накопления и распределения микропластика на побережьях Финского залива

Проведенные исследования показали, что микромусор в том или ином виде обнаружен на всех пляжах восточной части Финского залива и Невской

губы. Самые загрязненные частицами менее 5 мм пляжи находятся в черте города Санкт-Петербург, ближе к его центру, в районе одного из главных рукавов р. Нева. Похожая ситуация наблюдается и в других частях Балтийского моря: в Калининградской области больше всего микропластика обнаружено в зоне заплеска на более посещаемых пляжах, а также на Вислинской косе [17], а для пляжей Финляндии также характерна более высокая загрязненность городских пляжей [9]. Таким образом, наиболее загрязненными микромусором в Балтийском регионе оказываются пляжи урбанизированных территорий.

Исследования, проведенные в рамках проекта MARLIN, также показали, что наиболее загрязненными на Балтике являются пляжи Финляндии (Рисунок 4.23), расположенные на северном побережье Финского залива [9], а более половины всех обнаруженных там предметов были пластиковыми.

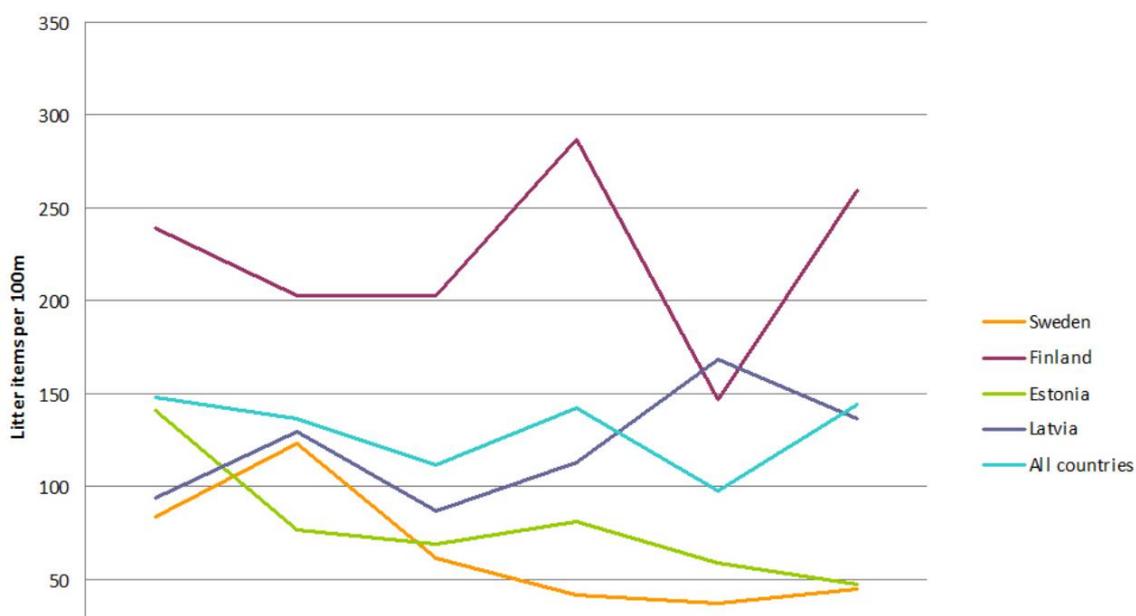


Рисунок 4.23 – Сезонная динамика загрязненности пляжей в разных странах Балтийского региона [9]

В данной работе выявлено, что северное побережье Финского залива и Невской губы загрязнено микромусором сильнее, чем южное, а

преобладающим видом микромусора здесь является микропластик – приблизительно 65 % от общего объема. В целом разнообразие видов материалов, из которых состоит микромусор Финского залива велико; помимо микропластика здесь присутствуют микрочастицы металла, стекла, строительной штукатурки и других материалов, так как Санкт-Петербург – это мегаполис, крупный промышленный центр, поэтому нагрузка на экосистему Финского залива велика не только по масштабу, но и по многообразию воздействий. В отличие от восточной части Финского залива, на побережье Калининградской области в Юго-Восточной Балтике антропогенный морской мусор состоит в основном из пластика – в общей сложности около 90 % от всех собранных образцов [17].

Сравнение концентраций микромусора и микропластика, найденного на балтийских побережьях Германии, Литвы [11] и России с помощью методов, использующихся в настоящем исследовании, показало, что, в отличие от пляжей Германии и Литвы, в Невской губе Финского залива обнаружено максимальное количество микрочастиц в Балтийском регионе. На пляжах российской части Финского залива обнаружено в среднем 11 частиц/м² в зоне заплеска и 3 частицы/м² по всей ширине пляжа, тогда как в Германии и Литве эти значения составляют в среднем 0,1 и 3,9 частиц/м² соответственно для зоны заплеска и 0,2 и 0,02 частиц/м² для всей ширины пляжа (Рисунок 4.24). Для пляжей Невской губы и Германии характерно преобладание пластиковых частиц в зоне заплеска.

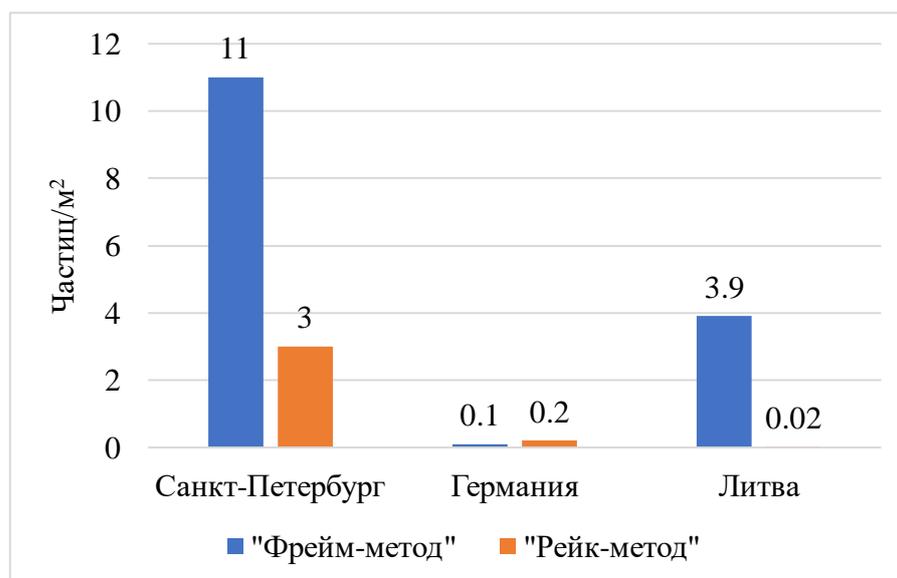


Рисунок 4.24 – Сравнение среднего количества обнаруженных частиц микромусора, шт./м² на пляжах Санкт-Петербурга (осредненные значения за период 2018-2021 гг.), Германии и Литвы (осредненные значения за период 2014-2016 гг.) [11]

Были проанализированы источники поступления мусора в Невской губе и открытой части Финского залива. В отличие от балтийских побережий других стран, где основным источником морского мусора является туризм, в Невской губе и открытой части российского побережья Финского залива источники микромусора варьируют от пляжа к пляжу и, вероятно, могут зависеть от вида промышленной деятельности поблизости. Невская губа подвергается большей микропластиковой нагрузке, по сравнению с открытой частью залива, так как туда в первую очередь поступает весь переносимый Невой материал. К тому же на побережье Невской губы находятся самые крупные очистные сооружения Санкт-Петербурга, а также большое количество строительных и промышленных площадок. Водообмен Невской губы с Финским заливом ограничен Комплексом защитных сооружений от наводнений. Все эти факторы способствуют тому, что пляжи Невской губы намного сильнее загрязнены микропластиком, чем те, которые находятся за ее пределами. На некоторых из исследованных пляжей преобладают другие типы микромусора. Так, например, преобладание металлических частиц в

структуре микромусора пляжей Кронштадта (о. Котлин) можно объяснить активным судоходством и судами, стоящими на причале в непосредственной близости от мест отбора проб, а источником стекла на пляже в парке Александрия может являться как Петровская стекольная мануфактура, расположенная на берегу неподалеку от парка, так и стекло, поднятое со дна во время углубления фарватера. Большое количество остатков штукатурки на некоторых пляжах (категория «другое») также указывает на близость строительных площадок и мест, где утилизируются строительные отходы. По причине преобладания юго-западных ветров, а также сложной схемы течений, северное побережье открытой части Финского залива загрязнено микромусором сильнее, чем на южном побережье, так как частицы, поступающие со стоком реки Невы, переносятся в северном направлении [39].

При формулировке рекомендаций по снижению микропластиковой нагрузки на акваторию Финского залива следует учитывать все многочисленные источники его поступления в водные объекты Санкт-Петербурга. Для решения этой проблемы необходимо выполнить следующие шаги:

1. обнаружение и картирование основных источников поступления микропластика в водную среду;

2. выполнение конкретных действий, направленных на каждый из источников:

- 2.1 усиление контроля состава сточных вод не только крупных предприятий и очистных сооружений, но и локальных учреждений, жилых домов и улучшение степени очистки воды при необходимости;

- 2.2 борьба с несанкционированными свалками, модернизация схемы обращения с отходами в целях повышения доли вторичного использования пластиковых отходов;

3. проведение просветительской деятельности, направленной как на производителей пластиковой продукции (использовать вторичное сырье,

уменьшать количество упаковки), так и на рядовых граждан (сокращать потребление пластиковой упаковки, не оставлять мусор в местах отдыха).

Было проанализировано влияние природных факторов, в особенности гидрологического режима Невской губы на формирование микропластиковой нагрузки на побережья. В связи с особенностями гидрологического режима Невской губы, в данной акватории нередки резкие смены уровня воды. Это происходит из-за нагонных явлений, когда западный ветер приносит дополнительные водные массы в восточную часть залива и при уменьшении глубины уровень воды резко возрастает. Для того, чтобы избежать наводнения, могут закрываться шлюзы Комплекса защитных сооружений, однако уровень воды все равно увеличивается из-за подпирания вод реки Нева. Соответственно, при преобладании восточных ветров, уровень воды, наоборот, может снижаться. Не стоит недооценивать и сезонные колебания, связанные в том числе с изменением расхода воды в Неве (весеннее и осенне-зимнее половодья и летняя межень). Отсюда следует, что зоны аккумуляции микромусора, поступающего из воды, меняются в зависимости от перемещения линии заплеска и это происходит довольно часто, что усложняет поиск закономерностей в распределении микромусора как локально по зонам пляжей, так и по его географическому распределению. Поэтому отбора проб раз в год недостаточно для получения достоверной информации о тенденциях аккумуляции микропластика на побережьях восточной части Финского залива. Важно применять одни и те же методики отбора проб, делая это регулярно и в схожее время с целью уменьшения ошибки измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было выполнено исследование процессов накопления и распределения микропластика на побережьях восточной части Финского залива в 2018-2021 гг. Были рассмотрены особенности распределения морского мусора на пляжах российской части Финского залива, проведена классификация пляжей по степени их загрязненности в 2018–2021 гг., выполнено сравнение полученных данных с результатами других исследований в данном регионе, выявлены предполагаемые источники поступления мусора на пляжи восточной части Финского залива, а также сформулированы рекомендации по снижению микропластиковой нагрузки на Невскую губу и Финский залив.

Исходя из полученных данных можно сделать следующие выводы. Среди всех исследованных пляжей больше всего частиц мусора на м² в зоне заплеска (56 ч./м²) обнаружено на пляже в самом центре города Санкт-Петербург на острове Декабристов в Невской губе. Наименьшее количество частиц мусора было обнаружено на отдаленных от центра пляжах – на Ласковом пляже в поселке Солнечное в открытой части Финского залива и на южном пляже острова Котлин (1 ч./м²). При этом в целом в 2020-2021 гг. на пляжах в зоне заплеска обнаружено меньше мусора, чем в 2018-2019 гг.

В Невской губе и открытой части Финского залива состав мусора различается. На пляжах Невской губы мусор представлен преимущественно пластиком, а за пределами Невской губы картина иная – на пляжах Кронштадта мусор в основном состоит из металла, а на северном побережье открытой части залива – из стекла. Больше всего частиц микропластика обнаружено на острове Декабристов, меньше всего - в пробах в поселке Солнечное, в парке Александрия и на южном пляже Кронштадта.

Каждый год со всех очистных сооружений Водоканала в Невскую губу и Финский залив поступает около 90 тысяч частиц микропластика, часть из

которых скорее всего выносятся на близлежащие пляжи. В результате моделирования выявлено, что большинство частиц микропластика оседает на дно или выносятся на побережья Невской губы, а большую часть оставшегося материала выносит на северное побережье открытой части Финского залива.

Количество микрочастиц, обнаруженных по всей ширине пляжа, варьировало в очень широких пределах: в 2018-2019 гг. больше всего частиц микромусора на м² обнаружено на северном пляже острова Котлин (8-9 ч./м²), меньше всего – на пляже в поселке Большая Ижора (1 ч./м²), тогда как в 2020 г. больше всего частиц обнаружено на пляже в Большой Ижоре, а меньше всего – на пляже в Зеленогорске, а в 2021 г. на этих двух пляжах обнаружено примерно одинаковое количество микрочастиц (1 ч./м²). Значительное количество микропластика, обнаруженного в 2019 году, может объясняться тем, что тогда на пляжах было обнаружено большое количество пластиковых гранул, не свойственное для других лет наблюдения. Количество микромусора от уреза воды к линии растительности изменяется по-разному на каждом пляже, что может указывать на различные источники его поступления, однако говорить о каких-либо устойчивых закономерностях распределения мусора по сегментам невозможно.

Более высокие концентрации микромусора характерны для Невской губы и северного побережья открытой части Финского залива, что объясняется особенностями течений и преобладающих ветров. Также вполне закономерно пляжи, находящиеся ближе к центру города, являются более загрязненными. Однако, проведенные исследования также показывают значительную изменчивость концентраций и условий формирования микропластиковой нагрузки на пляжи, для более детального изучения которой очевидно необходимы более частые исследования с учетом сезонов года и гидрометеорологических явлений.

В отличие от пляжей Германии и Литвы, в Невской губе Финского залива обнаружено максимальное количество микрочастиц в Балтийском регионе. В Невской губе и открытой части российского побережья Финского залива источники микромусора варьируют от пляжа к пляжу и, вероятно, могут зависеть от вида промышленной деятельности поблизости.

Для снижения микропластиковой нагрузки на восточную часть Финского залива следует выявлять источники поступления микрочастиц в водный объект, проводить мероприятия по контролю за этими источниками и осуществлять просветительскую деятельность, направленную на уменьшение количества пластиковых отходов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Moore C. J. Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat // *Environmental Research*. 2008. Vol. 108, iss. 2. С. 131–139.
2. Citizen scientists reveal: Marine litter pollutes Arctic beaches and affects wild life / M. Bergmann [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. Vol. 125, iss. 1–2. С. 535–540.
3. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution / S. B. Borrelle [et al.] // *Science*. 2020. Vol. 369, no. 6510. С. 1515–1518.
4. Andrady A. L. Microplastics in the marine environment // *Marine Pollution Bulletin*. 2011. Vol. 62, iss. 8. С. 1596–1605.
5. Van Cauwenberghe L., Janssen C. R. Microplastics in bivalves cultured for human consumption // *Environmental Pollution*. 2014. Vol. 193. С. 65–70.
6. Setälä O., Norkko J., Lehtiniemi M. Feeding type affects microplastic ingestion in a coastal invertebrate community // *Marine Pollution Bulletin*. 2016. Vol. 102, iss. 1. С. 95–101.
7. Microplastic ingestion by zooplankton / M. Cole [et al.] // *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47, iss. 12. С. 6646–6655.
8. Derraik J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review // *Marine Pollution Bulletin*. 2002. Vol. 44, iss. 9. С. 842–852.
9. Final report of Baltic marine litter project MARLIN – litter monitoring and raising awareness 2011–2013. URL: https://www.pidasaaristosiistina.fi/files/1994/Marlin_Final_Report_2014.pdf (дата обращения: 06.03.2022).
10. Marine litter / O. Setälä [et al.] // *The Gulf of Finland assessment* / Eds. M. Raateoja, O. Setälä. Helsinki: SYKE, 2016. С. 276–289. (Reports of the Finnish environment institute; vol. 27). URL: <https://pame.is/document->

library/desktop-study-on-marine-litter-library/additional-documents/493-setala-2016-marine-litter/file (дата обращения: 06.05.2022).

11. Monitoring methods for large micro- and meso-litter and applications at Baltic beaches / M. Haseler [et al.] // *Journal of Coastal Conservation*. 2017. Vol. 22, iss. 1. С. 27–50.

12. Микропластик в морской среде / И. П. Чубаренко [и др.]. М.: Научный Мир, 2021. 520 с.

13. Microplastic concentrations in beach sediments along the German Baltic coast / A. Stolte [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2015. Vol. 99, iss. 1–2. С. 216–229.

14. Schröder K., Kossel E., Lenz M. Microplastic abundance in beach sediments of the Kiel Fjord, Western Baltic Sea // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28, iss. 21. С. 26515–26528.

15. Microplastic in beach sediments of the Isle of Rügen (Baltic Sea) – Implementing a novel glass elutriation column / E. Hengstmann [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2018. Vol. 126. С. 263–274.

16. Sources and fate of microplastics in marine and beach sediments of the Southern Baltic Sea – a preliminary study / B. Graca [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24, iss. 8. С. 7650–7661.

17. Есюкова Е. Е., Чубаренко И. П. Особенности распределения микропластика на песчаных пляжах Калининградской области (Балтийское море) // *Региональная экология*. 2018. № 1 (51). С. 108–121.

18. 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. *Региональная экология*. 2019. №2 (56). С. 16-29.

19. Marine litter monitoring: review for the Gulf of Finland coast / T. Eremina [et al.] // 2018 IEEE/OES Baltic International Symposium (BALTIC). IEEE, 2018. С. 1–8.

20. Studying the Concentration of Microplastic Particles in Water, Bottom Sediments and Subsoils in the Coastal Area of the Neva Bay, the Gulf of Finland / Sh. R. Pozdnyakov [et al.] // *Water Resources*. 2020. Vol. 47, iss. 4. С. 599–607.
21. Alenius P., Myrberg K., Nekrasov A. The physical oceanography of the Gulf of Finland: a review // *Boreal Environment Research*. 1998. №3. С. 97-125.
22. Soomere T., Keevallik S. Directional and extreme wind properties in the Gulf of Finland // *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Engineering*. 2003. №9. С. 73-90.
23. Hela I. Drift currents and permanent flow. Helsinki: Societas Scientiarum Fennica, 1952. 28 с.
24. Patterns of current-induced transport in the surface layer of the Gulf of Finland / Soomere T. [et al.] // *Boreal Environment Research*. 2011. №16A. С. 49-63.
25. Mean circulation and water exchange of the Gulf of Finland — a study based on three-dimensional modelling / Andrejev O. [et al.] // *Boreal Environment Research*. 2004. №9. С. 1-16.
26. Нежиховский Р.А. Вопросы гидрологии реки Невы и Невской губы. Гос. гидрол. ин-т. - Л.: Гидрометеиздат, 1988. 224 с.
27. Изменение береговой зоны восточной части Финского залива под воздействием природных и антропогенных факторов / М. А. Спиридонов [и др.] // *Региональная геология и металлогения*. 2010. № 41. С. 107–118. URL: <http://evgengusev.narod.ru/laptev/spiridonov-2010.pdf> (дата обращения: 21.05.2022).
28. Результаты исследований техносферы Невской губы в РГГМУ / Шилин М.Б [и др.] // *Гидрометеорология и экология*. 2020. №60. С. 351-370.
29. Investigations of plastic contamination of seawater, marine and coastal sediments in the Russian seas: a review / Bagaev A [et al.]. // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021.

30. Есюкова Е.Е. Загрязнение пластиком и парафином пляжей Юго-Восточной Балтики. Альманах Океанология. 2017. № 1. URL: <http://www.maik.ru/oc/oc1/oc1-6.html> (дата обращения: 09.06.2022).

31. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments / Masura, J. [et al.] // NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48. 2015. 31 с.

32. OSPAR Guide for Monitoring Marine Litter on the Beaches in the OSPAR Maritime Area // OSPAR URL: <https://www.ospar.org/documents?v=32879> (дата обращения: 09.06.2022).

33. On the assessment of microplastic distribution in the eastern part of the Gulf of Finland / Haseler M. [et al.] // Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. 2019. №12 (4) с. 32 – 41.

34. Marine litter pollution in Baltic Sea beaches – application of the Sand rake method / M. Haseler [et al.] // Frontiers in Environmental Science. 2020. Vol. 8. С. 599978.

35. Marine Litter in the Russian Gulf of Finland and South-East Baltic: Application of Different Methods of Beach Sand Sampling / A. A. Ershova [et al.] // Plastics in the Aquatic Environment - Part I. / Eds. F. Stock [et al.]. Cham: Springer, 2021. С. 461–485. (The Handbook of Environmental Chemistry; vol. 111).

36. Многомерный статистический анализ в экономике / Л. А. Сошникова [и др.]. М.: ЮНИТИ, 1999. 598 с.

37. HELCOM 2014, BASE project 2012-2014: Preliminary study on synthetic microfibers and particles at a municipal waste water treatment plant // HELCOM URL: <https://www.helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Microplastics-at-a-municipal-waste-water-treatment-plant.pdf> (дата обращения: 03.06.2022).

38. К оценке распространения микропластика в восточной части Финского залива / С. Д. Мартьянов [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 4. С. 32–41.

39. Martyanov S. D., Isaev A. V., Ryabchenko V. A. Model estimates of microplastic potential contamination pattern of the eastern Gulf of Finland in 2018 // Oceanologia. 2021.