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

Кафедра Геоэкологии, природопользования и экологической безопасности

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
Магистерская диссертация

На тему: «Изменения климата, штормовые нагоны и их влияние на прибрежные экосистемы в регионе Балтийского моря»

Исполнитель Тюканова Надежда Сергеевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Дроздов Владимир Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой_____
(подпись)
кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Дроздов Владимир Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

«___» _____2024 г.

Санкт–Петербург
2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3
1. Особенности изменений климата в регионе Балтийского моря 5
1.1 Изменения температуры воздуха 5
1.2 Динамика показателей интенсивности атмосферной циркуляции 15
1.3 Динамика скоростей ветра и повторяемость штормовых явлений 18
2. Методы исследования влияния штормов на состояние прибрежных экосистем и положение береговой линии 27
3 Воздействие изменений климата и штормовых процессов на прибрежные экосистемы в восточной части Балтийского моря 33
3.1 Изменение положения береговой линии в акватории восточной части Финского залива по результатам дешифрования спутниковых снимков 40
3.2 Результаты натурных наблюдений-за состоянием древостоя 60
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 72
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 74
ПРИЛОЖЕНИЕ А Типы побережий Невской губы и открытой части Финского залива 80

ВВЕДЕНИЕ

«В различных районах Балтийского моря за последние десятилетия наблюдаются существенные климатические изменения, участилось проявление опасных явлений погоды» [1]. Подобная ситуация свойственная также восточной части акватории, в Ленинградской области и в Санкт-Петербурге [2]. Данные процессы могут представлять угрозу природным экосистемам и безопасности населения [3]. Для прибрежных районов Санкт-Петербурга эта проблема становиться все более актуальной, в отношении увеличения повторяемости штормов в восточной части Финского залива, затрагивающих Невскую губу и береговые зоны Курортного, Кронштадтского и Петродворцового районов, с расположенными здесь особо-охраняемыми природными территориями (ООПТ): памятником природы регионального значения «Комаровский берег», памятником природы регионального значения «Стрельницкий берег», государственным природным заказником «Южное побережье Невской губы», государственным природным заказником «Западный Котлин». Кроме того, в прибрежной зоне расположены различные объекты культурно-исторического наследия, в том числе в Петродворцовом районе – парк Александрия.

В настоящее время в Российской Федерации распоряжением Правительства от 11 марта 2023 г. № 559-р утвержден Национальный План мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 года [4]. При этом актуальной задачей остается оценка происходящих изменений в окружающей среде и разработка адаптационных мероприятий к изменениям климата и связанных с ними гидрологических и экологических процессов в конкретных районах.

Среди различных опасных последствий изменений климата следует учитывать также влияние штормов в береговой зоне и сильных ветров на состояние наземных экосистем – прежде всего в отношении эрозии береговой зоны и ветровала древесной растительности. Сохранение

уникального рельефа прибрежных территорий, а также древесной растительности в парках Санкт-Петербурга, на ООПТ и в его окрестностях (в зонах рекреации) – приоритетная задача для поддержания комфортной городской среды с экологических позиций [5].

Для адаптации региона к последствиям изменения климата, необходимо выработать стратегию социального, хозяйственного, берегоохранного рекреационного и экологобезопасного развития региона Балтийского моря с учетом прогнозируемых погодных явлений и тенденций к изменению климата.

Целью исследования является оценка изменения положения береговой линии и экологического состояния деревьев в прибрежных районах Санкт-Петербурга в условиях изменяющегося климата. Задачами исследования являются следующие:

– исследование опасных климато-обусловленных погодных явлений в регионе Балтийского моря, в том числе на территориях Санкт-Петербурга и Ленинградской области, способных оказывать негативное влияние на состояние прибрежных наземных экосистем;

– рассмотреть методы исследования влияния штормов на состояние прибрежных экосистем и положение береговой линии;

– определить динамику береговой линии на основе спутниковых снимков;

– установить степень и характер влияния сильных ветров и атмосферных осадков и характера влияния высокой интенсивности и штормов в береговой зоне на эрозию берегов и состояние прибрежной растительности, в том числе на процессы ветровала деревьев.

1. Особенности изменений климата в регионе Балтийского моря

В последнее время, климатические условия в регионе Балтийского моря подвергаются изменениям под влиянием глобального потепления и интенсивного антропогенного воздействия.

При хозяйственной деятельности человека, регион Балтийского моря становится наиболее чувствительным к изменению климата. Физико-географическое расположение акватории и ограниченный водообмен с Мировым океаном, большая плотность населения на побережьях, развитая промышленность и интенсивное судоходство неблагоприятно сказывается на экосистемах при повышении температуры и других последствиях изменения климата.

1.1 Изменения температуры воздуха

Балтийское море — это относительно небольшое внутриматериковое море Атлантического океана, расположенное в Северной Европе. Воды Балтийского моря омывают берега девяти стран: Дании, Швеции, Финляндии, России, Эстонии, Литвы и Латвии, Польши и Германии. Изрезанная береговая линия на севере образует множество островков, заливов, выступов берегов и скал. В южной части песчаные низменные берега с отмелями и с цепями песчаных дюн и длинными косами, образующие лагуны. Крайней северной точкой принято считать 65 широту в Ботаническом заливе, а южную – около города Висмара, находящий на 53 широте. Западная граница Балтийского моря проходит в районе города Фленсбурга по 9° восточной долготы, а восточная – в Невской губе у города Санкт-Петербург на 30° восточной долготы. Около 419 км^2 занимает площадь Балтийского моря, которую условно можно поделить на части: северная (от 57°с. ш.) и южная (по 55° с. ш.); центральную часть (между 20° в. д и 22° в.

д). Западную и восточную часть разделяют острова Готланд и Форё (на 19° в. д.) [6].

Протяженность Балтийского моря (с 9° по 30° в.д. и с 53° по 65°с.ш.) (рисунок 1) обуславливает разграничение на различные климатические зоны [6].

Рисунок 1.1 – Конфигурация Балтийского моря

В регионе Балтийского моря избыточное увлажнение и частые осадки, характерные для умеренного типа климата. В районах фьорд и других форм заливов, которые глубоко вдаются на территорию материка, климат отличается: амплитуда колебаний температуры воздуха увеличивается, снижается влажность. В зимний период западная и южная часть акватории

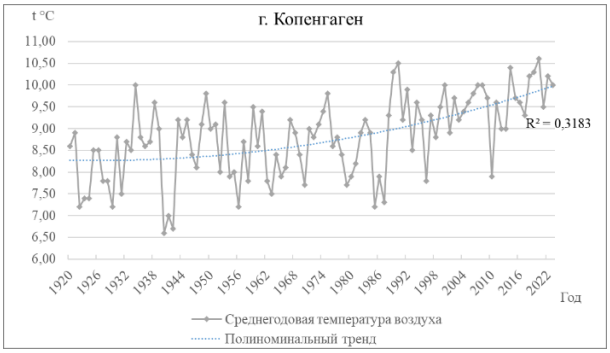
находится под влиянием тёплых воздушных масс с Атлантического океана и, следовательно, длительность ледового сезона короче, чем в северной и восточной [6]. В некоторых районах Балтийского моря ледовых покров наблюдается с начала октября до конца апреля. В среднем, около 44% морской территории покрыты льдом. Однако, уже в ближайшем будущем ожидается сокращение площади ледяного покрова и его уменьшение, а также сокращение длительности сезона. На восточной части наблюдается стык морского и континентального типа климата [7]. Климат данного региона в целом зависит от обширных областей низкого и высокого давления, формирующихся в Североатлантической части на западе акватории и в северо-восточной части Евразии – на востоке [8]. Усиление переносов воздушных масс в западном направлении, колебания температур, количества осадков и других гидрометеорологических показателей указывают на изменение многолетнего режима погоды [9].

Температура является абиотическим фактором, влияющий на множество процессов, связанных с жизнедеятельностью живых особей. В XX в. в регионе Балтийского моря зафиксировано одно из стремительных повышений приземной температуры воздуха [10].

Изменение температуры в регионе началось повсеместно во времена глобальных климатических сдвигов в 60—70-е гг. прошлого века, которое оказалось наиболее интенсивным и значительным за последние 5 веков [9].

Для примера динамики среднегодовой температуры воздуха были выбраны метеостанции, находящиеся в непосредственной близости к акватории Балтийского моря: на западном побережье в г. Копенгаген (55° 66′ с.ш. и 12°55′ в.д.), где происходит интенсивный водообмен с Атлантическим океаном; в центральной части у г. Стокгольм (59°33′ с.ш. и 18°05′ в.д.); у Финского г. Турку (60°52′ с.ш. и 22°27′ в.д.) и в Хельсинках (60°18′ с.ш. и 24°94′ в.д.), в восточной части у г. Санкт-Петербург (59°97′ с.ш. и 30°31′ в.д.); г. Таллин (58°38′ и 21°82′ в.д.); а также на южном побережье в г. Рига (56°71′ с.ш. и 23,73′ в.д.) и в г. Калининграде

(54°72′ с.ш. и 20°55′ в.д.). Массив временных рядов с сайта «Погода и климат»: http://www.pogodaiklimat.ru/history.php [11]. На рисунках 1.2 – 1.5 в графическом виде отображена динамика многолетних среднегодовых измерений температуры воздуха на различных побережьях Балтийского моря и их полиномиальные тренды.



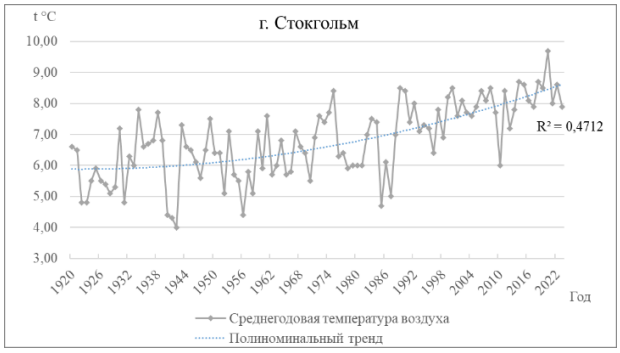


Рисунок 1.2 - Изменение средних показателей температуры воздуха в г. Копенгаген (слева) и в г. Стокгольм (справа) за период с 1920 по 2023 гг.

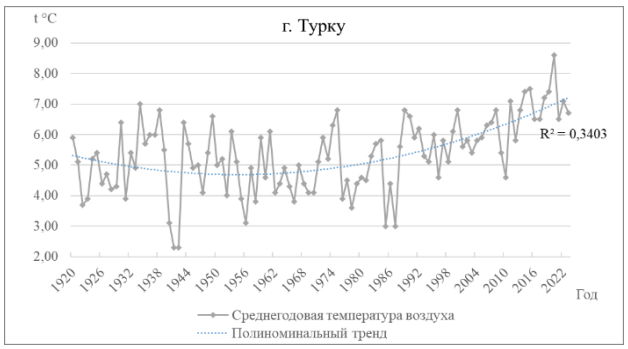


Рисунок 1.3 - Изменение средних показателей температуры воздуха в г. Турку (слева) и в г. Хельсинки (справа) за период с 1920 по 2023 гг.

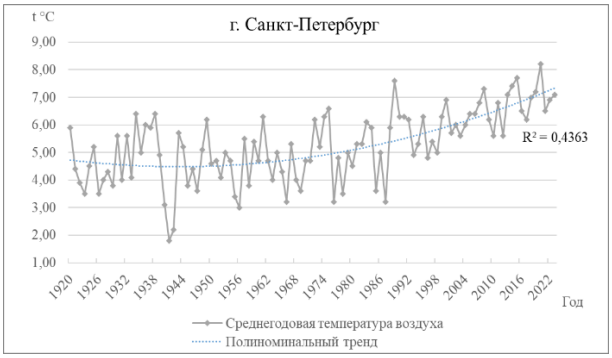


Рисунок 1.4 - Изменение средних показателей температуры воздуха в г. Санкт-Петербург (слева) и в г. Таллин (справа) за период с 1920 по 2023 гг.

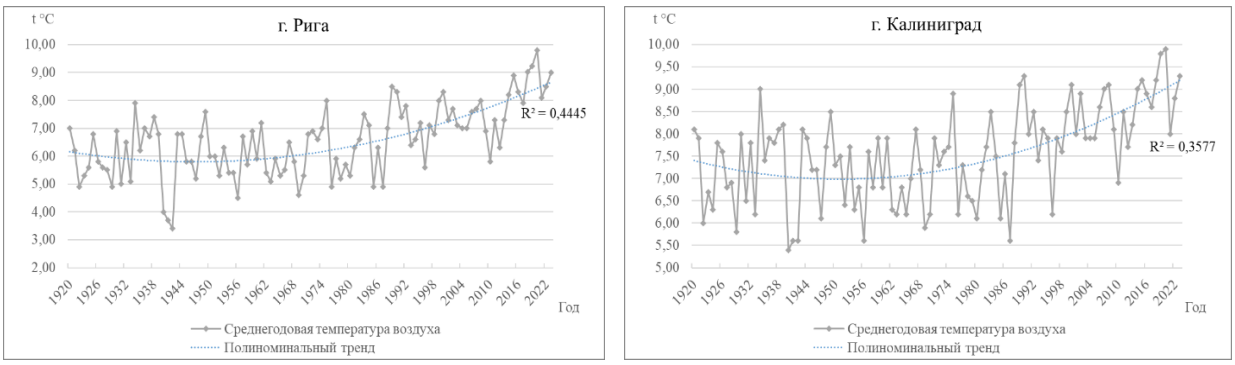


Рисунок 1.5 – Изменение средних показателей температуры воздуха в г. Рига (слева) и в г. Калининград (справа) за период с 1920 по 2023 гг.

На всех графиках отчетливо прослеживается тренд повышения температуры воздуха после 1950-х годов.

В целом, в регионе Балтийского моря годовая температура воздуха в течение 100-летнего периода изменялась в основном в сторону потепления и происходит это примерно со скоростью 0,3—0,7 °C/10 лет [12]. На рисунке 1.6 представлены среднегодовые температуры воздуха за период 1920-2023г, демонстрируя степень нагрева воздуха за прошедшее столетие в различных районах Балтийского моря [13]

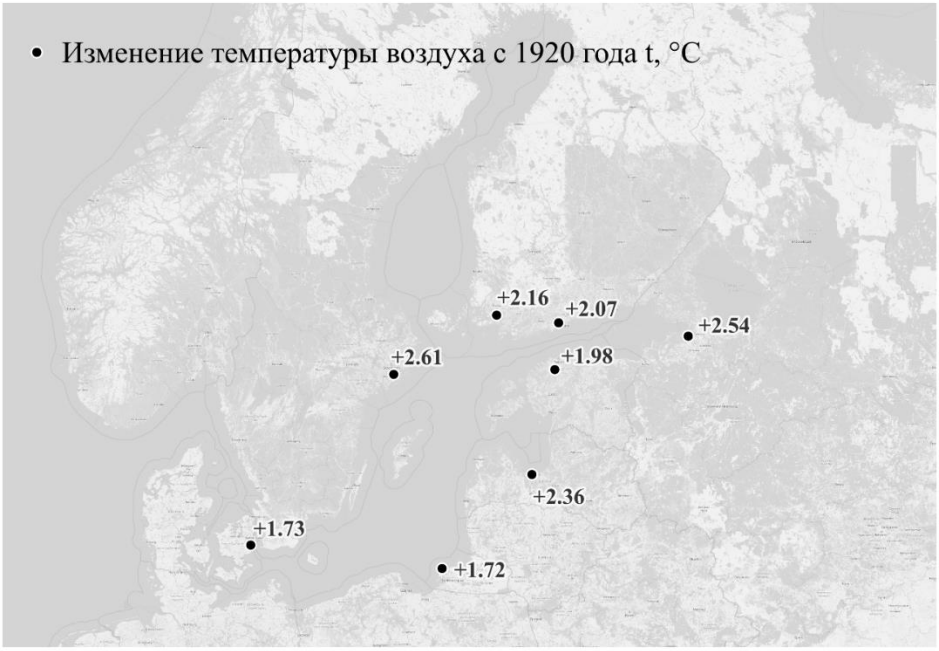


Рисунок 1.6 - Изменения среднегодовой температуры воздуха более чем за 100-летний период в регионе Балтийского моря

Такое изменение температуры обуславливает «мягкие» зимы и сокращение ледового сезона. С побережий начинается формирование льда, образуясь сначала на мелководьях, и постепенно распространяется в сторону моря. В некоторых ситуациях лёд, может вызвать локальную эрозию на побережьях. Динамика морского льда варьируется от года к году в зависимости от температуры, штормов и колебаний уровня воды, а иногда и от веса снега на льду. Эти различия влияют на геоморфологию побережья, экосистемы и человека в целом. Температура выше среднего значения в ноябре – декабре приводит к запоздалому периоду становлению льда в акватории. Вполне вероятно, что в последующих годах произойдут значительные изменения в ледовых условиях Балтийского моря [14].

Но к концу XXI в различные климатические модели прогнозируют нагрев акватории Балтийского моря примерно на 2—4 °С. [15].

Повышение температуры приводит к тому, что положение центров действия атмосферы меняется: Азорский максимум смещается к северо-востоку, тем самым воздушные массы могут продвигаться по меридианам, а арктический холодный воздух глубже проникает на юг; Исландский минимум углубляется, за счёт этого явления сокращается разница в давлении и приводит к усилению западных ветров, которые несут теплый влажный воздух на территорию северной Европы [8].

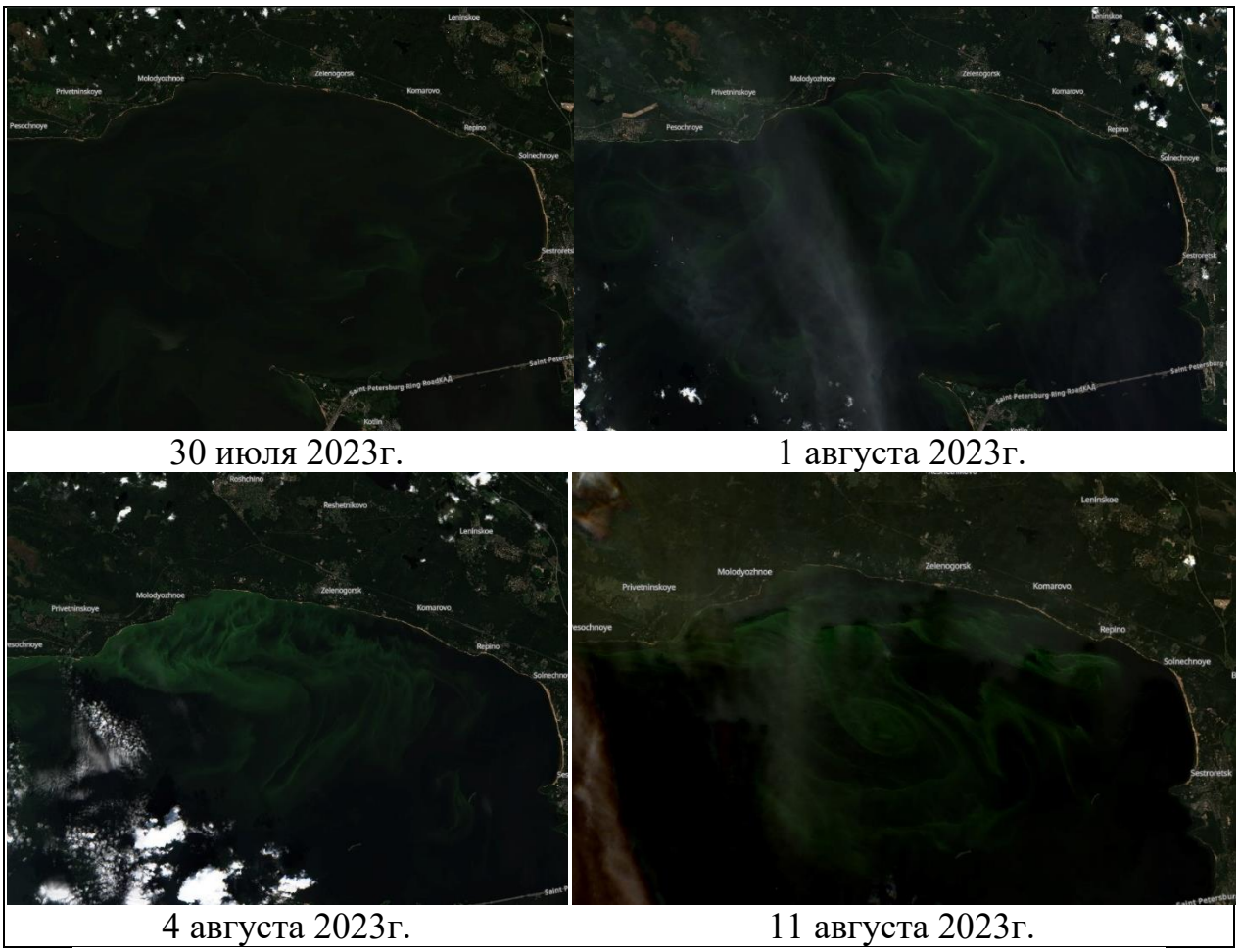
Причинами изменения климата разделяются на естественные, например, солнечная активность, извержения вулканов и т. д., и, антропогенные, такие как увеличение уровня концентрации парниковых газов в атмосфере.

Изменение температуры воздуха в регионе Балтийского моря приводит к ухудшению качества воды, усилению эвтрофикации, снижению биоразнообразия, повышению частоты возникновения опасных гидрометеорологических явлений, увеличению осадков, наводнениям, разрушению прибрежных экосистем [16].

Замедленная циркуляция вод с океаном не способна компенсировать антропогенное воздействие на Балтийское море, поскольку узкие, мелководные проливы (глубина которых на порогах от 7 до 18 м) замедляют обновление вод. Считается, что период полного обновления воды в акватории Балтийского моря составляет от 30 до 50 лет.

Большая плотность населения на побережье Балтийского моря негативно сказывается на экосистемах, поскольку оказывает высокую антропогенную нагрузку, загрязняя морскую среду в результате сброса неочищенных сточных вод [16].

В Балтийском регионе за последнее время не потеряла актуальности проблема загрязнения минеральными веществами, выносящимися со стоками из сельскохозяйственных угодий. А при повышении температуры усиливается процесс эвтрофикации, при котором фитопланктон чрезмерно размножается и разлагается. Жизнедеятельность таких организмов ухудшает качество воды, снижает содержание кислорода, особенно у дна, замедляет рост и увеличивает смертность зоопланктона и рыбы [16]. На рисунке1.7 представлен спутниковый снимок [17] акватории восточной части Финского залива у побережья Курортного района со спутника Landsat с 30 июня по 11 августа 2023 г. в комбинации «естественный цвета». Аномально жаркая погода спровоцировала резкий рост и отмирание колониальной водоросли (Microcystis aeruginosa Kützing) в акватории Финского залива, со спутника видны очаги их распространения.



30 июля 2023г. 1 августа 2023г.

4 августа 2023г. 11 августа 2023г.

Рисунок 1.7 – Распространение сине-зеленых водорослей (Microcystis aeruginosa Kützing) вдоль берега Финского залива в Курортном районе Санкт-Петербурга летом 2023гг. [17]

Повышение температуры способствует увеличению биомассы фитопланктона. Повышение температуры усиливает процесс метаболизма и эвтрофикации, влияет на некоторые процессы, например, биоразнообразие, распределение биомассы, структуре сообщества и изменение в доминировании определенных видов [18.].

На видовое разнообразие влияет и гидрологический режим Балтийского моря, изменения которого может привести к необратимым последствиям для экосистем.

Температурный режим акватории Балтийского моря (рисунок 1.8) зависит не только от температуры окружающей среды, но и от стока речных вод и имеет сезонные колебания. В отличии от поверхностных вод,

температура на глубине более 20 м постоянна в пределах от 0 до 4°С в зависимости от района. Наибольшие сезонные колебания наблюдаются в восточной части Балтийского моря: в зимний период температура воды повышается при продвижении с востока на запад, а летом температура выше в следствие воздействия прогретой суши. Западная часть моря подвержена воздействию тёплых воздушных масс с Атлантического океана [8].

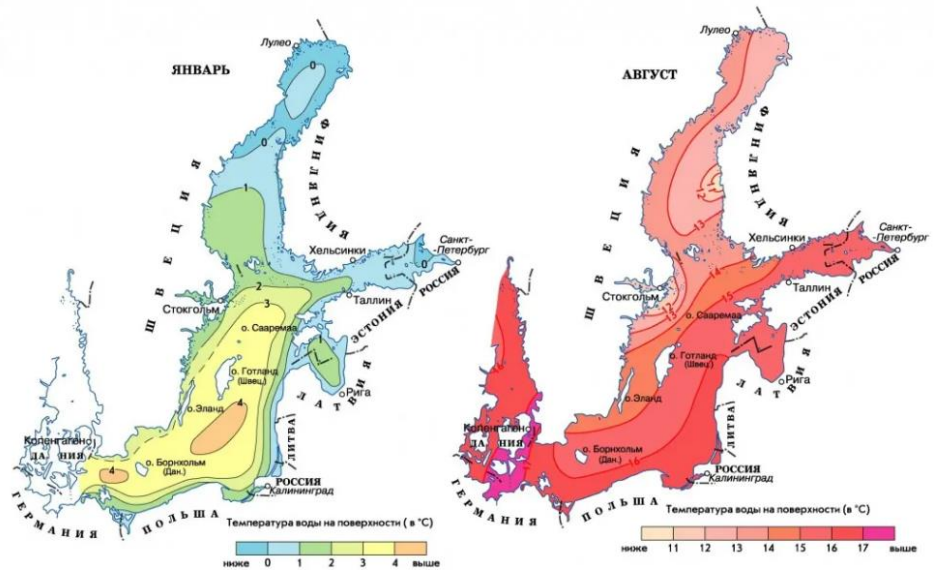


Рисунок 1.8 – Схематичное распространение температуры воды на поверхности Балтийского моря [8]

Изменение климата сопровождает повышение средней температуры поверхности моря, и по мнению специалистов, не все морские обитатели смогут приспособиться к новым условиям. Распространение и выживание некоторых морских видов может стать под угрозой. «Однако, повышение температуры воды может спровоцировать рост чужеродных, так называемых - инвазивных видов, для которых такие изменения окружающей среды позволяют увеличивать популяцию» [19]

Повышение количества атмосферных осадков за счёт изменения климата оказывает влияние на гидрологический режим, а именно увеличивает объём воды проходящий через сечение, то есть увеличивает расход рек. Это может повлиять на уровень моря, который учёные отмечают

одним из важнейших индикаторов изменения климата. За более 100-летний период наблюдений было выявлено, что уровень Балтийского моря повышается, и, по оценкам, прирост составляет от 0.1 до 0.24м [20].

Изменение климата отражается и на солёности воды Балтийского моря. Увеличение количества осадков, приводит к опреснению водоёма. Солёность воды является одним из основных экологических факторов, влияющих на распределение организмов и их биоценозов. При изменении солёности вод происходит снижение биоразнообразия: при продвижении с юго-запада на северо-восток численность и видовой состав морских обитателей уменьшаются, а солоноватоводных увеличиваются [19].

Также, солёность воды напрямую влияет на образование льда. Таким образом, чем ниже солёность воды, тем быстрее происходит процесс льдообразования. Поскольку солёность воды в прибрежных районах мала, происходит увеличение количества льда у побережий. Таяние льдов в некоторых регионах Балтийского моря способствует повышению уровня моря, особенно уязвимы прибрежные районы местообитаний человека и различные экосистемы. Повышение уровня воды угрожает промышленности и различным инфраструктурам городских поселений.

Территории побережий без устойчивого ледяного покрова могут подвергаться разрушению за счёт увеличения частоты стихийных бедствий, в том числе и штормовых нагонов.

Таким образом, изменение климата в регионе Балтийского моря ведёт к нарушению экологического баланса, влияет на морские и прибрежные экосистемы. К факторам, приводящим к повышению температуры относят увеличение концентрации парниковых газов, усиление циркуляции атмосферы в районе Атлантики, которое увеличивает количества осадков.

Изменения также затрагивают судоходство, рыболовство и другую хозяйственную деятельность человека в прибрежных районах.

Для снижения воздействия изменения климата необходимо предпринимать совместные усилия по защите и восстановлению

экологического баланса акватории, модернизировать технологий на международном уровне.

1.2 Динамика показателей интенсивности атмосферной циркуляции

Как уже было сказано ранее, «Балтийское море подвержено влиянию циркуляции над Атлантическим океаном. В этих широтах преобладает зональный перенос (с запада на восток) тёплых и влажных воздушных масс с Атлантики» [21].

«Однако, циркуляция атмосферного воздуха подвержена большим колебаниям, поскольку положение центров действия меняется. Разность атмосферного давления, на станциях около климатических центров действия, в области Исландского минимума и Азорского максимума называется индексом Североатлантического колебания (NAO), который в свою очередь характеризует интенсивность переноса воздушных масс с запада на восток в зимние месяцы» [21]. Чем больше градиент давления между двумя центрами действия атмосферы, тем сильнее западный перенос, и, соответственно, больше циклонов поступает в Восточную и Центральную часть Европы. Активность центров действия атмосферы к лету снижается, что приводит к уменьшению повторяемости количества циклонов [21].

Для изучения многолетних изменений климата повсеместно используют индекс атмосферной циркуляции NAO. Рассчитывают данный индекс по разности барометрических значений на двух постах наблюдения, вблизи Исландии и в районе Азорских островов. Полученный показатель позволяет оценить изменчивость во времени и интенсивность атмосферной циркуляции [21].

На рисунке 1.9 представлен график изменчивости индекса Североатлантического колебания с 1920 по 2023гг. по усреднённым данным за январь, февраль и март каждого года

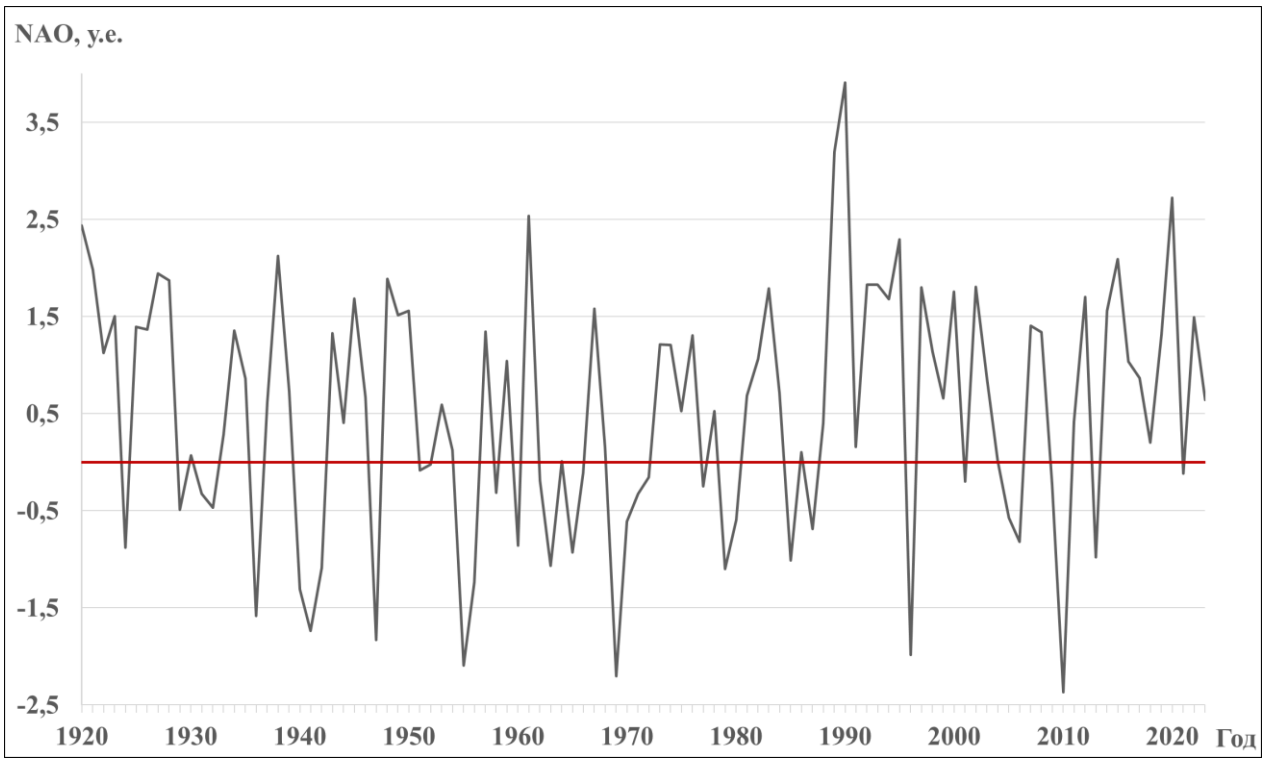


Рисунок 1.9 - Изменчивость индекса Североатлантического колебания NAO с 1920 по 2023гг. по усреднённым данным за январь, февраль и март каждого года

Положительная фаза индекса Североатлантического колебания означает усиление зональной циркуляции и увеличение градиента давления между двумя станциями, расположенных вблизи Исландии и Азорскими островами. Индекс NAO с положительным знаком приводит к усилению ветров западного направления (рисунок 1.10), и, следовательно, к прохладному лету и тёплой зиме в регионе Балтийского моря. Отрицательная фаза индекса характеризует ослабление западного переноса тёплых воздушных масс с Атлантики в зимний период и усиление меридиональных процессов.

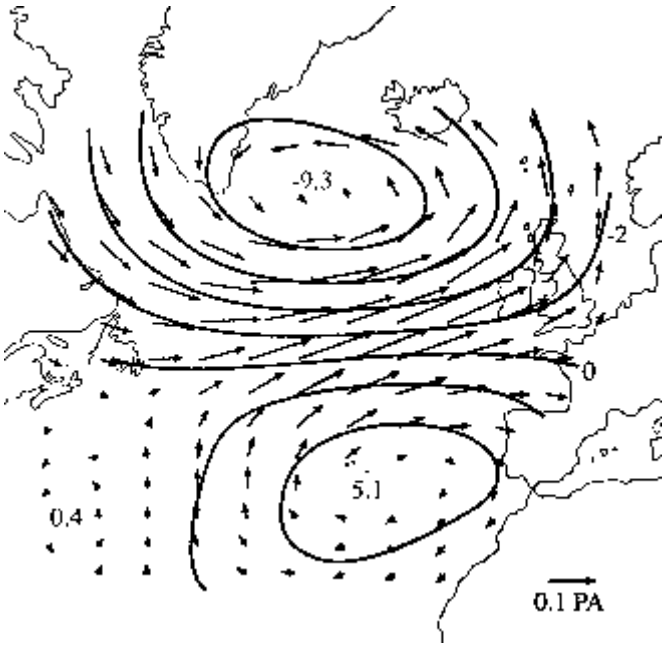


Рисунок 1.10 – Схематичное представление направления ветра при положительной фазе индекса Североатлантического колебания NAO

Ослабление интенсивности атмосферной циркуляции в регионе северной Атлантики произошло в 1960-е гг: резкое снижение зонального переноса воздушных масс западного направления в умеренных широтах привело к ослаблению переноса теплых воздушных масс к северной части Атлантики и холодных воздушных масс в южном направлении. Ослабление атмосферной циркуляции в этот период может быть связано с развитие промышленности. Однако, увеличение интенсивности зональной циркуляции в конце 1980-х – начале 1990-х гг. привело к усилению интенсивности атмосферной циркуляции, а значит и усилению тёплых ветров западного направления. Также отмечаются периоды 1995, 1997, 2000, 2002, 2007, 2012, 2014, 2015, 2020, 2022г, когда значения индексов атмосферной циркуляции были выше средней многолетней нормы. В целом, за последние 20 лет наблюдается тенденция к положительной фазе индекса NAO, за исключением 2010г.

Отклонения в ту или иную фазу Североатлантического колебания, как правило, связаны с повышениями температуры и увеличением количества осадков на одной территории и понижениями температуры и уменьшением

количества осадков на другой. Изменение давления влияет на траекторию штормов в Северной Атлантике. Североатлантического колебания, часто наблюдаются аномальные закономерности повышения температуры, распространяющиеся далеко по восточной Евразии. Североатлантические колебание демонстрирует значительную межсезонную и межгодовую изменчивость [22]. На рисунке 1.11 представлено схематическое представление положительной и отрицательной фаз Североатлантического колебания.

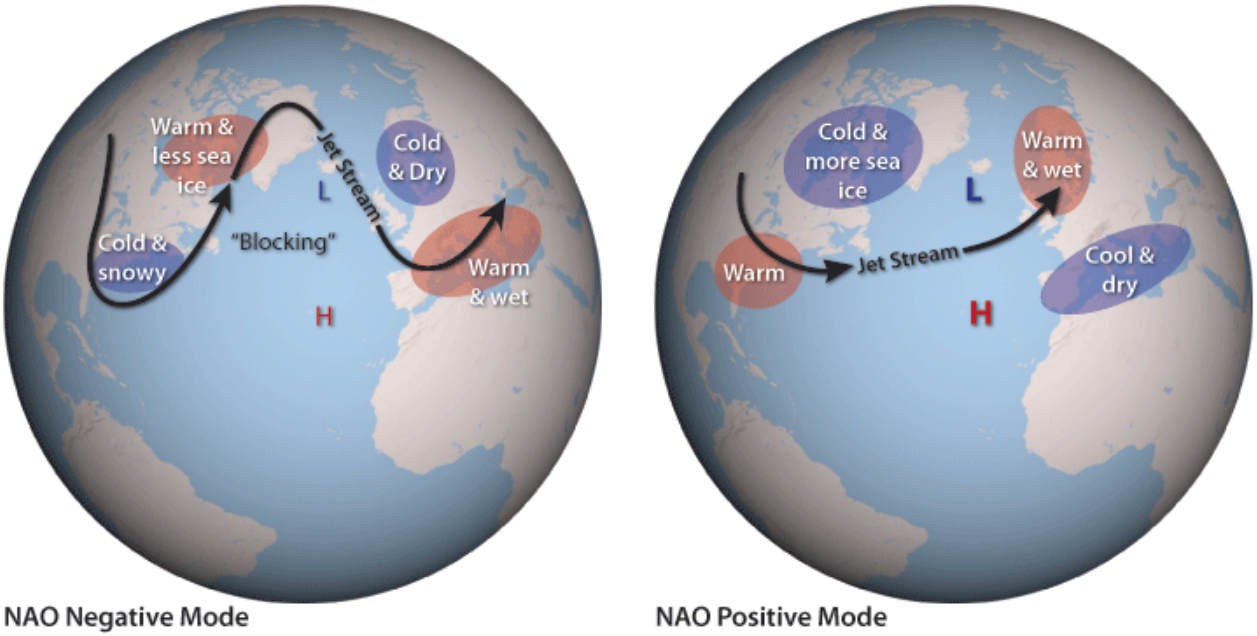


Рисунок 1.11 - Схематическое представление отрицательной (слева) и положительной (справа) фаз Североатлантического колебания, где L – область низкого давления, H – область высокого давления

1.3 Динамика скоростей ветра и повторяемость штормовых явлений

Ветра и другие стихийные бедствие представляют угрозу для прибрежных экосистем и места обитания человека. В регионе Балтийского моря не исключены сильные шторма и ураганы [23].

Исследованиям динамики скоростей ветра, ветрового волнения и штормовых явлений, в том числе воздействия сгонно-нагонных явлений на прибрежные территории в регионе Балтийского моря посвящено не мало работ [23,24,25,26].

На скорость ветра, направление и интенсивность штормовых явлений влияет градиент давления и процессы циркуляции атмосферы (циклоны, движущиеся в основном с запада на восток), температура и влажность, оказывающие влияние на плотность воздуха, рельеф местности [6].

Циркуляция вод в регионе Балтийского моря, а также скорость и направление ветров напрямую зависит от господствующих циклонов в северном полушарии. На рисунке 1.12 схематично представлены основные направления северо-атлантических циклонов, которые определяют направления ветров над акваторией Балтийского моря.

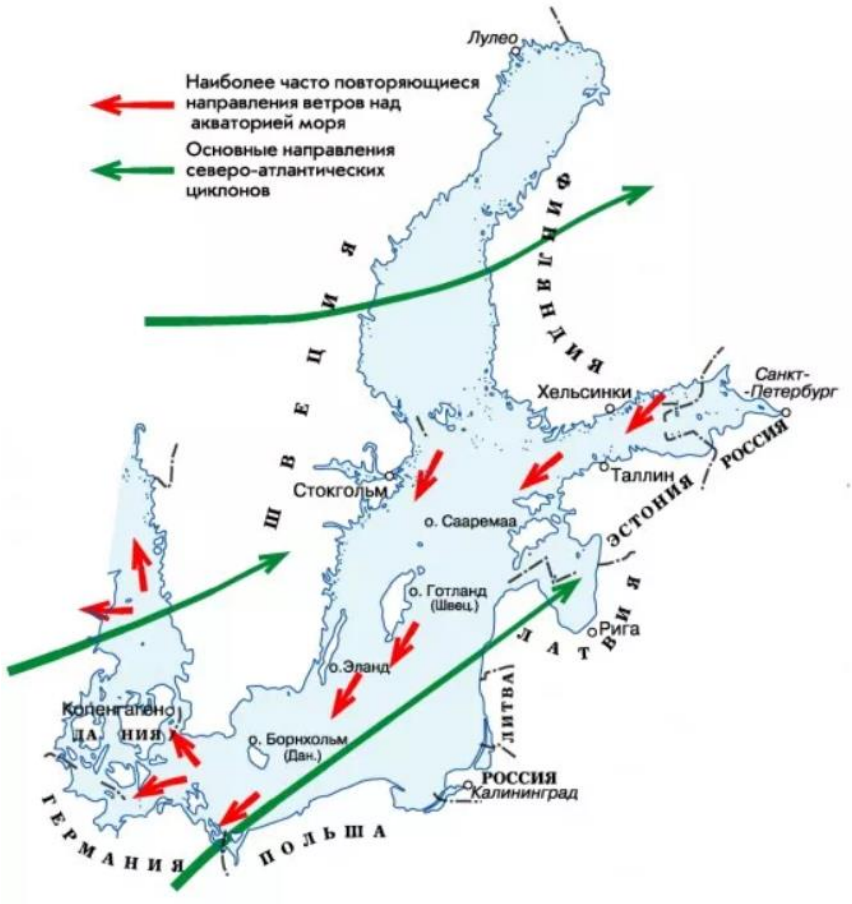


Рисунок 1.12 – Схема основных направлений североатлантических циклонов в регионе Балтийского моря [8]

В целом для побережья Балтийского моря характерны ветра юго-западного направления с повторяемостью 15-35%, южного и западного направления, повторяемость которых по 15-30%. Ветра юго-восточного направления не типичны для данного района и имеют слабую силу [27].

Средняя скорость ветра в открытых пространствах акватории Балтийского моря значительно выше чем у побережья и определяется ветрами западных, юго-западных и южных направлений, преобладающими во всех районах Балтийского моря. На северном побережье преобладают умеренные (от 6 до 10 м/с) и сильные ветра (более 10 м/с) с юга и юго-запада, а на южном – чаще с юго-запада и запада [27].

В восточной части Балтийского моря на побережьях Финского залива ветра с повторяемостью 20-30% северо-западного направления (с мая по июль) и юго-восточного (с сентября по апрель – 15-25%). Восточные ветра на южных побережьях фиксируют в весенний период (15-25%), а также на западных побережьях Балтийского моря, в районе соединения с водами Атлантического океана, в период с января по май (15-25%). На северных побережьях в районе Ботнического залива с сентября по март наблюдаются ветра северного направления с повторяемостью 15-20%, а также северо-восточного (25-30%) и северо-западного (15-25%) во вторую часть года с апреля по август [27].

В среднем, скорость ветра в районе Балтийского моря составляет от 3 до 7 м/с, увеличивающаяся в осенне-зимний период. В некоторый районах акватории среднемесячная скорость ветра не более 2 м/с (например, в Ботаническом заливе и в проливе Скагеррак). Безветренное состояние атмосферы нетипично для данной территории, повторяемость такого явления до 8%, как в открытом море, так и на побережьях. В Ботаническом и Финском заливах, а также во фьордах повторяемость штилей увеличивается до 25% [27].

Вследствие воздействия ветра на поверхность акватории возникают ветровые волны и штормовые явления, определяющиеся в основном

скоростью, направлением и продолжительностью ветра, различной конфигурацией дна и береговой линии. Это в свою очередь приводит к повышению уровня моря и последствиям в виде затопленных прибрежных территорий.

Из-за ограниченной связи с Мировым океаном Балтийское море фактически не является приливным. Однако, существуют нерегулярные колебания уровня воды, вызванные изменениями атмосферного давления, осадками, силой ветра и колебаниями стоячей волны (сейш). Совместное воздействие этих факторов может при некоторых обстоятельствах вызывать локальные колебания уровня моря в крупных заливах высотой до 3,2 м в самой северной части Ботнического залива. Увеличение масштабов и частоты экстремальных погодных явлений может увеличить частоту экстремальных явлений уровня воды (то есть нагонов воды) на побережьях Балтийского моря. В более теплые, чем обычно, зимы штормы могут также вызывать локальное повышение уровня моря, что вместе с ледяными плотинами на реках и колебаниями стоячей воды может увеличить зимнее затопление берегов Балтийского моря [28].

Волны в мелководном внутриматериковом Балтийском море достигают высоты не более 2 метров в течении всего года. Повторяемость сильнейших ветров (со скоростью более 20 м/с) в осенне-зимний период составляет 3-5%. В среднем, по разным источникам, в регионе Балтийского моря фиксируются около 50 случаев штормовых ветров в год. Одни из сильнейших штормов произошли в 1981г., скорость которого достигала 33 м/с; в 1982г. шторм в восточной части акватории со скоростью до 28 м/с; а также шторма в 1999г., 2002г., 2005г. и так далее [29].

Для большей части акватории Балтийского моря преобладающим являются штормовые ветра южного и юго-западного направления, а для западной части - ветра различных направлений в осенне-зимний период, а также западные и северо-западные в весенне-летний период [29].

Иногда в акватории Балтийского моря зафиксируют водяной смерч - достаточно редкое явление для данного региона [29].

Разные исследования в Балтийском море свидетельствуют об незначительных изменениях средней скорости ветра, продолжительности и направлении. В период в регионе Балтийского моря с 2014 по 2022 года средняя скорость увеличилась на 0.45 м/с, а максимальная на 1.1-1.4 м/с, повторяемость северных и северо-западных ветров в этот период также увеличилась.

Изменения климата приведут к увеличению повторяемости негативных явлений, таких как экстремальные осадки и шторма, приводящие к изменению и усилению разрушения береговой линии, а также изменению гидрологического режима прибрежных заливов за счёт поступления морских вод в устьевые зоны. Исследованию нагонных явлений у морских побережий и в устьях рек посвящен ряд работ [30].

Исследователи и учёны уделяют внимание прибрежной зоне, поскольку эта зона, где происходит контакт наземных, морских и атмосферных процессов и считается особенно изменчивой, что подчеркивает необходимость учитывать при изменении климата. Общая береговая линия Балтийского моря составляет 76 000 км и состоит из различных пород, форм и рельефа: берега, образованные осадочными породами, песчаные пляжи, плоски глинистые берега, изрезанные береговых линий со скалами, озовых гряд и множеством архипелагов и лагун, с преобладающими коренными породами. Все эти побережья в той или иной степени подвержены процессам аккумуляции и эрозии, в результате воздействия энергии волн, изменяющаяся от погодных условий. Участившиеся случаи штормовых ветров, обрушивающиеся на побережья Балтийского моря, свидетельствует об чувствительности береговой линии к изменению климата [28].

Как было сказано ранее, эрозией подвергаются различные прибрежные полосы, луга, водноболотные угодья, песчаные косы и дюны, расположенные на пологих южных побережьях Балтийского моря. Так, например, две третий

побережий Германии подвергаются эрозии, в Польше 80%, а также побережья Прибалтийских стран уязвимы к эрозии, но наибольшим изменениям, постоянным разрушениям и затоплениям прикорневой части лесных массивов подвергаются побережья Куршской косы и Курортный район на территории России в Калининградской области и в г. Санкт-Петербург [28].

Эти побережья открыты ветрам западных и северных направлений, обрушивающихся на данную территорию, с максимальным разгоном и наибольшей потенциальной энергией. Эта деформация береговой линии имеет сезонный характер.

Более подробно об береговой эрозии и изменении береговой линии можно узнать в сборнике статей «Вторая оценка изменения климата в бассейне Балтийского моря, Региональные климатические исследования» [31].

Поскольку существует тенденция в изменении скорости и направлении ветра, а также в увеличении количества разрушительных штормов, необходимо проводить различные мероприятия, направленных на укрепление береговой линии [32].

Ещё одним последствием воздействия ветров является повалы деревьев, так называемые ветровалы, которые в значительной степени влияют на целостность леса бореальной зоны. Подверженность к данному явлению определяется возрастом и видовым составом растительности, так, например, темнохвойные, сосновые и смешанные лесные насаждения, превышающие возраст рубки (переспелые леса), а в некоторых случаях даже пригодные леса (спелые) могут быть повалены под воздействием ветров. Вторичные мелколиственные леса значительно реже подвергаются ветровалу в штормовую погоду, за исключением сильных вихрей – смерчей. Крупные ветровалы, вызванные шквалами, зависят от площади повреждения и различных морфометрических показателей рельефа (высоты абсолютные и относительные, глубина и густота расчленения,

градиенты, уклоны, конфигурации): на склонах, обращенных в сторону ветра (наветренный склон) до 6 раз больше площадь повреждений лесного массива, чем на подветренных участках, которые находятся вдали от преобладающего ветра. Это подтверждено статистически значимой зависимостью. Таким образом, ветровалы формируют динамику лесных экосистем в субаркической зоне Северного полушария также, как и другие природные нарушения лесного массива биотических и абиотических факторов [33].

Ветровалы бывают эндемичными, когда повал деревьев с низкой устойчивостью происходит регулярно под господствующими ветрами, и катастрофическими, когда нетипичное, для местности, направление ветра оказывает воздействие на экосистемы и подвергает опасности население, разрушает инфраструктуру, наносит экономический ущерб. В европейских странах более 50% природных нарушений лесов вызвано катастрофическими ветровалами. В центральной (европейской) части России и на Урале ущерб в лесной зоне значительно ниже: за период 1986–2017 гг. общая площадь сплошных ветровалов составляет примерно 3 тыс.км^2 (0,19 % от площади лесопокрытой территории европейской части России). В 82 % случаев повреждения происходит при воздействии шквалистых ветров и около 13 % во время смерчей [34].

Ветровалы также зависят от различных характеристик насаждений (формы, состава, возраста насаждений и так далее), от климата, рельефа местности и прочих факторов местоположения и модели лесопользования. Значимыми считают породный состав, высоту, полноту и возраст древостоя, особенности крон и корневой системы, рельеф местности, различные свойства почвы (влажность, мощность, и механический состав почвенного профиля), близость открытых пространств и водоёмов. Появление открытых пространств в результате сплошных или выборочных рубок при лесопользовании в различных масштабах также влияет на подверженность лесных массивов ветровалам [33]. На рисунке 1.13

придавлены многолетние данные о площадях поврежденных ветрами лесов и количества штормовых ветров в Европейкой территории России с 1986 по 2017 гг. Заметно, что наибольшее количество штормов за данный период и площадей, поврежденных ветрами (более 20м/с) ветров отмечалось в 2009–2010, 2012, 2016 гг.

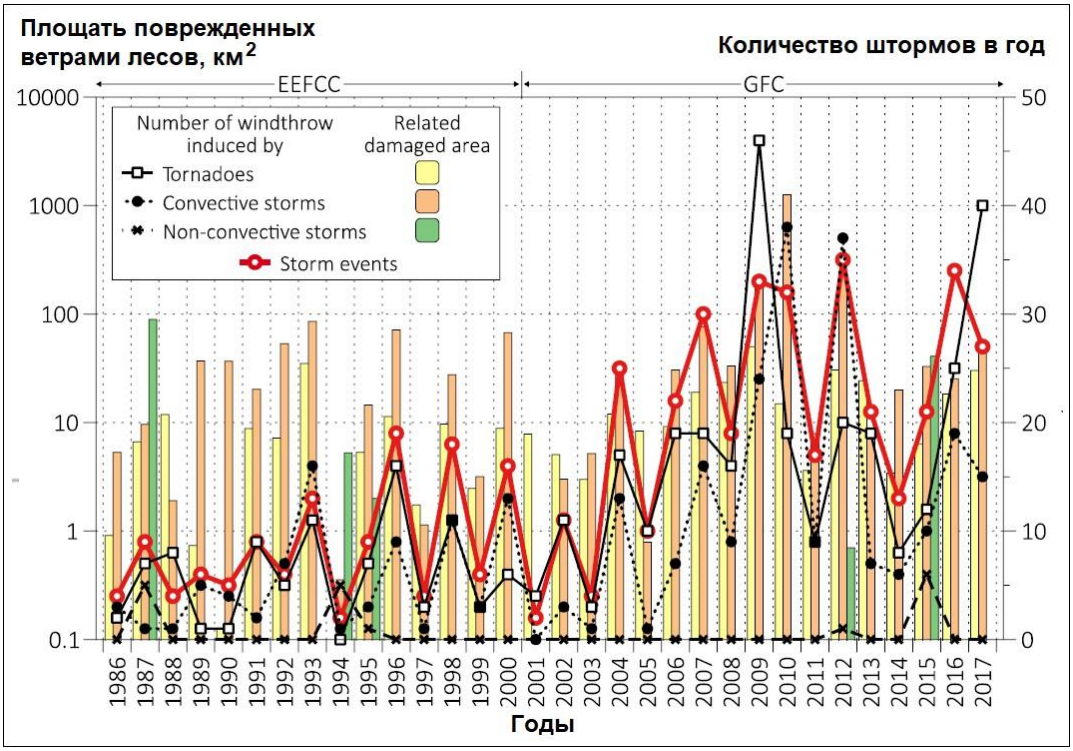


Рисунок 1.13 - Многолетние значения площадей поврежденных ветрами лесов и количества штормовых ветров в Европейкой территории России [35]

Участившиеся случаи штормовых ветров в прибрежных районах могут приводить к увеличению числу поваленных деревьев. Например, в марте 2020 года штормовой ветер, обрушившийся на Калининградскую область, повалил 118 деревьев, а в январе 2022 года – 171; в августе 2022 года в лесопарке Курортного района было выявлено 99 упавших деревьев.

Важно учитывать, что атмосферная циркуляция в регионе Балтийского моря зависит от множества факторов, в том числе от динамики глобального климата и антропогенного воздействия. Для снижения вреда от негативных последствий изменения климата необходимо обоснованно и комплексно

подходить к разработке планов, стратегий, рекомендаций по охране окружающей среды в регионе Балтийского моря.

2. Методы исследования влияния штормов на состояние прибрежных экосистем и положение береговой линии

Для минимизации последствий климатических изменений необходимо проводить регулярные наблюдения и исследования в регионе Балтийского моря, такие как мониторинг и анализ гидрометеорологических характеристик; моделирование и прогнозирование штормовых явлений; исследования изменений береговой линии и прибрежных экосистем с целью оценки уязвимости к разрушению прибрежных территорий из-за стихийных бедствий.

В России в регионах Балтийского моря наблюдение за гидрометеорологическими процессами осуществляет ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». А также, в данном районе существуют такие метеорологические организации, как Институт исследований Балтийского моря имени Лейбница в Варнемюнде (IOW), Шведский метеорологический и гидрологический институт в Норчепинге, отдел морских исследований Финского метеорологического института в Хельсинки, отдел исследований и разработок Датского метеорологического института в Копенгагене.

В настоящее время мониторингом изменений занимается и морской центр климатического и экологического мониторинга в Балтийском федеральном университете им. И. Канта. Исследования ведутся как на побережьях Калининградской области, так и в открытом море, и направлены на создание единой системы климатического и экологического мониторинга морей России. Результаты отражают тенденции и прогнозы изменения климата.

Большой вклад в исследовании Балтийского моря внесла организация BALTEX/Baltic Earth. В 2019-2022 гг. были опубликованы отчёты исследователей из 9 прибрежных стран - Baltic Earth Assessment Reports, в

которых отражены выводы, в том числе о текущем состоянии Балтийского моря, и рекомендации для будущих поколений [35].

Для определения тенденций изменения различных гидрометеорологических характеристик используют архивные данные, например, сайт «Погода и климат» http://www.pogodaiklimat.ru/ [11], в котором собраны данные о погоде и климате более 1000 городов по всему миру. Для обработки и визуализации данных используют пакет программ, включающие в себя электронные таблицы, например, MS Excel.

В исследовании влияний штормовых нагонов на прибрежные территории и их экосистемы, положении береговой линии выделяют различные наземные (то есть полевые, прямые методы) и дистанционные методы (аэрофотосъёмка или анализ спутниковых изображений) с применением различных инструментов [37].

Наземный мониторинг заключается в сборе качественных и количественных разносторонних данных за определенный период. На этом основываются геодезические, фотографические и литологические методы исследования.

Наземный мониторинг береговой линии начинается с создания сети реперов и координатной привязки. При геодезическом методе исследования используют приборы для измерения вертикальных и горизонтальных углов (теодолит или тахеометр), а также высотомеры (нивелиры), позволяющие определить разность высот. Геодезическую съёмку проводят поперек береговой линии от линии воды, фиксируя различные формы рельефа, их положение и границы (авандюна, эоловый надув, береговой откос и так далее) с привязкой к реперу [37].

Данные обрабатывают с помощью элементарных электронных таблиц. Анализ разновременных результатов исследования состоит в количественном сравнении положения элемента рельефа (так называемого маркера, выбор которого зависит от конкретной цели исследования). Такое сопоставление

позволяет сделать выводы о динамики деформации побережья, в том числе после разрушительного влияния ветра, осадков и штормовых нагонов [37].

Суть литологической съёмки заключается в том, что на исследуемой площадке отбирается проба осадочных пород у поверхности пляжа с целью определения состава и тенденции к изменению состава, при этом эоловые отложения исследуются отдельно [37].

Регулярный фотомониторинг производят по разработанной схеме с целью получения материалов, позволяющих визуально определить динамику изменения морфологии берега и его отдельных элементов [37].

К наземным методам исследования влияния штормов можно отнести натурные наблюдения состояния различных видов растительности в прибрежных экосистемах.

Методической основой данного исследования является распоряжения Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга, которыми в 2021 г. утверждена методика оценки экологического состояния зеленых насаждений и нормативы качества зеленых насаждений Санкт-Петербурга [38].

Данная методика позволяет оценить экологическое состояния зеленых насаждений в масштабе различного объёма (один объект или несколько участков, вплоть до характеристики насаждений мегаполиса в целом).

Методика включает подготовительный этап, натурное обследование (сбор данных), камеральную обработку собранных материалов и аналитическую работу с полученными результатами.

На подготовительном этапе происходит постановка цели и задач конкретного исследования, выбор соответствующих объектов исследования; предварительный сбор информации из открытых источников, например, категории объектов или данных дистанционного зондирования (космические снимки) [38].

Натурное обследование начинается с рекогносцировки и заложения пробной площадки. В подготовленные бланки заносят: описание объекта (название), различные характеристики рельефа, преобладающие элементы растительности, приводят видовой и возрастной состав древостоя и так далее. Пробная площадка закладывается различными формами на площади 400м^2 и отражает характерную растительность объекта. Таких площадок в пределах одного объекта исследования может быть от 1 до 5[38].

Древостой описываются путем заполнения формы с указанием категории состояния каждого дерева (вид, длина, высота, примерный возраст, повреждения при наличии, категория состояния). Отнесение деревьев к той или иной категории состояния проводится в первую очередь по комплексу биоморфологических признаков: густоте и симметрии кроны, наличию и доле сухих ветвей в верхней части кроны, характер строения ветвей (особенно в верхней части кроны) - исходя из степени соответствия нормальному для данного вида строению ветвей в данном возрасте [38]. Для оценки состояния древесной растительности городских экосистем целесообразно также применять методику для оценки санитарного состояния [39].

Однако у прямых методов существует недостаток в виде больших затрат времени на исследование и возможности исследования в труднодоступных местах. Также эти методы своевременно не отображают изменения береговой линии, поскольку камеральные работы и анализ полученных данных - трудоёмкий и длительный процесс.

Исследования с применением дистанционных методов позволяет оперативно получить данные с обширных территорий, в том числе и в труднодоступных областях за короткие сроки с высокой степенью детализации. Современные космические снимки позволяют решать различные задачи по изучению эрозии побережий на основе таких индикаторов, как границы растительности и так далее [40].

Для исследования динамики изменения береговой линии чаще всего используют летние космические снимки инфракрасного диапазона, полученные со спутников Ландсат (Landsat), поскольку данные других спутников охватывают меньший временной период. Дешифрование спутниковых снимков проводят в специализированных геоинформационных системах, например, Quantum GIS, ArcGIS, ENVI, позволяет получить информацию о положении береговой линии в разные периоды, рассчитать вегетационный индекс (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index), индекс выделения воды (AWEI - Automated Water Extraction Index) [40].

Снимки среднего качества можно получить на сайте Геологической службы США https://earthexplorer.usgs.gov/ [17] Для классификации водного объекта использовался алгоритм Binary Encoding Classification программы ENVI 5.3. Программное обеспечение ENVI – это среда для визуализации, обработки и анализа геопространственных изображений, включающее в себя ряд автоматизированных алгоритмов. После того, как снимок загружен в программу, необходимо провести предварительную обработку, а именно, радиометрическую и атмосферную коррекцию с помощью модуля FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) для устранения влияния атмосферы (пыль, водяной пар и т.д.) и выделить участки «интереса» - ROI, для ускорения процесса обработки. Классификация проводится по «эталонному участку» - поверхности акватории (параметр Select Classes from Regions). В результате выполнения алгоритма получаем линию побережья – линию между поверхностью воды и суши (рисунок 2.1). Следующим этапом обработки является количественная оценка увеличения или уменьшения площади береговой линии, проводится с помощью алгоритма Change Detection Statistics и Thematic Change workflow. Получившийся векторный файл сохраняется в формате shape (.Shp), а дальнейший анализ проводится в комплексе ArcGIS: скорость абразии и аккумуляции береговой линии вычисляется по точечному слою при помощи инструмента «ближайший объект - Near» [40].

Рисунок 2.1 – Результат применения алгоритма Select Classes from Regions в ENVI

Появление и распространение компьютерного зрения и нейроных сетей может автоматизировать процессы по определения береговой линии или классификации древостоя даже в нечётких спутниковых изображениях. Однако данный метод требует знания алгоритмов машинного обучения для обучения модели [41].

3 Воздействие изменений климата и штормовых процессов на прибрежные экосистемы в восточной части Балтийского моря

Для проведения исследований изменений климата в качестве источников данных использовались сведения, находящиеся на официальных сайтах профильных организаций [15–16,24]. Например, в настоящее время, по данным ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» на территории Санкт-Петербурга наблюдается 18 метеорологических и 5 гидрологических и морских опасных природных явлений.

В ходе данной работы был выполнен анализ многолетних данных наблюдений за температурой воздуха, атмосферными осадками и скоростями ветра с построением и оценкой трендов на 14 станциях наблюдений в Санкт-Петербурге и Ленинградской области за период с 1980гг. по 2020г.. Расположение метеостанций представлено на рисунке 3.1. В таблице 3.1 представлена краткая характеристика.

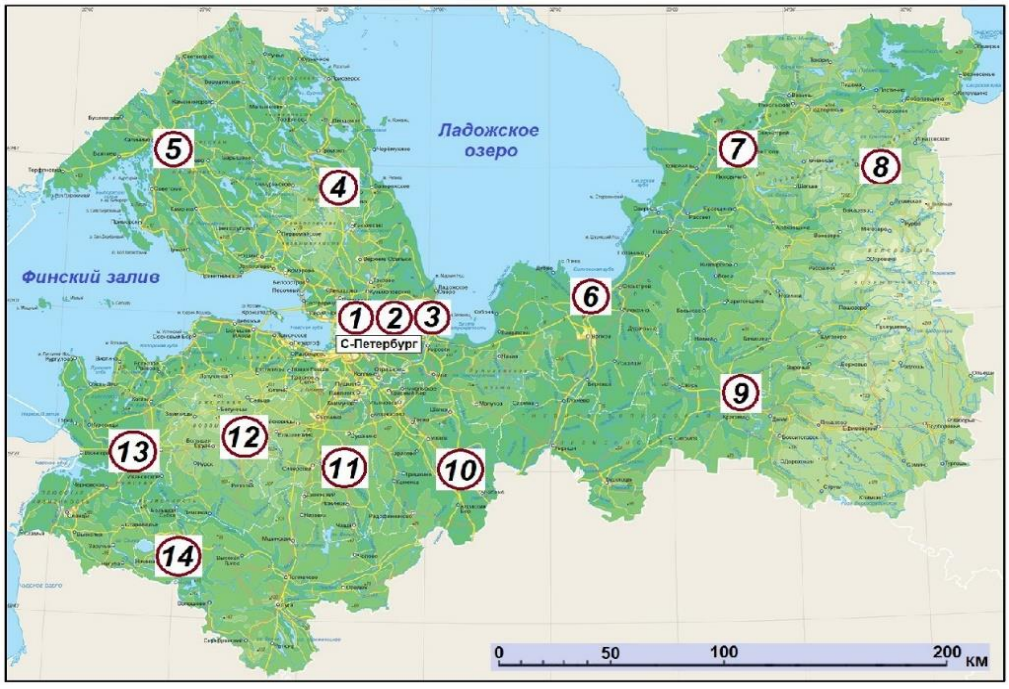


Рисунок 3.1 - Схема расположения станций многолетних наблюдений за температурой воздуха, атмосферными осадками и скоростями ветра

Таблица 3.1 – Краткая характеристика метеорологических станций с рисунка 3.1

№ станции на карте	Название	Местоположение метеостанции
1	г. Санкт-Петербург	широта 59.97 долгота 30.30 высота над уровнем моря 6 м
2	пос. Воейково	широта 59.95 долгота 30.70 высота над уровнем моря 75 м
3	г. Шлиссельбург	широта 59.93 долгота 31.00 высота над уровнем моря 16 м
4	пос. Сосново	широта 60.55 долгота 30.32 высота над уровнем моря 70 м
5	г. Выборг	широта 60.72 долгота 28.73 высота над уровнем моря 13 м
6	г. Новая Ладога	широта 60.12 долгота 32.32 высота над уровнем моря 9 м
7	г. Лодейное Поле	широта 60.72 долгота 33.55 высота над уровнем моря 23 м
8	село Винницы	широта 60.63 долгота 34.78 высота над уровнем моря 111 м
9	г. Тихвин	широта 59.65 долгота 33.55 высота над уровнем моря 61 м
10	г. Любань	широта 59.35 долгота 31.23 высота над уровнем моря 39 м
11	дер. Белогорка	широта 59.35 долгота 30.13 высота над уровнем моря 89 м
12	г. Волосово	широта 59.43 долгота 29.50 высота над уровнем моря 129 м
13	г. Кингисепп	широта 59.37 долгота 28.60 высота над уровнем моря 20 м
14	дер. Николаевское.	широта 58.57 долгота 29.80 высота над уровнем моря 91 м

На рисунках 3.2 и 3.3 представлена изменчивость температур воздуха в среднем за лето и зиму, а также за январь и июль в г. Санкт-Петербурге.

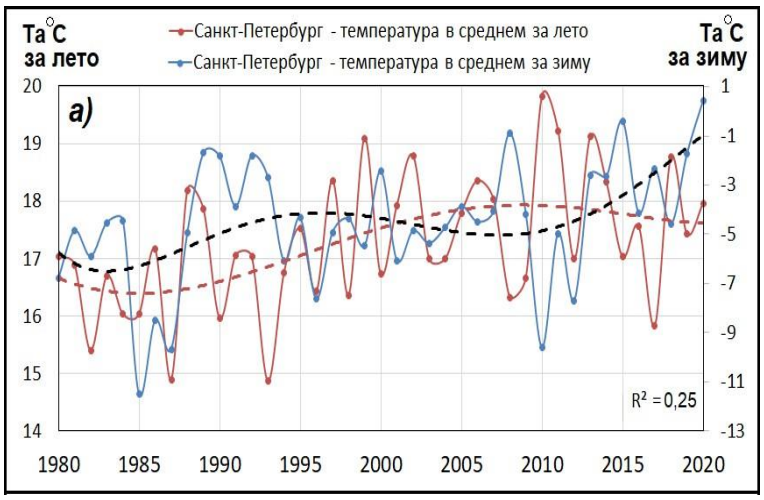


Рисунок 3.2 - Многолетняя изменчивость температура воздуха в среднем за лето и зиму в г. Санкт-Петербурге

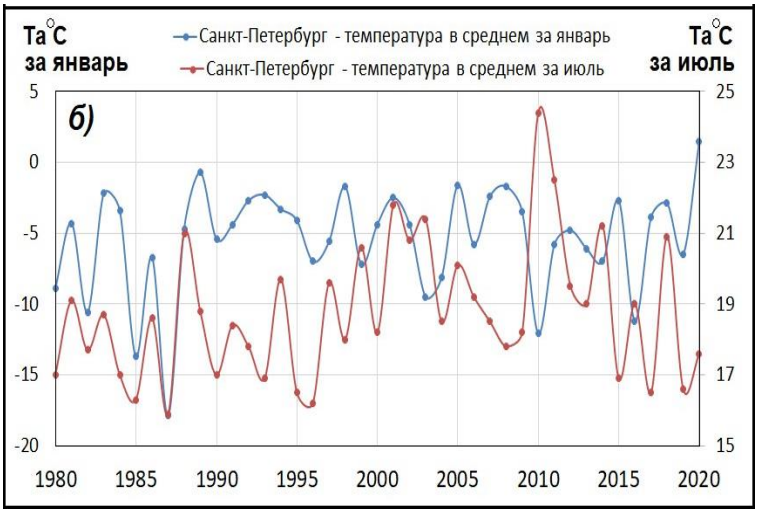


Рисунок 3.3 - Многолетняя изменчивость температура воздуха в среднем за январь и июль в Санкт-Петербурге

Пунктирной жирной линией на рисунке 3.2 представлены полиномиальные тренды по 5-ти летиям. Коэффициент детерминации R^2 = 0,25 соответствует тренду температуры в среднем за лето. На данных графиках отчётливо прослеживается изменения средней температуры воздуха в начале XXI века в периоды зима и лето, а также июль и январь, которые имеют противофазный характер.

Представленные на рисунках 3.4 и 3.5 данные об изменчивости средних за год максимальных за каждый месяц скоростей ветра

свидетельствуют, что в Ленинградской области имеются значительные территориальные различия по этой характеристике.

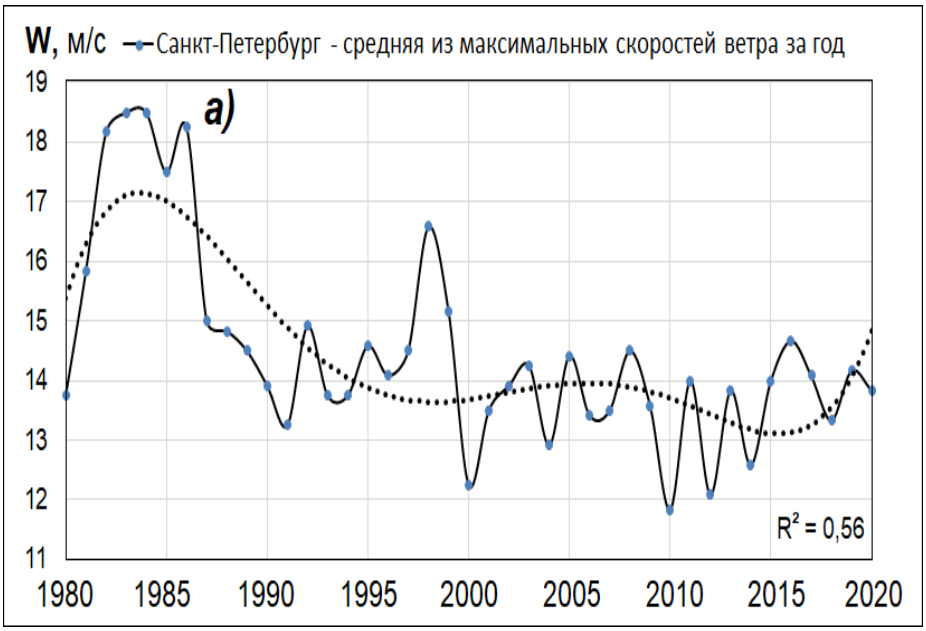


Рисунок 3.4 - Многолетняя изменчивость средних за год максимальных месячных значений скоростей ветра в г. Санкт-Петербург

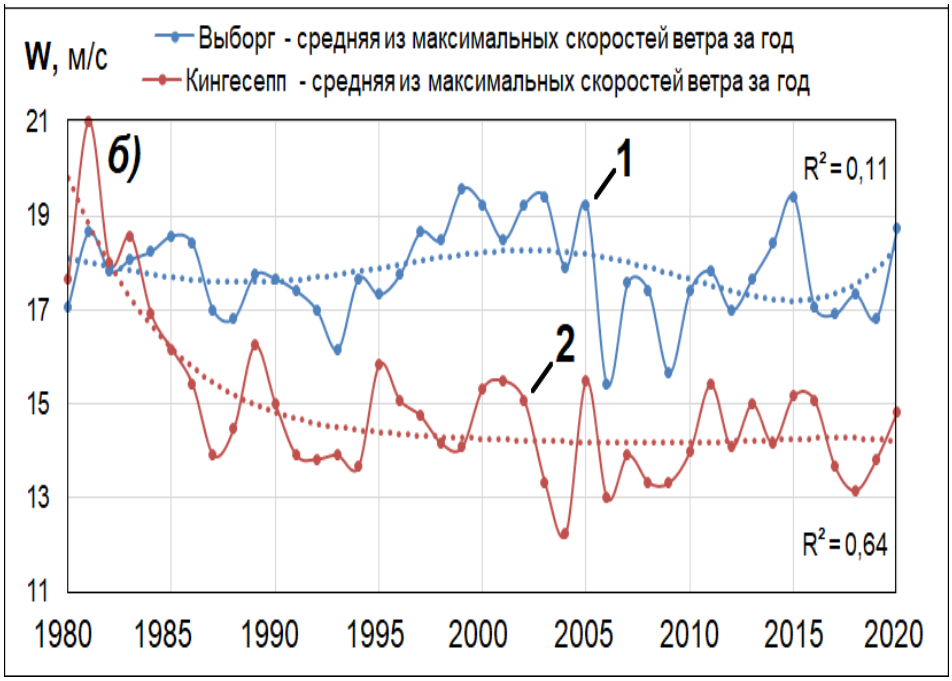


Рисунок 3.5 - Многолетняя изменчивость средних за год максимальных месячных значений скоростей ветра в – г. Выборг (1) и в г. Кингесепп (2)

Пунктирными жирными линиями представлены полиномиальные тренды по 5-ти летиям. R^2 – значения коэффициентов детерминации (значимости) трендов. Как видно из рисунков 3.5, значения скорости ветра на севере Ленинградской области в районе г. Выборга значительно выше (около 18,5 м/с) значений в районе г. Кингесепп (около 15 м/с) за период 1980-2020гг. Таким образом, в районе г. Выборг, воздействие ветра может наносить больший экономический ущерб для объектов инфраструктуры. В г. Кингесепп, а также в г. Санкт- Петербурге наблюдается тенденция уменьшения усредненных максимальных скоростей ветра (с 18-21 м/с в 1980-х гг. до 15-16м/с в 2020-х гг.).

На рисунках 3.6-3.8 представлена многолетняя изменчивость величин максимальных атмосферных осадков за 1 сутки в месяц, в среднем за год в г. Выборг и в г. Тихвин, в г. Кингесепп и дер. Николаевское, в г. Санкт-Петербург и г. Новая Ладога.

Рисунок 3.6 - Изменение максимального количества атмосферных осадков за сутки в период с 1980 по 2020 гг. в г. Выборг и в г. Тихвин

Рисунок 3.7 - Изменение максимального количества атмосферных осадков за сутки в период с 1980 по 2020 гг. в г. Кингесепп и дер. Николаевское

Рисунок 3.8 – Изменение максимального количества атмосферных осадков за сутки в период с 1980 по 2020 гг. в г. Санкт- Петербург и Новая Ладога

Значения атмосферных осадков демонстрируют значительную межгодовую изменчивость на всех анализируемых станциях. Весьма

значительные (более 50 мм) величины атмосферных осадков, выпадающие за 1 сутки, способные привести к неблагоприятным последствиям, причем внезапным, были зарегистрированы в Выборге (54 мм, август 1981 г.) в Кингисеппе (55 мм, июль 2011 г.; 57 мм, август, 2016 г.) в Санкт-Петербурге (53 мм, август 1991 г.; 57 мм, июль 1993 г.; 59 мм, июль 2000 г.), Тихвине (54 мм, июль 2000 г.; 67 мм, июль 1967 г.). Выполнено нормирование значений некоторых гидрометеорологических характеристик, представленное в таблице 3.2, отражающих природные процессы способные представлять опасность для безопасности жизнедеятельности в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. Определены классы опасности используемых гидрометеорологических характеристик в различных районах Ленинградской области.

Таблица 3.2 – Нормирование значений гидрометеорологических характеристик для установления класса опасности воздействия на объекты жилищно-коммунального хозяйства, промышленности и транспортной инфраструктуры

Максимальные за месяц скорости ветра (код WVM) ***Оценка класса опасности***				
10–13 м/с	14–17 м/с	18–21 м/с	22–25 м/с	Более 25 м/с
I – низкий	II – умеренный	III –значительный	IV – весьма опасный	V – чрезвычайно-опасный
Максимальные атмосферные осадки за 1 сутки (код PTM) ***Оценка класса опасности***				
10–20 мм/сутки	21–30 мм/сутки	31–40 мм/сутки	41–50 мм/сутки	Более 50 мм/сутки
I – низкий	II – умеренный	III –значительный	IV – весьма опасный	V – чрезвычайно-опасный

Продолжение Таблицы 3.2

Средняя температура воздуха за зиму, (код TaW) ***Оценка класса опасности***				
+1 – -5 ºС	-6 – -10 ºС	-11 – -15 ºС	-16 – - 20 ºС	Более - 20 ºС
I – низкий	II – умеренный	III –значительный	IV – весьма опасный	V – чрезвычайно - опасный
Средняя температура воздуха за лето, ºС **(код TaS)** ***Оценка класса опасности***				
15 – 18, ºС	19 – 22, ºС	23–26, ºС	27–30, ºС	Более 30, ºС
низкий	умеренный	значительный	IV – весьма опасный	V – чрезвычайно - опасный

Распределение по классам опасности значений характеристик WVN, РТМ выполнено за все 12 месяцев с 1980 по 2020 гг. Для характеристик TaW, TaS – использовались средние значения температур воздуха соответственно за 3 зимних и 3 летних месяца. Например, для Санкт-Петербурга за данный период значения максимальной за месяц скорости ветра (WVM) соответствующие классу V (чрезвычайно-опасный, более 25 м/с) наблюдались 5 раз – в сентябре 1983 г. (26 м/с), в январе 1984 г. (30 м/с), в апреле 1985 г. (28 м/с), в сентябре 1985 г. (26 м/с), в декабре 1995 г. (26 м/с).

3.1 Изменение положения береговой линии в акватории восточной части Финского залива по результатам дешифрования спутниковых снимков

Геологическое строение прибрежной зоны восточной части Финского залива характеризуется четвертичными отложениями с обнажениями коренных пород на берегах, подводными склонами и поднятиями. Поздневалдайские ледниково-моренные образования под четвертичными отложениями содержат флювиогляциальные и озерные отложения. Голоценовые отложения делятся на два слоя: глинисто-алевролиты в слое

озера Анцил и песчаные отложения в морском слое. Прибрежная зона выше и ниже уровня моря покрыта песчаными отложениями, образовавшимися в результате воздействия волн [42].

Побережье в восточной части Финского залива состоит из террасообразных равнин, образовавшиеся в ледниковый (террасы более высокие - до 100м, сформированные при стремительном изменении уровня воды приледникового бассейна) и послеледниковый периоды (низкие аккумулятивные террасы до 45м) [42].

В северной части Финского залива побережье Выборгского залива сформировано субаэральными и тектоническими процессами при минимальном влиянии моря, в то время как другие берега Финского залива сформированы в основном в результате волновых процессов, различного типа: выравнивающиеся абразионно-аккумулятивные бухтовые, абразионные и аккумулятивные и т.д. Берега восточной части Невской губы сильно изменены в результате антропогенной деятельности и относятся к категории техногенных. Морфогенетическая классификация побережий в акватории Финского залива, предложенная Ионин А. С., Каплин П. А., Медведев В. С. [43], в исполнении Рябчук Д. В., Нестерова Е. Н., Сергеев А. Ю. [42], представлена в приложении А на рисунке А.1, условные обозначения в таблице А.1.

На побережьях Финского залива преобладают эоловые формы рельефа в виде дюн. Развевание и выдувание рыхлого песчано-алевритового материала, корразия пляжных валунов, разрушение горной породы под воздействием ветра переносит и обтачивает оторванные частицы, формируя рельеф береговой линии (процесс дефляции и аккумуляции эоловых отложений). Хорошо промытый, однородный песчаный материал, без связующих включений со слегка закруглёнными углами и рёбрами, подвержен перемещению и разрушению. Дефляция переносит песчаный материал, обнажая корни и нарушая устойчивость древесной растительности, формируются участки обреченного древостоя. Процесс аккумуляции –

вторичный, часто сопровождает дефляцию или абразию, но может происходить независимо и интенсивно в районах с дюнами, эоловыми насыпями, характеризуется высокими отложениями глины, что приводит к заболачиванию прибрежных районов [44].

Береговая абразия и аккумуляция являются противоположными процессами. Абразия включает в себя эрозию горных пород, образуя уступы, в то время как аккумуляция создает песчаные пляжи. На эти процессы влияют геологическое строение, объемы отложений (насосов) и рельеф прибрежного дна, в результате чего образуются участки основных подтипов на побережьях восточной части Финского залива: абразивно-моренные, аккумулятивно-абразивные, и аккумулятивные [44].

Прибрежная зона восточной части Финского залива формируется в результате постоянно меняющихся гидрометеорологических условий и экстремальных явлений, а также подвержена антропогенному воздействию, в результате которого естественные берега часто заменяются искусственными, что приводит к заметному сокращению ширины пляжей [44].

В ходе данной работы были исследованы и проанализированы спутниковые снимки Landsat в различные периоды на 6 участках. В открытой части Финского залива в Выборгском районе Ленинградской области у г. Приморск, в г. Сосновый бор Сосновоборского городского округа Ленинградской области, а также в Курортном районе Санкт-Петербурге на побережье памятника природы «Комаровский берег» и вблизи пос. Репино, в Кронштадском районе на побережьях заказника «Западный Котлин». И на побережье Невской губы в Петродворцовом районе на побережье дворцово-паркового ансамбля парка «Александрия». На рисунке 3.10 представлена схема исследуемых участков относительно акватории Финского залива.

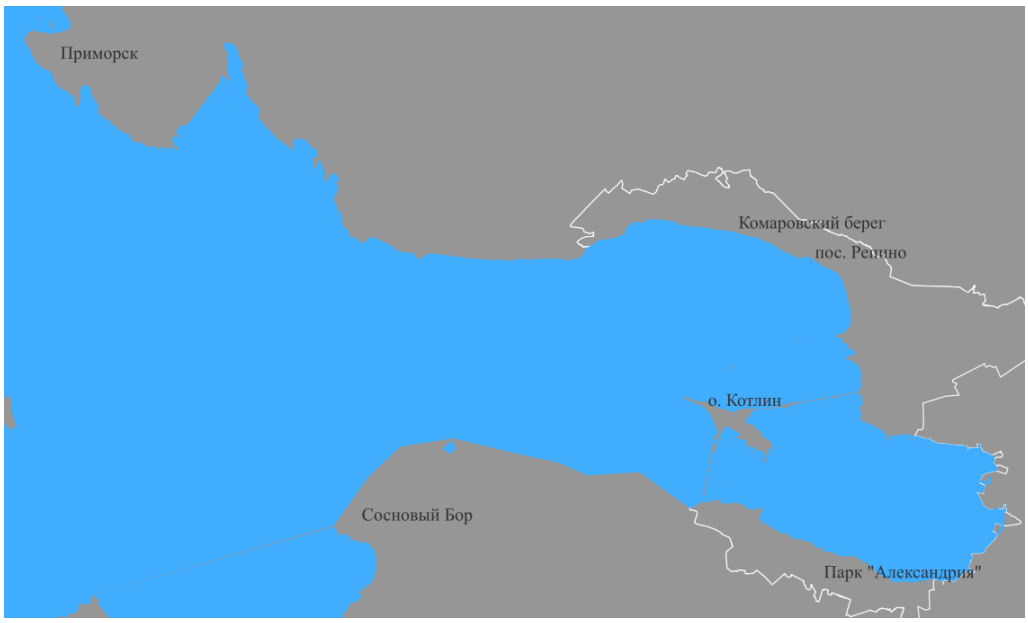


Рисунок 3.10 – Расположение исследуемых участков

На рекреационно ценных участках, таких как Курортный район Санкт-Петербурга, южное побережье Невской губы и восточной части Финского залива ежегодно наблюдаются процессы абразии и изменения положения береговой линии. На рисунке 3.11 изображено положение береговой линии на территории Ленинградской области у г. Приморск в различные периоды: в 2002гг., в 2010гг. и в 2022гг

Береговая линия вблизи г. Приморска состоит из различных участков с абразивными валунами и песчаными берегами. Песчаные пляжи шириной 20-30 м состоят из крупнозернистого и среднезернистого песка, валов из гальки и гравия и крутого прибрежного склона.

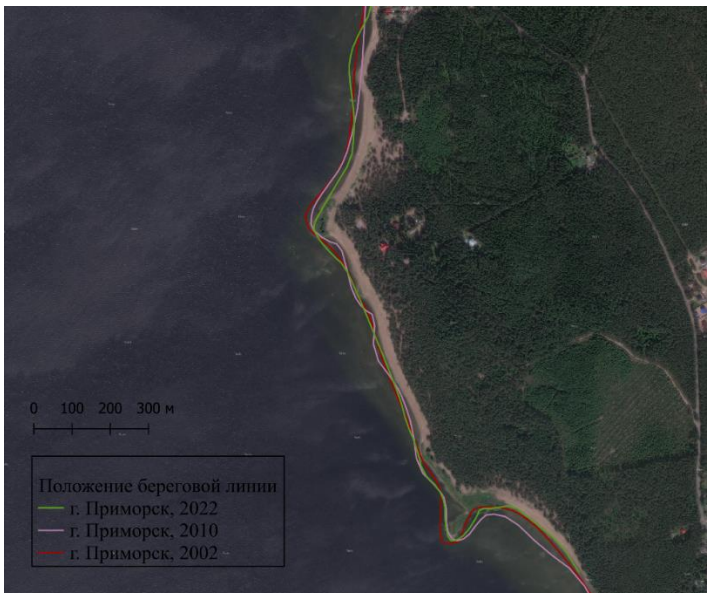


Рисунок 3.11 – Положение береговой линии на территории у г. Приморск в различные периоды: в 2002гг., в 2010гг. и в 2022гг.

Для данного побережья не характерно интенсивное изменение береговой линии, поскольку энергия волн утихает за счёт архипелага Березовских островов. На рисунке 3.12 представлена схема изменения положения береговой зоны. Береговая линия у г. Приморска в период с 2002 по 2023 гг. отступила от 2 до 23 м в различных участках, наблюдаются локальные зоны выдвижения берега.

Рисунок 3.12 - Схема изменения положения береговой зоны на территории у г. Приморск в период с 2002 по 2023 гг.

На рисунке 3.13 представлена динамика положение береговой линии в различные периоды в г. Сосновый Бор.

Рисунок 3.13 – Положение береговой линии на территории у г. Сосновый Бор в различные периоды: в 2002гг., в 2009гг. и в 2023гг.

Побережье в г. Сосновый бор относится к типу песчаный аккумулятивный, сложенный хорошо сортированным мелкозернистым песком, шириной до 70м. К юго-западу на территории Атомной электростанции берега техногенного типа за исключением небольших участков, которые относятся к естественным. На рисунке 3.14 представлена схема изменения положения береговой зоны.

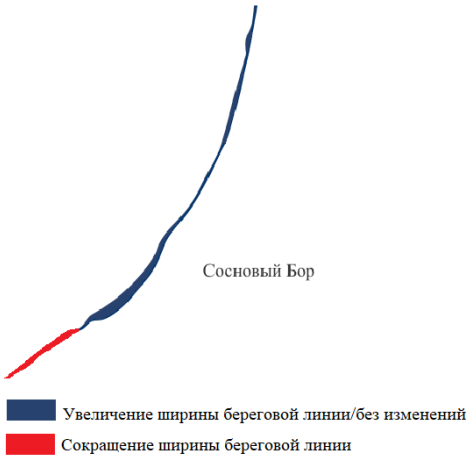


Рисунок 3.14 - Схема изменения положения береговой зоны на территории г. Сосновый Бор в период с 2002 по 2023 гг.

На участке побережья у г. Сосновый бор наблюдается процесс аккумуляции, максимальный прирост береговой линии составил 18м, но также наблюдается участок сокращение ширины пляжа.

Берега Курортного района Санкт-Петербурга относится к подруппе выравнивающихся с песчаными пляжами в вогнутостях берега. На рисунке 3.15 показано положение береговой линии в периоды с 2001 по 2024 гг. у памятника природы «Комаровский берег».

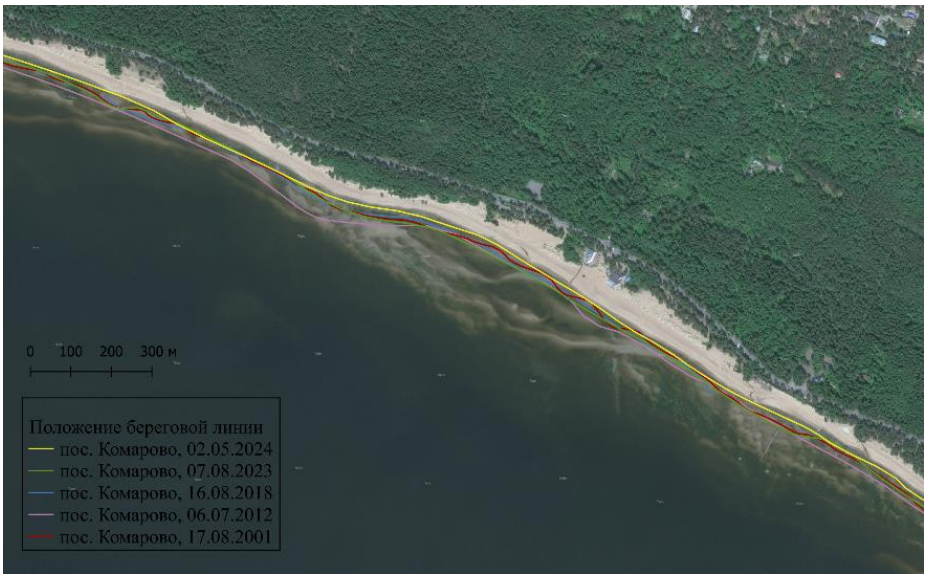


Рисунок 3.15 – Положение береговой линии на территории памятника «Комаровский берег» в различные периоды

У пос. Комарово песчаные пляжи имеют ширину до 30-40 м, с сформированными дюнами. Летном происходит образование временных песчаных аккумулятивных форм рельефа, а осенью происходит размыв, в том числе и по всей ширине пляжа, вплоть до авандюны. Геологическое строение прибрежной линии и определенные свойства слагающих ее отложений В Курортном районе Санкт-Петербурга климат способствует развитию абразионных процессов. В период с 2001 по 2012гг. (рисунок 3.16) отступление береговой линии (около 18 м) наблюдается на некоторых небольших участках. С 2011 года значительное воздействие штормовых нагонов оказывает Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от

наводнений. В целом увеличение ширины пляжа на территории заказника «Комаровский берег» составило от 7 до 10 м.

Рисунок 3.16 - Положение береговой линии на территории памятника природы «Комаровский берег» в период с 2001 по 2012гг.

В период с 2012 по 2018гг. (рисунок 3.17) произошло значительное изменение положения береговой линии: ширина пляжа сократилась в среднем на 10-13м, максимум - 23м. В эти года наблюдалось повышение рекреационной нагрузки в целом на территорию Курортного района Санкт-Петербурга, участившиеся случаи штормовых явлений и закрытие затворов Комплекс защитных сооружений, и как следствие - активизация абразионных процессов и интенсивный размывы побережья. Большое количество объектов инфраструктуры и берегозищитных сооружений нуждаются в восстановлении.

Рисунок 3.17 - Положение береговой линии на территории памятника природы «Комаровский берег» с 2012 по 2018гг.

В период с 2018 по 2023гг. (рисунок 3.18) остаётся актуальной проблема размыва береговой линии Курортного района Санкт-Петербурга.

Рисунок 3.18 - Положение береговой линии на территории памятника природы «Комаровский берег» в период с 2018 по 2023гг.

Сокращение ширины пляжа на территории заказника «Комаровский берег» в этот период составила до 19м.

На рисунке 3.19 изображена схема изменения положения береговой линии на территории памятника природы «Комаровский берег» в пос. Комарово в период с 2012 по 2024 гг.

Рисунок 3.19 - Схема изменения положения береговой зоны на территории заказника «Комаровский берег» в период с 2012 по 2024 гг.

Наибольшим изменения подверглось побережье Курортного района. На поверхности прибрежного мелководья произошло смещение береговых валов в сторону суши. На всём исследуемом участке наблюдается размыв территории. У пос. Комарово с 2012 года в среднем ширина пляжа сократилась на 28 м, максимальная убыль наблюдается в 39 м в центральной части исследуемого участка. В среднем динамику береговой линии можно оценить, как 2-3 м/год.

Положение береговой линии в периоды с 2001 по 2024 гг. у пос. Репино представлено на рисунке 3.20, где отмечается изменения ширины пляжа.

Рисунок 3.20 – Положение береговой линии на территории пос. Репино Курортного района Санкт-Петербурга в период с 2001 по 2024гг.

На территории пос. Репино Курортного района Санкт-Петербурга с 2001 по 2012гг. (рисунок 3.21) наблюдается значительное изменение положения и размыв береговой линии. При штормах и наводнениях происходит нарушение характеристик компонентов геологической среды побережий и определенный ущерб берегозащитным сооружениям Курортного района в пос. Репино, которые находятся в аварийном состоянии.

Рисунок 3.21 – Положение береговой линии на территории пос. Репино Курортного района Санкт-Петербурга в период с 2001 по 2012гг.

В период 2012-2018 гг. (рисунок 3.22) произошло увеличение ширины пляжа в вогнутой части у пос. Репино Курортного района Санкт-Петербурга. В предыдущий период на данном участке наблюдалась тенденция к сокращению.

Рисунок 3.22 – Положение береговой линии на территории пос. Репино Курортного района Санкт-Петербурга в период с 2012 по 2018гг.

Берегозащитные сооружения в береговой зоне Курортного района малоэффективны и даже оказывают негативное воздействие. Также как на территории государственного природного заказника «Комаровский берег», на территории пос. Репино зафиксирована трансформация береговой линии, и ожидаемые последствия в виде размыва устойчивых форм рельефа и повреждение береговой инфраструктуры.

В 2015 г. после очередного воздействия штормовых явлений в Курортном районе была выявлена необходимость принятия научно-обоснованных мер по защите и укреплению прибрежной зоны.

На рисунке 3.23 отображено положение береговой линии на территории пос. Репино Курортного района Санкт-Петербурга с 2018 по 2023гг.

Рисунок 3.23 – Положение береговой линии на территории пос. Репино Курортного района Санкт-Петербурга в период с 2018 по 2023гг.

На рисунке 3.24 изображена обобщенная схема изменения положения береговой линии территории пос. Репино Курортного района Санкт-Петербурга.

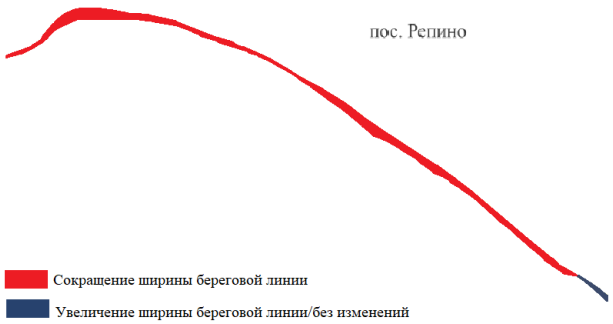


Рисунок 3.24 - Схема изменения положения береговой зоны на территории пос. Репино Курортного района Санкт-Петербурга в период с 2012 по 2024 гг.

Как и для побережья у пос. Комарово, на территории пос. Репино Курортного района Санкт-Петербурга наблюдается общая тенденция к сокращению площади пляжа: в среднем береговая линия ушла на 20 м, максимальная – на 32 м. Некоторые сооружения по берегозащите (так

называемые - «жёсткие», например, стены из бетона или камня), применяемые на данном участке, приводят к постепенной деградации и размыву песчаного материала.

После ввода в эксплуатацию Комплекса защитных сооружений (КЗС) в 2011г. значительно увеличился подъём воды в открытой части акватории во время штормовых явлений, которое повлекло интенсивную абразию береговой линии, в том числе и в Курортном районе Санкт-Петербурга. Критический подъём уровня акватории Финского залива в сочетании с штормовыми ветрами западного направления размывает авандюны и безвозвратно выносит песчаный материал из береговой зоны Курортного района Санкт-Петербурга. Также, процессы дефляции, преобладающие на данных участках, способствуют размыву песка у корневых систем древесной растительности, образуются зоны «обреченного древостоя», которые представляют угрозу для населения. Разрушаются объекты инфраструктуры, сокращается площадь рекреационно-ценных участков. Концепция по защите прибрежных территорий Курортного района, основанная на искусственном «наращивание» пляжа и возведение волноломов, бун и других пляжеудерживающих сооружений так и не была реализована. Прекращена и оценка состояния береговой линии и динамики развития разрушающих процессов в рамках мониторинга состояния недр прибрежно-шельфовых зон.

Побережья о. Котлин аналогично побережьям Курортного района подвергают разрушению. На территории заказника «Западный Котлин» размытию подвергается как южное, так и северное побережье (рисунок 3.25).

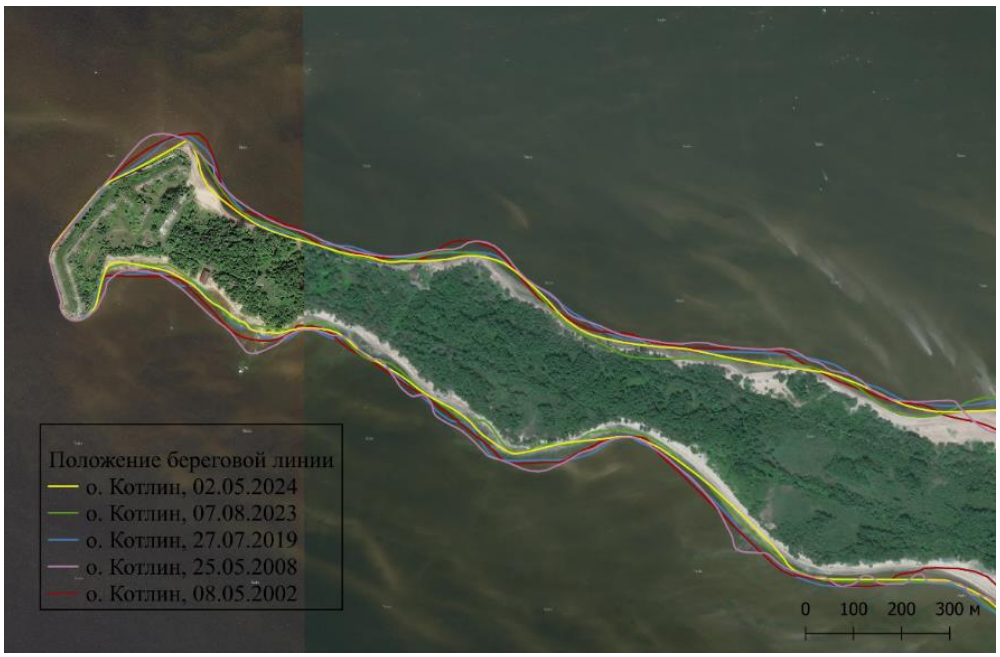


Рисунок 3.25 – Положение береговой линии на территории заказника «Западный Котлин» с 2002 по 2024гг.

На рисунках 3.26 – 3.28 представлена динамика береговой линии на территории государственного природного заказника «Западный Котлин».

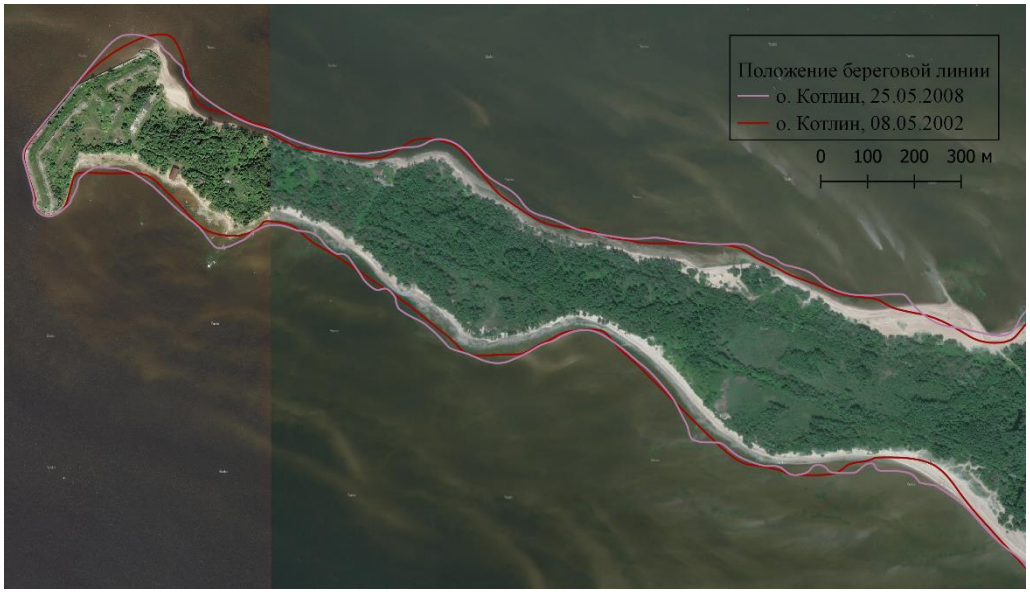


Рисунок 3.26 - Положение береговой линии на территории заказника «Западный Котлин» в период с 2002 по 2008гг.

Рисунок 3.27 - Положение береговой линии на территории заказника «Западный Котлин» в период с 2008 по 2019гг.

Рисунок 3.28 - Положение береговой линии на территории заказника «Западный Котлин» в период с 2019 по 2023гг.

Площадь заказника динамична и постоянно меняется из-за размыва или аккумуляции происходящих на прибрежных участках во время штормовых явлений. На северном побережье происходит увеличение ширины пляжа (до

80-90м), в то время как на южном побережье происходит перемещение береговой линии в сторону суши, и вероятней всего, накопление материала ближе к центру острова. Такие изменения на южном побережье могут привести к тому, что древесная растительность, находящаяся непосредственно у линии пляжа, ослабнет, а травянистый покров накроет песком.

На рисунке 3.29 изображена схема изменения положения прибрежной линии за три периода: с 2002 по 2009гг., с 2009 по 2018гг., с 2018 по 2024гг.

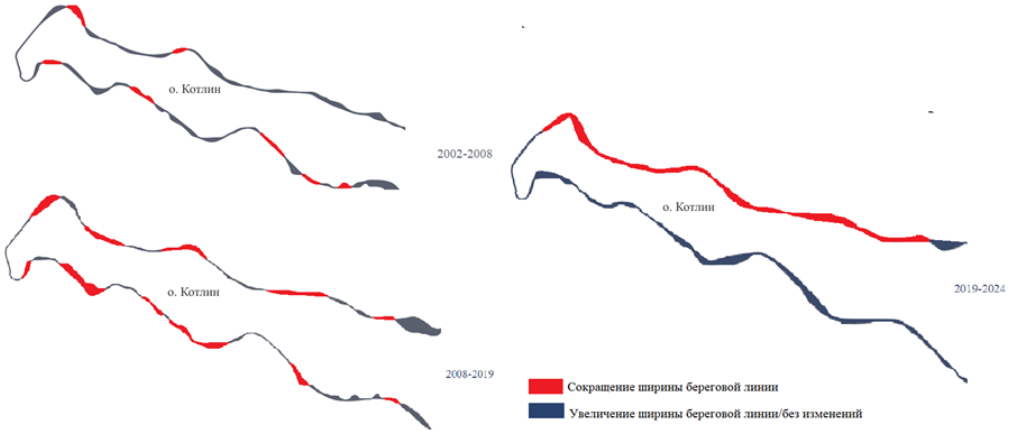


Рисунок 3.29 - Схема изменения положения береговой зоны на территории заказника «Западный Котлин» в периоды с 2002 по 2008гг., с 2008 по 2019гг, с 2019 по 2024 гг.

На южном побережье о. Котлин за период с 2019 по 2024 г. отмечено перемещение береговой линии преимущественно в сторону увеличения. На северном побережье о. Котлин за тот же период наблюдается разнонаправленное сокращение. Не исключено, что процессы могут происходить в относительно спокойные периоды (без штормов).

Побережья Невской губы в целом менее подвержены разрушению береговой линии, поскольку это достаточное ограниченная акватория и за счёт малых глубин с менее интенсивным волновым движением, а также в следствие менее выраженных результирующих перемещений насосов

(вдольбереговых потоков). Процессу абразии препятствуют и гидрофиты, которые закрепляют склоны своей корневой системой и предотвращают сползание грунта. От сильного штормового воздействия на побережья Невской губы помогают створы комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС) [44].

На рисунке 3.30 изображено положение береговой линии в дворцово-парковом ансамбле парка «Александрия».

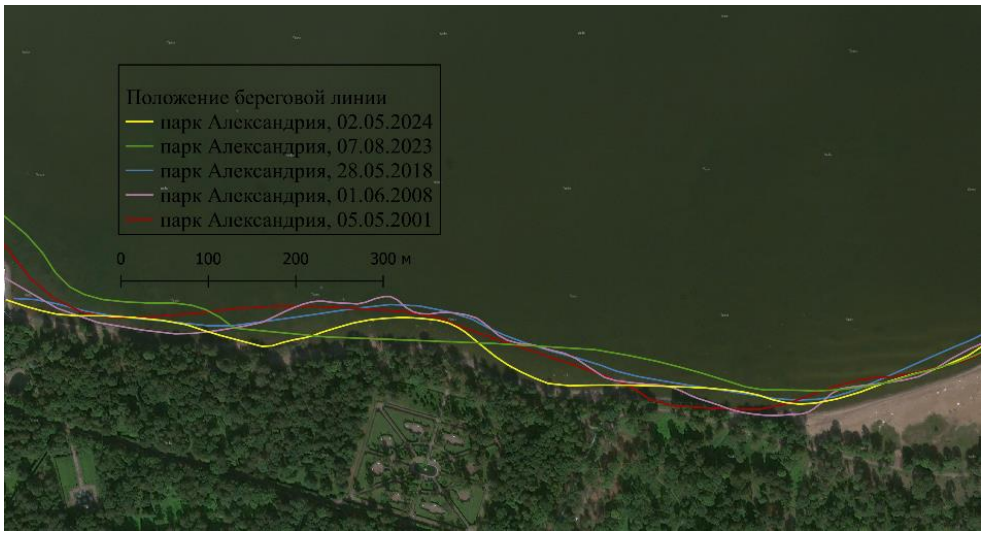


Рисунок 3.30 – Положение береговой линии на территории парка «Александрия» в период с 2001 по 2024гг.

Данный участок имеет аккумулятивно-илистые берега с зарастанием подводного берегового склона гидрофитами. На рисунке 3.31 изображена схема изменения положения прибрежной линии у парка «Александрия» в 2008-2024 гг. Сокращение береговой линии составило до 17 м в период с 2008г.

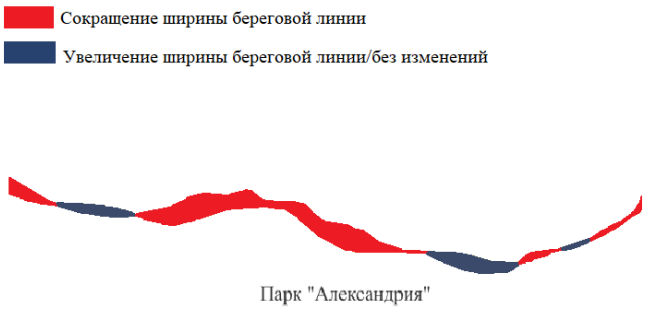


Рисунок 3.31 - Схема изменения положения береговой зоны на территории парка «Александрия» в период 2008-2024 гг.

Размыв береговой линии в восточной части Финского залива, по мнению специалистов из Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А. П. Карпинского (ФГБУ «ВСЕГЕИ»), происходит в результате значительных повышений уровня моря (более 200 см выше Кронштадтского футштока), штормовых явлений, с преобладанием ветров западных направлений (более 20 м/с) и при отсутствии ледового покрова [45].

Естественные процессы поступления, образования, аккумуляции насосов и другие литодинамические процессы носят сезонный характер. Однако, в последнее время происходит усиление циклонических процессов, увеличение повторяемости штормовых явлений, а также изменение климата и общая тенденция повышения температуры в ноябре-декабре, приводит к более позднему периоду формированию ледового покрова в акватории Финского залива. В совокупности эти факторы приводят к катастрофичным последствиям не только для побережий в Финском заливе, но и в целом для Балтийского моря.

Согласно докладу об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2022 году [44], количество экстремальных штормов, сопровождающихся наводнениями увеличилось: с 2005 по 2021 гг. наблюдалось 14 экстремальных штормов, в сравнении с периодом до 1980-х гг., шторма происходили с частотой, в среднем, один раз в 25 лет. В последнее время

шторма приходились на осенне-зимний период: шторм в 2005 г., в октябре 2006 г, в январе 2007 г., в ноябре и декабре 2011 г., в октябре, ноябре и декабре 2013 г., в январе и декабре 2015 г., в январе и сентябре 2018 г., в декабре 2019 г. в октябре 2021 г., в октябре 2022 г., и), сопровождавшихся значительными размывами берегов [44].

Экстремальные шторма наносят колоссальный ущерб в виде разрушения береговой линии и устойчивых формы рельефа (уступы и авандюны), Финского залива, а также приводят к ветровалам древесной растительности и разрушению объектов инженерной и прибрежной инфраструктуры.

К антропогенным факторам, приводящие к абразии относят добычу песка, строительство гидротехнических сооружений и отсутствие современных эффективных сооружений берегозащиты. Строительство портов и благоустройство набережных в г. Санкт-Петербурге и Ленинградской области активно разрушают естественную береговую линию [46].

Наиболее интенсивная эрозия наблюдается в районах с развитой инфраструктурой и рекреационным потенциалом, таких как Репино и Комарово. Песчаные пляжи сокращаются, снижается рекреационная ценность территории, а участки нарастающего берега крайне ограничены.

Для минимизаций последствий штормовых явлений и разрушения береговой линии необходимо предпринимать соответствующие меры: своевременно проводить проектно-изыскательские работы на аварийных участках, создавать эколого-геологические и инженерно-геологические основы, осуществлять мероприятия по берегозащите с учётом всех факторов, а также осуществлять мониторинг эффективности сооружений, выполнять оценку ущерба различных сфер. Проводимые берегозащитные мероприятия носят локальный характер и не способны решить проблему устойчивости береговой системы в целом. Морфодинамические изменения, вызванные укреплением берегов в одних местах и естественными нарушениям в других,

усложняют выбор стратегии мероприятий по берегозащите. В условиях изменяющего климата задача по снижению негативных последствий опасных экзогенных процессов может быть реализована только в рамках разработки единой программы берегозащиты на региональном или федеральном уровне. Что касается непосредственно самой технологии, то эффективным является создание искусственных пляжей в комплексе с пляжеудерживающими сооружениями. Особое внимание должно быть обращено на ориентировку берегозащитных сооружений на подводном береговом склоне для согласования их направления с особенностями поперечного и вдольберегового потока наносов [47].

3.2 Результаты натурных наблюдений-за состоянием древостоя

Под воздействие сильных штормовых ветров на прибрежных участках образуется скопление древесной растительности, которая в результате различных эрозионных процессов, например, при вывевание песка у подножья древостоя в совокупности с обильными осадками, засыхает и/или имеет другие повреждения, представляет угрозу не только для населения и отдельных объектов инфраструктуры, но и для ухудшения общей экологической обстановки на территории за счёт снижения количества зелёных насаждений.

В осенне-весенний период 2023/2024 года было проведено натурное обследование прибрежных территорий восточной части Финского залива. Выбор расположения данных учётных площадок, размером 20 на 30 м, определялся близостью к особо-охраняемым природным территориям и объектам культурно - исторического значения: в акватории Невской губы на побережьях в Парке «Александрия» и на территории заказника «Южное побережье Невской губы», а также на побережьях Финского залива: на о. Котлин (территория заказника), у пос. Комарово (территория памятника природы «Комаровский берег») и в пос. Репино Курортного района г. Санкт-

Петербург. На рисунке 3.32 показано местоположение выбранных участков для исследования относительно вод Балтийского моря.

Методическую основу исследования составляют распоряжения Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга, которыми в 2021 г. утверждена методика оценки экологического состояния зеленых насаждений и нормативы качества зеленых насаждений Санкт-Петербурга [38].

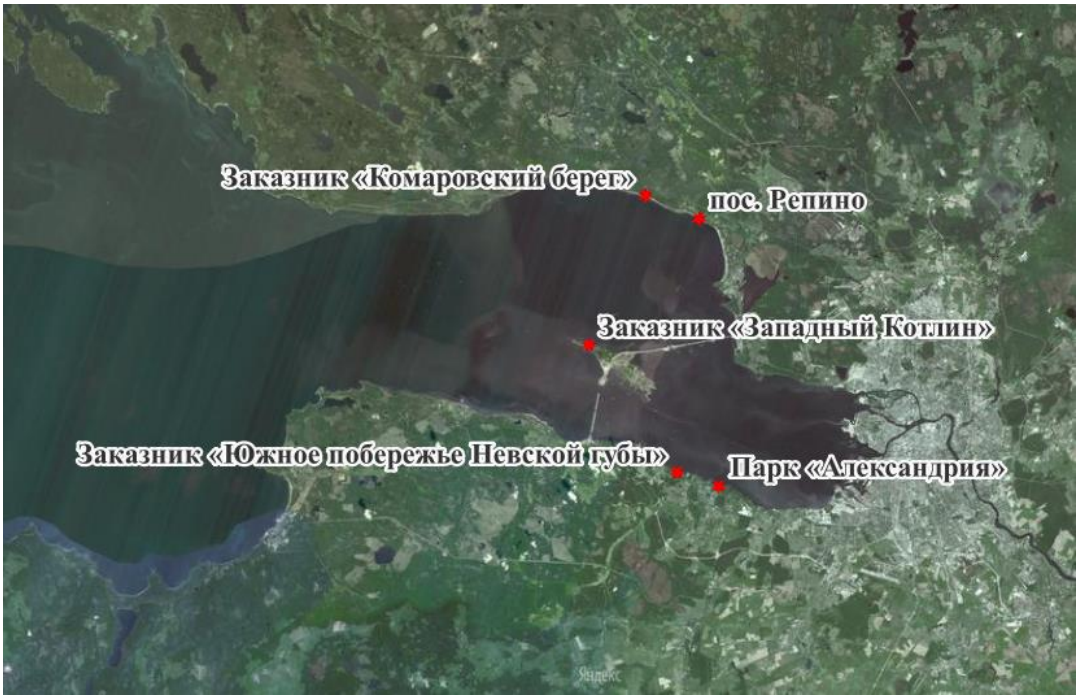


Рисунок 3.32 – Местоположение площадок для исследования за состоянием древостоя в акватории Финского залива и Невской губы

Пробные площадки были выбраны на особо охраняемых природных территориях не случайно: одной из важнейших задач создания комфортных условий для населения является сохранение и защита древостоя на территориях ООПТ, в парках и зонах рекреации Санкт-Петербурга, а также в его окрестностях.

На рисунках 3.33–3.37 схематично показаны места расположения площадок наблюдения за состоянием древесной растительности под влиянием ветрового воздействия и штормовых эффектов в близи побережий

Невской губы.

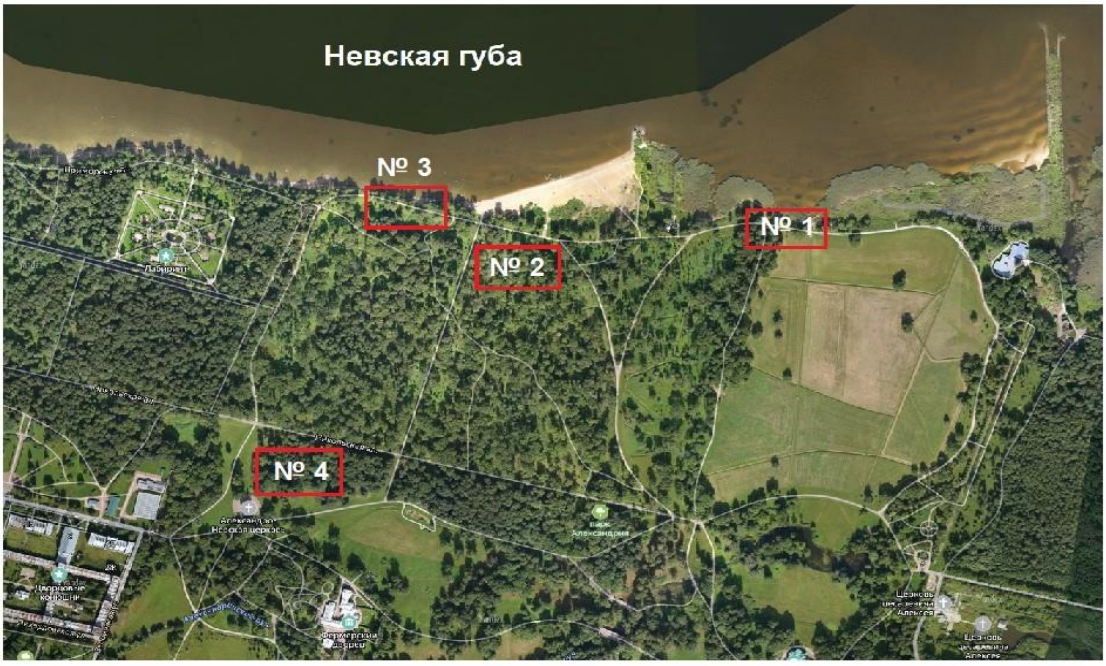


Рисунок 3.33 - Схематичное расположение площадок наблюдения за состоянием древостоя на территории парка «Александрия» (Петродворцовый район, музей-заповедник «Петергоф») на южном побережье Невской губы

Рисунок 3.34 - Схематичное расположение площадок наблюдения за состоянием древостоя на территории заказника «Южное побережье Невской

губы»

Рисунок 3.35 - Схематичное расположение площадок наблюдения за состоянием древостоя на территории о. Котлин (природный заказник «Западный Котлин»)

Рисунок 3.36 - Схематичное расположение площадок наблюдения за состоянием древостоя на территории заказника «Комаровский берег» в Курортном районе Санкт-Петербурга на северном побережье Финского

залива

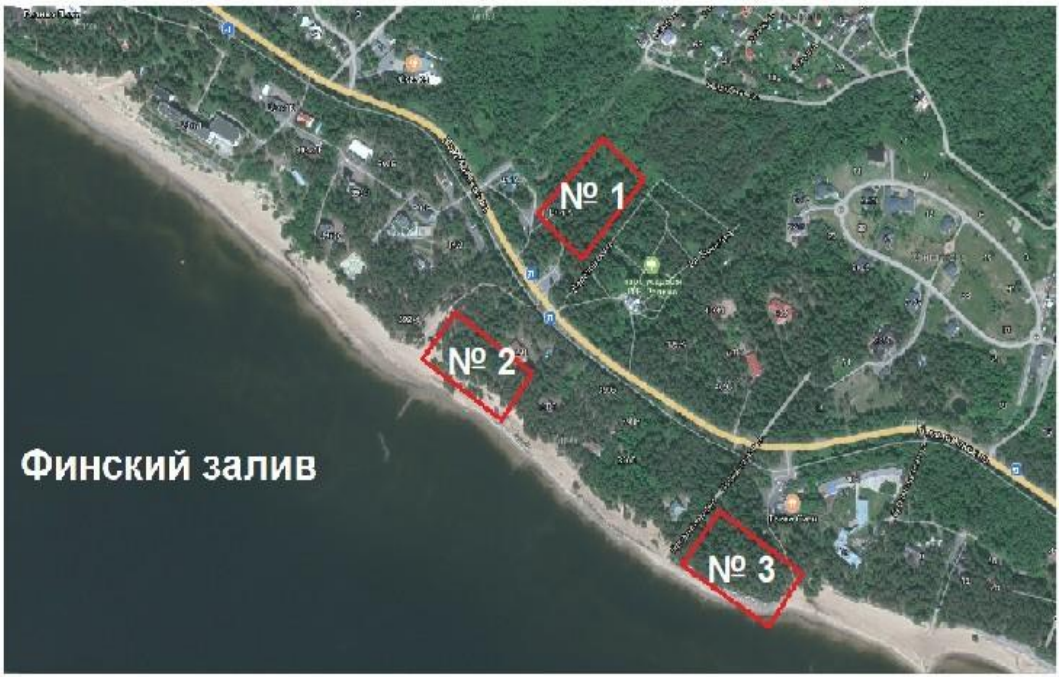


Рисунок 3.37 – Схематичное расположение площадок наблюдения за состоянием древостоя на территории пос. Репино в Курортном районе Санкт-Петербурга на северном побережье Финского залива

В результате исследования выявлено, что большая часть древостоя на пробных учёных площадках (20 на 30м) относится к категории ослабленных. Однако к сильно ослабленным можно отнести древесную растительность в пределах точки № 1 натурных наблюдений - на территории парка «Александрия», точках № 2 и 3 - на территории заказника «Западный Котлин», и в точке № 3 - на территории памятника природы «Комаровский берег». Обнаруженная на площадках № 3 природного заказника «Южное побережье Невской губы» и № 4 территории парка «Александрия» древесная растительность без признаков ослабления. Основными выявленными повреждениями деревьев, позволяющие отнести их к категории «ослабленные» и «сильно ослабленные являются»: раздвоение боковых побегов (то есть двойная вершина), неравномерное распределение листвы и затенение кроны при недостатке солнечного света, влияющий на развитие и рост дерева, различные заболевания и процессы, приводящие к

усыханию ветвей и гниение в нижней части деревьев. Наибольше повреждения в результате воздействия штормов в береговой зоне – штормовой эрозии почвы и грунта выявлены для территории заказника «Западный Котлин», а также в пос. Репино, где наблюдается размыв грунта и участки обезлесения (то есть гибель деревьев) в прибрежных зонах. В таблицах 3.4 – 3.8 представлены некоторые полученные результаты полевых исследований.

Таблица 3.4 – Оценка состояния древесной растительности на территории парка «Александрия» (Петродворцовый район) по результатам натурного исследования

№ пробной площадки	Количество особей обнаруженных деревьев	Количество видов деревьев	Количество особей деревьев с патологиями развития и механическими повреждениями	Средний балл состояния древостоя
1	16	3	14	3 (сильно ослабленные)
2	25	6	12	2 (ослабленные)
3	18	5	9	2 (ослабленные)
4	28	8	4	1 (без признаков ослабления)

Таблица 3.5 – Оценка состояния древесной растительности на территории заказника «Западный Котлин» по результатам натурного исследования

№ пробной площадки	Количество особей обнаруженных деревьев	Количество видов деревьев	Количество особей деревьев с патологиями развития и механическими повреждениями	Средний балл состояния древостоя
1	16	6	10	2 (ослабленные)

2	14	5	12	3 (сильно ослабленные)

Таблица 3.6 – Оценки состояния древесной растительности на территории памятника природы «Комаровский берег» в Курортном районе Санкт-Петербурга по результатам натурного исследования

№ пробной площадки	Количество особей обнаруженных деревьев	Количество видов деревьев	Количество особей деревьев с патологиями развития и механическими повреждениями	Средний балл состояния древостоя
1	20	5	10	2 (ослабленные)
2	12	4	10	(сильно ослабленные)
3	13	3	9	(сильно ослабленные)

Таблица 3.7 – Оценка состояния древесной растительности на территории пос. Репино (Курортный район Санкт-Петербурга) по результатам натурного исследования

№ пробной площадки	Количество особей обнаруженных деревьев	Количество видов деревьев	Количество особей деревьев с патологиями развития и механическими повреждениями	Средний балл состояния древостоя
1	18	6	10	2 (ослабленные)
2	13	4	10	(сильно ослабленные)
3	9	3	7	(сильно ослабленные)

Таблица 3.8 –Оценка состояния древесной растительности на территории заказника «Южное побережье Невской губы» по результатам натурного исследования

№ пробной площадки	Количество особей обнаруженных деревьев	Количество видов деревьев	Количество особей деревьев с патологиями развития и механическими повреждениями	Средний балл состояния древостоя
1	12	5	7	2 (ослабленные)
2	13	6	8	2 (ослабленные)
3	26	10	3	1 (без признаков ослабления)

Когда давление силы ветра, оказываемое на ствол, превосходит силу сцепления корней с почвой, происходит выворот дерева из почвы вместе с корневой системой. Опасность возникновения ветровала зависит от таких факторов, как характер ветра, морфологические признаки и биологические особенности древесной породы, а также от типа почвы, состава, возраста и формы древостоя. Наиболее подвержены ветровалу растительность с поверхностной корневой системой, растущие на избыточно влажных почвах или почвах с близким залеганием плотной почвообразующей породы, а также крупные старовозрастные, одиночно стоящие деревья. При сильных штормовых ветрах на береговых линиях древесная растительность вываливаются вместе с корнем и поверхностным слоем дерна. На месте их корневищ образуются мелководья, а береговая линия постепенно расширяется. Такие процессы характеризуют постепенное изменение береговых линий.

Наглядно проявление негативного ветрового воздействия приводящие к ветровалу обнаружено на песчаных почвах на учетной площадке № 1 в районе природного заказника «Комаровский берег» в отношении хвойной растительности, преимущественно соосен, обладающих поверхностной корневой системой. Также весьма страдает древесная и кустарниковая растительность от воздействия сильных ветров на территории заказника «Западный Котлин». Наименьшие эффекты ветровала и повреждения крон деревьев выявлены для южных районов Невской губы, где преобладают более плотные супесчаные и суглинистые почвы и лиственные породы деревьев с более развитой, чем у сосен, корневой системой, а именно эффекты ветровала и повреждения крон практически не обнаружены на учетных площадках № 2 и № 4 в парке «Александрия», на площадке № 3 природного заказника «Южное побережье Невской губы».

На нескольких учётных площадках были обнаружены формы древесной растительности, имеющие следы вандализма: на территории природного заказника «Западный Котлин», в пос. Репино.

На рисунках 3.38 – 3.43 представлены иллюстрации некоторых выявленных разрушений в состоянии древесной растительности под влиянием сильных ветром и штормовых воздействий в прибережной зоне.

Рисунок 3.38 – Иллюстрация ветрового повреждения деревьев (ветровала) на

учетной площадке № 1 на территории заказника «Комаровский берег»

Рисунок 3.39 – Иллюстрация штормового повреждения деревьев на учетной площадке № 2 в береговой зоне около пос. Репино

Рисунок 3.40 - Иллюстрация штормового повреждения деревьев на учетной площадке № 2 в береговой зоне заказника «Западный Котлин»

Рисунок 3.41 - Иллюстрация штормового повреждения деревьев (подтопления) на учетной площадке № 1 в береговой зоне парка «Александрия» (музей-заповедник «Петергоф»)

Рисунок 3.42 - Иллюстрация штормового повреждения верхней части кроны деревьев на учетной площадке № 3 в береговой зоне парка «Александрия» (музей-заповедник «Петергоф»)

Рисунок 3.43 - Замеры величин воздействия штормовых волн на береговую зону пляжа парка «Александрия» вблизи учетной площадки № 2. Пляж затапливается на расстояние от текущего уреза воды от 12 до 18 м

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существенные климатические изменения наблюдаются повсеместно, в том числе в регионе Балтийского моря. Увеличение повторяемости и проявления опасных явлений погоды представляет угрозу природным экосистемам и безопасности населения. Штормовые ветра и подъём уровня моря наносят непоправимый ущерб для побережий: меняется положение береговой линии, разрушаются устойчивые формы рельефа, происходят ветровалы.

Процессы абразии береговой линии во многом зависят от геологического строения и морфогенетического типа, особенностей рельефа и гидрометеорологических характеристик. В акватории Финского залива в пределах Санкт-Петербурга и Ленинградской области процессы, происходящие на побережьях, происходят неравномерно: на южном побережье в Петродворцовом районе абразия менее интенсивна, чем в северной части в Курортном и Кронштадтском районах, берега которых относятся к абразионному и аккумулятивно-абразионному типу, сложенных из легкоразмываемых подвижных пескоы. Такие различия обусловлены распространением водной прибрежной растительности в мелководье Невской губы и Комплексом защитных сооружений, которые препятствуют сильному воздействию штормовых явлений. Ежегодно происходит сокращение ширины пляжа, разрушение рельефа и другие изменения, которые не успевают самовосстановиться. Тем не менее, вся береговая линия акватории Финского залива в разной степени подвержена размыву, а берегозащитные сооружения потеряли свою эффективность и требуют модернизации. Особое внимание уделяется побережьям Курортного района Санкт-Петербурга и береговым линиям на территории заказника «Западный Котлин». Для предотвращения и минимизация последствий изменения климата необходимо принимать комплексные решения. Обоснованные практические рекомендации позволят повысить эффективность управления прибрежными

ООПТ, обеспечить сохранность и восстановление уникальных экосистем, природных объектов и объектов историко-культурного значения, рекреационных зон. Без вовремя принятых мер, в условиях изменения климата, увеличения числа штормовых явлений и сокращение периода становления ледового покрова, происходит сокращение рекреационных площадей, а также наносится вред прибрежным объектам инфраструктуры и благоустройства. Ущерб затрагивает социальную и экономическую сферу.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алесенков Ю.М., Мишин А.С., Успин А.А., Якушев А.Б. Влияние штормовых ветров на леса заповедников Урала // Экологические исследования в Висимском биосферном заповеднике: материалы конф. Екатеринбург, 2006. С. 41 – 47.

2. Дроздов В.В. Влияние колебаний климата на динамику экосистем Балтийского и Белого морей. Монография. – СПб.: РГГМУ. – 2015. – 235 с.

3. Лобанов В.А., Шадурский А.Е. Выделение зон климатического риска на территории России при современном изменении климата. Монография. СПб.: РГГМУ, 2013. – 123 с.

4. Национальный План мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 года [Электронный ресурс]. URL: http://static.government.ru/media/files/DzVPGlI7JgT7QYRoogphpW69KKQREGTB.pdf (дата обращения: 10.04.2024).

5. Маурин А.М., Никодемус О.Э., Раман К.К. Зеленые насаждения как индикатор качества городской среды // Проблемы качества городской среды. – М.: 1989 – С. 102 – 108.

6. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР [Текст]. Т. 3. Балтийское море / Под ред. Ф.С. Терзиева, В.А. Рожкова, А.И.Смирновой.Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Т. 3, вып. 1.– СПб.:Гидрометеоиздат, 1992.–447 с.

7. Большая российская энциклопедия. Балтийское море. [Электронный ресурс]. URL: https://bigenc.ru/c/baltiiskoe-more-669329 (дата обращения: 20.04.2024).

8. Национальный атлас России 2 том Балтийское море - [Электронный ресурс]. URL: https://xn--80aaaa1bhnclcci1cl5c4ep.xn--p1ai/cd2/245-248/245-248.html (дата обращения: 25.04.2024).

9. Team B. A. Assessment of climate change for the Baltic Sea basin. – Springer Science & Business Media, 2008.

10. Rutgersson A. et al. Observed changes and variability of atmospheric parameters in the Baltic Sea region during the last 200 years //Climate Research. – 2014. – Т. 61. – №. 2. – С. 177-190.

11. Летопись погоды. Погода и климат [Электронный ресурс]. URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history.php (дата обращения: 22.04.2024).

12. Ерёмина Т.Р., Исаев А.В., Рябченко В.А. Оценка и прогноз тенденций в эволюции экосистемы восточной части Финского залива при различных сценариях изменения биогенной нагрузки в будущем климате // Учен. зап. РГГМУ. 2014. №36. С. 118—127.

13. М.В. Емельянова. Исследование тенденций изменения годовой температуры воздуха на водосборе Балтийского моря // Водная среда: комплексный подход к изучению, охране и использованию. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 103-107

14. Dailidienė I. et al. Long term water level and surface temperature changes in the lagoons of the southern and eastern Baltic //Oceanologia. – 2011. – Т. 53. – С. 293-308.

15. Climate change in the Baltic Sea Area: HELCOM thematic assessment in 2013 // Baltic Sea Environment Proceedings. 2013. №137.

16. Весман А.В. Современные проблемы Балтийского моря // Современные научные исследования и инновации. 2012. № 3 [Электронный ресурс]. - URL: http://web.snauka.ru/issues/2012/03/10613 (дата обращения: 22.04.2024).

17. Earth Explorer // USGS [Электронный ресурс]. URL: https://earthexplorer.usgs.gov (дата обращения: 10.05.2024).

18. Александров С. В., Семенова А. С. ЭВТРОФИРОВАНИЕ ВОД И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗООПЛАНКТОНА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ АНОМАЛЬНОГО ПРОГРЕВА ВОД ЛЕТОМ 2021 г //Океанологические исследования. – 2023. – Т. 51. – №. 2. – С. 70-92

19. ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА МЕНЯЕТ ЭКОСИСТЕМУ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ [Электронный ресурс]. - URL:

https://finland.fi/ru/zhizn-i-obshhestvo/izmenenie-klimata-menyaet-ekosistemu-baltijskogo-morya (дата обращения: 23.04.2024).

20. Еремина Т. Р., Густоев Д. М., Цепелев В. Ю. Исследование долгопериодных изменений гидрометеорологических характеристик восточной части Финского залива в 1958-2009 гг //Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2022. – Т. 6. – №. 1. – С. 40-51.

21. Смирнов Н.П., Воробьев В.Н., Кочанов С.Ю. Северо-Атлантическое колебание и климат. СПб.: Изд-во РГГМУ, 1998. 122 с. Воробьев В.Н., Смирнов Н.П. Арктический антициклон и динамика климата Северной полярной области. СПб.: Изд. РГГМУ, 2003. 82 с.

22. Манжулей И. С., Куликова Л. А. СЕВЕРО-АТЛАНТИЧЕСКОЕ КОЛЕБАНИЕ И ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ОСАДКОВ ПО ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ //Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2016. – №. 43. – С. 148-153.

23. Стонт Ж. И., Ульянова М. О. Влияние штормовой активности на объекты морского наследия побережья Калининградской области // Моря России: исследования береговой и шельфовой зон. – 2020. – С. 477-479.

24. Соколов А. Н., Чубаренко Б. В. Временная изменчивость параметров ветровых волн в Балтийском море за период 1979-2018 годов по результатам численного моделирования // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36. № 4 (214). С. 383-395.

25. Куликов Е. А., Медведев И. П. Статистика экстремальных сгонно-нагонных явлений в Балтийском море // Океанология. – 2017. – Т. 57. – №. 6. – С. 858-870.

26. Чурин Д. А., Стонт Ж. И., Ульянова М. О. Влияние штормовых ситуаций на изменчивость уровня воды в Куршском заливе (Балтийское море) в 2019 г. // Балтийский морской форум. – 2019. – С. 408-415.

27. Ветер Единая система информации об обстановке в мировом океане [Электронный ресурс]. URL:

http://esimo.oceanography.ru/esp1/index.php?sea_code=1&section=5&menu_code=1682 (дата обращения: 27.04.2024).

28. Niemelä P. et al. Environmental impacts—Coastal ecosystems, birds and forests //Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. – 2015. – С. 291-306.

29. Нестеров, Е. С. Экстремальные циклоны в атлантико-европейском регионе / Е. С. Нестеров. – Москва: Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, 2018. – 104 с.

30. Сергеева Л. Г. Повышение уровенной поверхности моря и температуры воздуха в юго-восточной части Балтийского моря как проявление глобальных процессов // Безопасность мореплавания и надежность судовых технических средств. СПб., 2005. С. 180—185.

31. Von Storch H. et al. Second assessment of climate change for the Baltic Sea Basin. – Springer, 2015.

32. Стонт Ж. И. и др. Штормовая активность в осенне-зимний период 2018-2019 гг. в юго-восточной части Балтийского моря //Известия КГТУ. – 2019. – №. 53. – С. 61-72.

33. Шихов А.Н., Дремин Д.А. Закономерности повреждения ветровалами лесов европейской территории России и Урала: анализ по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. №3. С. 153–168.

34. Hanewinkel M., Kuhn T., Bugmann H., Lanz A., Brang P. Vulnerability of uneven-aged forests to storm damage // Forestry. 2014. V. 87. P. 525–534.

35. Meier H. E. M. et al. Overview: The Baltic Earth Assessment Reports (BEAR) //Earth System Dynamics. – 2023. – Т. 14. – №. 2. – С. 519-531.

36. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Azhigov I.O., Semakina A.V. A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986–2017 // Earth System Science Data. 2020. V. 12. P. 3489–3513.

37. Бобыкина В.П. К методике наземного мониторинга берегов //

Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2018. №4. С. 87-93.

38. Распоряжение Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности от 3 февраля 2021 года N 17-р «Об утверждении методики оценки экологического состояния зеленых насаждений Санкт-Петербурга» [Электронный ресурс]. URL: https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2021/02/05/05/17-p.pdf. (дата обращения: 10.04.2024).

39. Ковязин В.Ф., Нгуен Т. Л., Прияткин Н.С. Методика оценки санитарного состояния деревьев в городских экосистемах. Аграрный научный журнал. Естественные, технические и экономические науки. 2015. – № 2. –С. 9 – 13.

40. Брыксина Н.А. Изучение динамики береговой зоны Балтийского моря с использованием космических снимков // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2018. № 4. С. 87-93.

41. Нгуен Т. Д., Малинников В. А. Разработка методики определения положения береговой линии поверхностных водных объектов по материалам аэрокосмических съемок с использованием технологии глубокого обучения //Мониторинг. Наука и технологии. – 2021. – №. 2. – С. 32-40.

42. Спиридонов М. А. и др. Изменение береговой зоны восточной части Финского залива под воздействием природных и антропогенных факторов //Региональная геология и металлогения. – 2010. – №. 41. – С. 107-118.

43. Ионин А. С., Каплин П. А., Медведев В. С. Классификация типов берегов Земного шара (применительно к картам физико-географического атласа мира) //Тр. океанографич. комиссии. – 1961. – Т. 12. – С. 94-108.

44. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2022 году/ Под редакцией А.В. Германа, И.А. Серебрицкого – СПб.: 2023. - 226.с.

45. Рябчук Д. В. и др. Абразионные процессы в береговой зоне восточной части Финского залива и их связь с многолетними трендами

режимообразующих факторов //Геоморфология. – 2012. – №. 4. – С. 99а-105.

46. Экологическое состояние Финского залива // Некоммерческий фонд Без рек как без рук [Электронный ресурс]. URL: https://rekiruki.ru/ekologicheskoe-sostoyanie-finskogo-zaliva (дата обращения 29.04.2024).

47. Генеральная схема берегозащиты Курортного района // Окружающая среда Санкт-Петербурга [Электронный ресурс]. URL: https://ecopeterburg.ru/2016/11/19/%D0%B3%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F-%D1%81%D1%85%D0%B5%D0%BC%D0%B0-%D0%B1%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B7%D0%B0%D1%89%D0%B8%D1%82%D1%8B-%D0%BA%D1%83%D1%80%D0%BE/ (дата обращения 08.05.2024).

ПРИЛОЖЕНИЕ А Типы побережий Невской губы и открытой части Финского залива

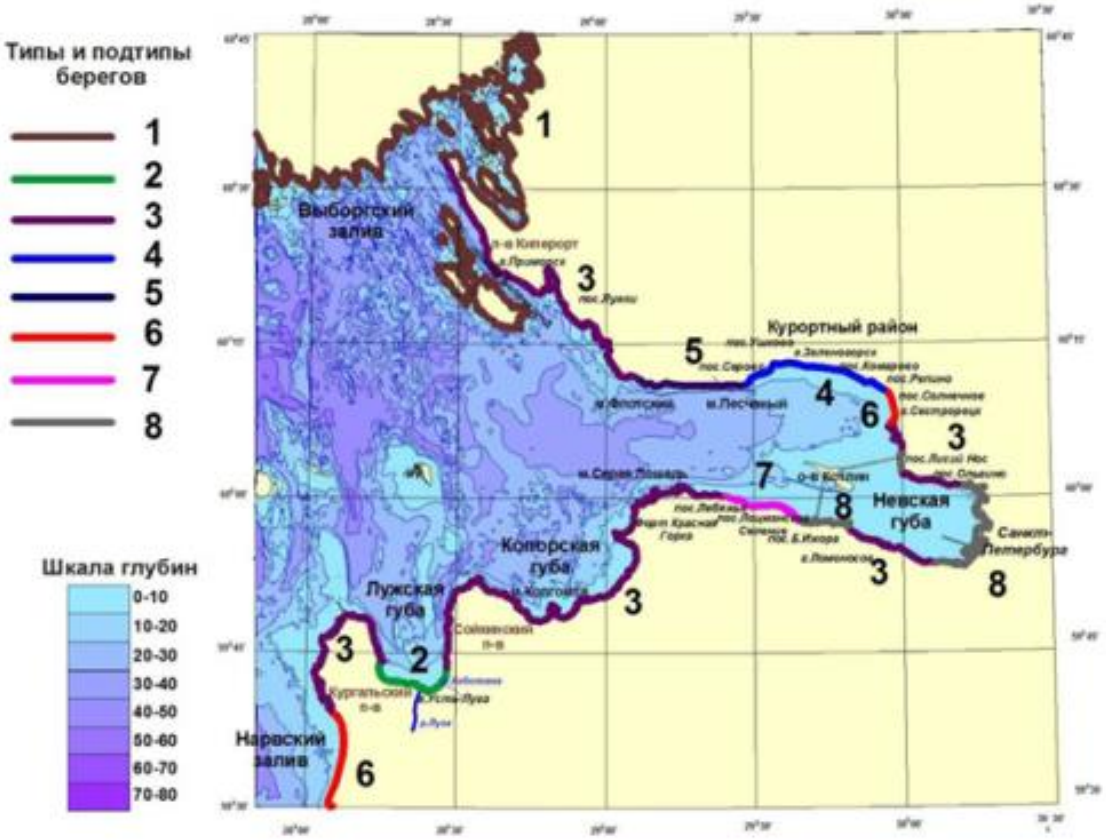


Рисунок А.1 – Схема типов побережий Невской губы и открытой части Финского залива, составленная Рябчук Д. В., Нестерова Е. Н., Сергеев А. Ю.[42]

Таблица А.1– Условные обозначения типов берегов восточной части Финского залива для рисунка А.1 [42]

Номер п.п	Группа, подгруппа	Тип	Подтип
1	I. Берега, сформированные субаэральными процессамии тектоническими процессами мало изменены морем	Шхерный	-
2	II. Берега, формирующиеся преимущественно под воздействие неволновых факторов Потамогенные	Берега аллювиальных равнин	Аккумулятивный песчаный приустевой

Продолжение Таблицы А.1

Номер п.п	Группа, подгруппа	Тип	Подтип
3	III. Берега, формирующиеся преимущественно волновыми процессами	Абразионно-аккумулятивный бухтовый	Абразионный валунный (моренный) с локальными песчаными пляжами в бухтах
4	А. Выравнивающиеся		Абразионно-аккумулятивный валунный (моренный) с песчаными пляжами в вогнутостях берега
5	Б. Выровненные	Абразионный	Абразионный валунный (моренный)
6		Аккумулятивный	Аккумулятивный песчаный
7	В. Вторичнорасчлененные	Абразионно-аккумулятивный бухтовый	Абразионно-аккумулятивный песчаный
8	IV. Техногенные	Техногенный	Набережные, насыпные территории, гидротехнические сооружения