



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Оценка современного уровня эвтрофикации Финского залива

Балтийского моря

Исполнитель Скульбида Анастасия Олеговна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Ерёмина Татьяна Рэмовна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____


(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«12» июля 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

0»

ния

ний

ИКТ-

и

т в

ник

ссе

ния,

ной

ала

ЫМ

к и

ав

ак

дии

лю

КИТ

Оглавление

Введение.....	3
1 Современное состояние изученности развития эвтрофикации в Финском заливе.....	4
1.1 Физико-географическое описание Финского залива	4
1.2 Эвтрофикация как естественный и антропогенный процесс. Влияние климата.....	10
1.3 План действий HELCOM по Балтийскому морю	15
1.4 Индикаторы эвтрофирования	19
1.5 Описание структуры фитопланктонных сообществ и хлорофилла	22_Тос138061320
2 Гидрохимические и гидробиологические условия.....	26
2.1 Кислородный режим. Состояние глубинных вод.....	26
2.2 Биогены	29
2.2 Описание изменчивости фитопланктонных сообществ	30
2.2 ГУП "Водоканал Санкт-Петербурга".....	31
3 Оценка состояния эвтрофированности Финского залива по данным натурных измерений.....	36
Заключение	48
Список использованных источников	50

ВВЕДЕНИЕ

Темой исследования выпускной работы является одна из наиболее важных проблем Балтийского моря - эвтрофикация. Процесс, который увеличивает содержания питательных веществ в воде, который приводит к повышению роста растительности, такие как водоросли, водных растений и микроорганизмов, но из-за этого происходит снижение качества воды, уменьшение количества кислорода и увеличение содержания токсичных веществ.

Актуальность данной работы заключается в том, чтобы показать уровень эвтрофикации Финского залива, которая является результатом, как естественного, так и антропогенного воздействия, а также приводит к серьезным последствиям для биоразнообразия и человеческого здоровья. Эвтрофирование затрагивает более 97% территории Балтийского моря, но самой загрязненной является восточная часть Финского залива.

Целью данной дипломной работы является оценка современного уровня эвтрофикации Финского залива. Для эффективности анализа были взяты данные HELCOM по Балтийскому морю, просмотрен ПДБМ, обозначены целевые значения по индикаторам эвтрофирования и возможности их соответствия, сняты измерения со станций РГГМУ.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Проанализировать современное состояние изученности развития эвтрофикации Финского залива.
2. Проанализировать гидрохимические и гидробиологические условия Балтийского моря.
3. Провести оценку состояния эвтрофированности Финского залива по данным натурных измерений.

1 Современное состояние изученности развития эвтрофикации в Финском заливе.

1.1 Физико-географическое описание Балтийского моря. Финский залив.

Балтийское море является самым молодым морем на Земле и омывает 9 стран. Принадлежит бассейну Атлантического океана. Балтика солоноватое море, где соленость распределяется, примерно, от "20‰ до 0.1‰"[1]. Является почти замкнутым морем с очень маленькими протоками у Дании (Каттегат, Скагеррак, Бенд, Зунд), где происходит водообмен с Северным морем (рисунок 1).

Финский залив относится к бассейну Балтийского моря и находится в северной части Европы. Он омывает Россию, Эстонию и Финляндию, причем в северной столице России - город Санкт-Петербург, столица Финляндии - Хельсинки и столица Эстонии - Таллин. Здесь есть множество островов, достаточно изрезанная береговая линия и не мало интересных для туристов мест. Залив имеет форму овала и площадь около "29 000 км²". Длина береговой линии составляет около "1300 км". Объем залива "1120 км³". Максимальная глубина финского залива "121 м". а средняя – "38 м". [2].

Залив окружен довольно плоской низменностью с высотами до "200 м", но в стороне от берегов высоты местами достигают "600 м". [3] Большая часть берегов Финского залива представляет собой пологие песчаные и галечные пляжи, но в некоторых местах они заменяются скалистыми и более ударными берегами.

БАССЕЙН БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

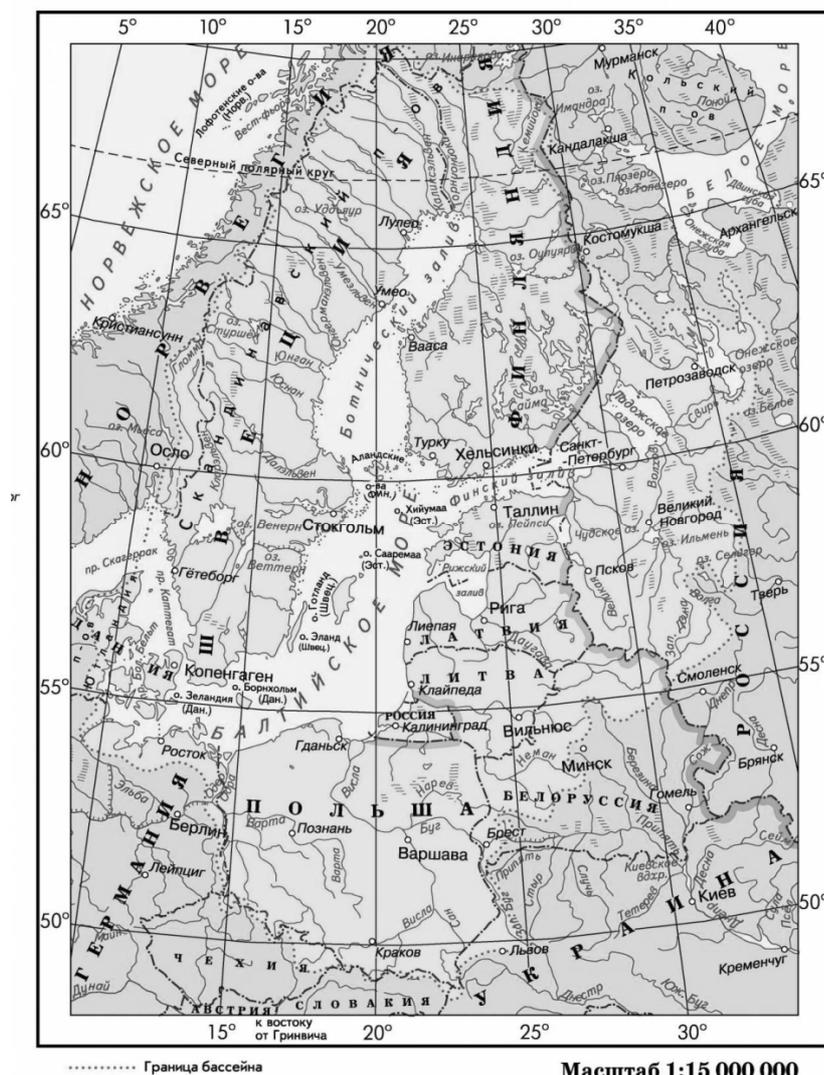


Рисунок 1- Географическое положение Балтийского моря, Финского залива[2]

Рельеф представляет собой преимущественно водную равнину с невысокими горбами и приливно-отливной зоной (рисунок 2). Береговая линия довольно изрезана, имеет множество стоков, мысов, полуостровов и островов. Ландшафт Финского залива формировался в период позднего ледникового периода, когда на месте нынешнего залива находился гигантский ледник. Главной геологической особенностью является кристаллический массив, которым он окружен. Составлен из разнообразных горных пород, в том числе гранитов, гнейсов, сланцев и песчаников. В грунтовом покрове Финского залива преобладает древесная и торфяная почва. Важной особенностью данной акватории является его энергетический потенциал. Здесь действуют приливно-отливные и ветровые силы, что открывает возможности для использования

альтернативных источников энергии, например, приливные электростанции и ветряные турбины. Также на дне Финского залива нередко достают до берегов реликтовые скалы, на которых сохранились ископаемые останки древних растений и животных, представляя большой интерес для геологов и палеонтологов.

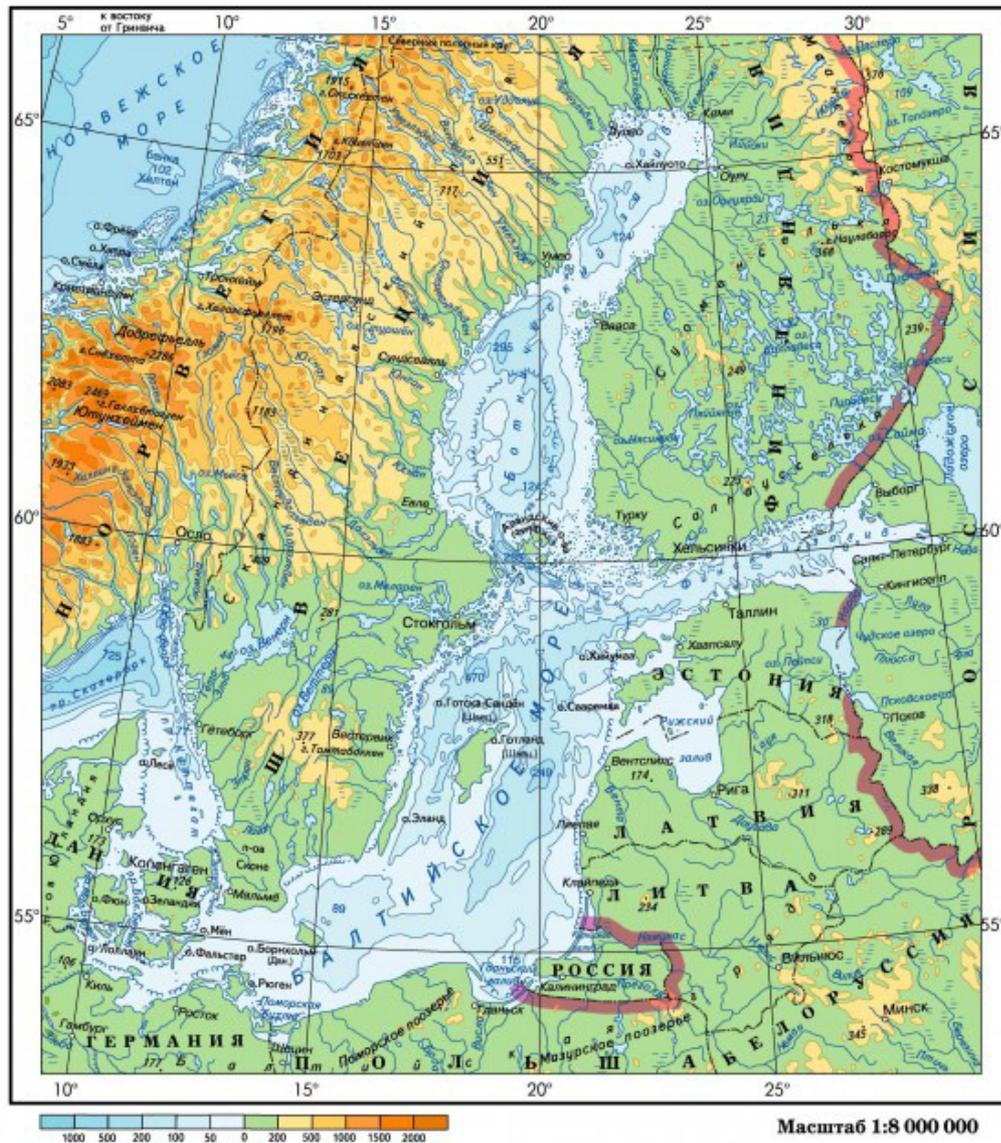


Рисунок 2 - Рельеф дна Балтийского моря [2]

Климат Финского залива характеризуется умеренной континентальностью, обилием осадков и изменчивостью погоды в разное время года. Самая низкая температура воздуха зафиксирована в феврале, а самая высокая в июле. В зимнее время залив покрывается льдом, который образует

ледовитые розы, раскрашивающие поверхность воды в характерные игристые узоры.

Финский залив, как часть Балтийского моря, имеет морской климат. Ниже представлены основные характеристики климата Финского залива [1]:

- 1) Умеренный континентальный климат, который характеризуется мягкими летними и холодными зимними периодами. Это обусловлено влиянием морского и воздушного массового перемещения, плюс большую роль играет соседство Россией и Скандинавией.
- 2) Лето в Финском заливе обычно прохладное и влажное, средняя температура июля составляет около 15-20 °С. Летние месяцы характеризуются длительными днями и частыми осадками.
- 3) Зимы холодные и снежные. Средняя температура января колеблется от -5 до -15 °С, но могут быть и более холодные периоды. Залив иногда покрывается льдом, особенно в северных частях.
- 4) Финский залив известен своей высокой влажностью в течение всего года. Осадки равномерно распределены, но чаще всего выпадает больше дождей осенью и зимой.
- 5) Залив подвержен ветрам, которые могут сильно влиять на погодные условия и создавать впечатление большей холодности.

Важно отметить, что климат может немного варьироваться в зависимости от конкретного местоположения вдоль Финского залива.

Следующее, что нужно отметить это донные отложения. В Финском заливе они представляют собой геологический слой, который образовался на дне моря в течение миллионов лет, состоя из различных материалов, таких как глина, песок, галька и известняки, и имея значительное значение для геологической истории и экологии региона. В период ледникового покрова, который продолжался около 100 000 лет, значительная часть Финского залива

была заморожена. Это привело к формированию огромных масс льда, в результате чего морское дно подвергалось интенсивному перемешиванию и эрозии. Следствием этого стало образование большого количества различных грунтовых отложений. После таяния льда на дно моря начали оседать крупные частицы грунта, такие как галька и камни, а также мелкие частицы, такие как глина и песок. В результате этого процесса образовались толстые слои различных отложений, которые со временем стали покрываться плотными слоями известняка и диатомовыми отложениями. В настоящее время донные отложения Финского залива представляют интерес для многих научных исследований в области геологии, океанологии, археологии и экологии, а также важны для понимания и сохранения экосистемы региона[4].

Ледовый режим Финского залива меняется в зависимости от времени года. В зимний период, когда температура воздуха опускается ниже нуля, на заливе формируется ледовая корка. В середине зимы лед достигает максимальной толщины, местами до 50 см. Весной, когда температура начинает повышаться, лед начинает таять и постепенно исчезает. Летом залив полностью очищается от льда и становится доступным для судоходства. Однако, в суровые зимы лед может сохраняться на заливе до мая и даже июня. [5]

Температура воды Финского залива в среднем составляет от +1 градуса в зимнее время до +18 градусов в летний период. Кислорода в воде достаточно много, концентрация колеблется от 7 до 11 мг/л. Соленость воды также нестабильна, в среднем она составляет около 6,5-7,5 ‰. В зимний период, когда на поверхности образуется лед, соленость на поверхности воды может понизиться до 1 ‰. [6]

Финский залив, на самом деле, не является полностью пресным. Он является частью Балтийского моря, которое представляет собой полузамкнутый водоем с затрудненным водообменом. (рисунок 3). Солоновато-водное море обусловлено несколькими факторами:

- 1) В Балтийское море впадают множество рек и притоков, которые приносят пресную воду. Крупные реки, такие как Нева, Неман, Висла и другие, вносят значительный объем пресной воды в море через Финский залив, что приводит к смешению пресной и соленой воды.
- 2) Из-за того, что Балтика является относительно мелким и имеет большую площадь поверхности, это приводит к высокой испаряемости воды с его поверхности. В результате чего испарения, соленая вода остается, и концентрация соли в море повышается.
- 3) Море имеет ограниченное обновление воды из открытого океана. Это ограничение приводит к накоплению пресной воды от рек и притоков, а также к повышенной концентрации соли.

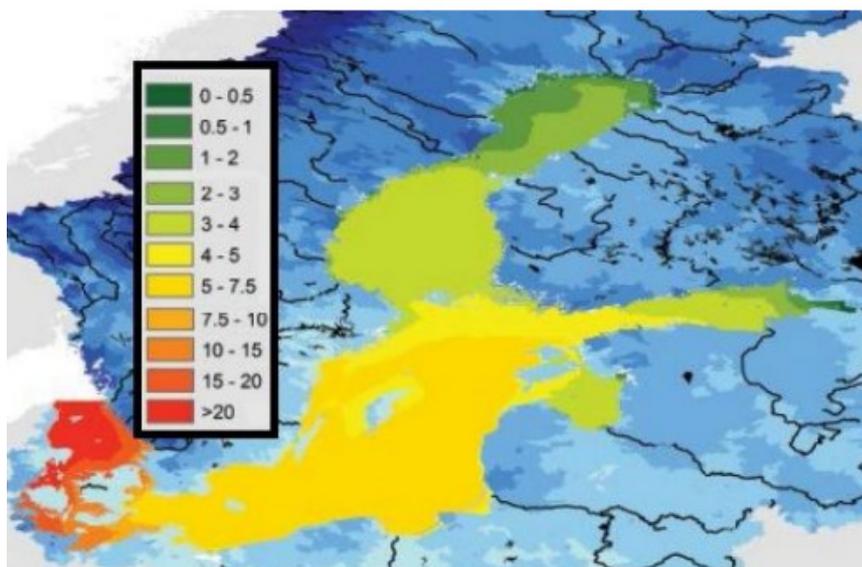


Рисунок 3 - Соленость (‰) поверхностного слоя вод в Балтийском море. [7]

Итак, можно подвести маленький итог, что Финский залив является частично пресным из-за влияния рек и притоков, которые приносят пресную воду в Балтийское море. Однако он все равно содержит соленость из-за океанического происхождения и ограниченного обновления воды.

Не уходя от темы важно отметить реку Неву, которая является самой крупной рекой, впадающей в Финский залив. Она протекает через Санкт-

Петербург и имеет длину около 74 км. С юга в Финский залив впадают такие реки, как Кейла, Пирита, Ягала, Валгейыки, Кунда, Пылтсамаа, Нарва, Луга, Систа, Коваши, Воронка, Черная, Лебяжья и Стрелка. С севера впадают реки Порвонйоки, Сайменский канал, Хамина, Ваетанйоки и Сестра. Эти реки переносят в воды Финского залива огромное количество воды, а также питательных веществ, что может приводить к эвтрофикации, росту водной растительности и другим изменениям в экосистеме залива.

Интересный факт, что Финский залив богат на виды флоры и фауны, включая около 500 видов морских беспозвоночных, около 100 видов рыб и множество видов птиц. И нельзя не упомянуть, что важнейшими портами и железнодорожными узлами в регионе являются Санкт-Петербург, Хельсинки и Таллин.

Финский залив имеет большое экономическое значение, так как через него осуществляется транспортные связи между Россией и странами ЕС, а также транзит грузов из Балтийского моря в Арктический океан. Также в регионе находятся залежи нефти и газа в прилегающей морской зоне.

1.2 Эвтрофикация как естественный и антропогенный процесс. Влияние климата.

"Эвтрофированием называется повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления в воде биогенных элементов под действием антропогенных или естественных (природных) факторов" [8]. "В отличие от обычного загрязнения, которое можно предотвратить с помощью технологий и других методов, антропогенное воздействие очень сложно избежать. Оно возникает как побочный эффект человеческой хозяйственной деятельности, которая оказывает влияние не только на сам водоем, но и на его водосборе"[29]. Экологическое состояние большинства участков акватории Балтийского моря не соответствует

стандартам качества окружающей среды, установленным правительствами стран и международными институтами. Причины, создавшей неблагоприятной ситуации, связаны с несколькими факторами, такими как эксплуатация природных ресурсов, например, рыболовство, загрязнение окружающей среды, выбросы биогенных элементов и вредных веществ, физическая модификация среды обитания, например, прокладка каналов, дренажные системы или землепользование, могут изменять естественный поток воды и способствовать усилению эвтрофикации. Каналы спокойно могут увеличить поступление питательных веществ в экосистемы, вызвать изменение гидрологического режима и нарушить естественные процессы самоочищения водных систем. Внесение инородных видов, некоторые виды растений или водорослей могут быть более адаптированы к высокому уровню питательных веществ и вытеснять местные виды, усиливая эвтрофикацию, и изменение климата. Особую озабоченность вызывает загрязнение излишними биогенными элементами, преимущественно азотом и фосфором, приводя к обогащению морской среды питательными веществами. Стоит отметить, что на данный момент Финский залив является одним из наиболее эвтрофированных районов Балтийского моря.

Основными источниками питательных веществ в Балтийском море является различная человеческая деятельность (сельское хозяйство, промышленность, сточные воды и выбросы из рек и притоков). Данные факторы вносят значительное количество азота и фосфора в морскую среду. Эти вещества попадают в воду через атмосферу, поверхностные стоки и прямые сбросы. Также слабая циркуляция воды имеет большое значение для Балтики. Это способствует задержке питательных веществ и их накоплению в бассейне моря. Ограниченность водообмена с открытыми морями приводит к низкой эффективности удаления питательных веществ и способствует развитию эвтрофикации.

В Балтийском море присутствуют так называемые "мертвые зоны" - области с недостатком кислорода, где морские организмы не могут выжить. Это происходит из-за интенсивного роста водорослей и растительности, которые погружаются на дно и разлагаются, потребляя кислород. Эти мертвые зоны имеют серьезные последствия для экосистемы. Они лишают жизни рыб, моллюсков и других морских организмов, что влияет на рыболовство и морскую биоразнообразность. Более того, они указывают на нарушение экологического баланса в море и несут угрозу для его будущей устойчивости. Для борьбы с образованием мертвых зон необходимо принимать меры по снижению эвтрофикации, контролю выбросов органических веществ и улучшению систем очистки сточных вод. Только таким образом можно сохранить здоровье и биологическое разнообразие Балтийского моря.

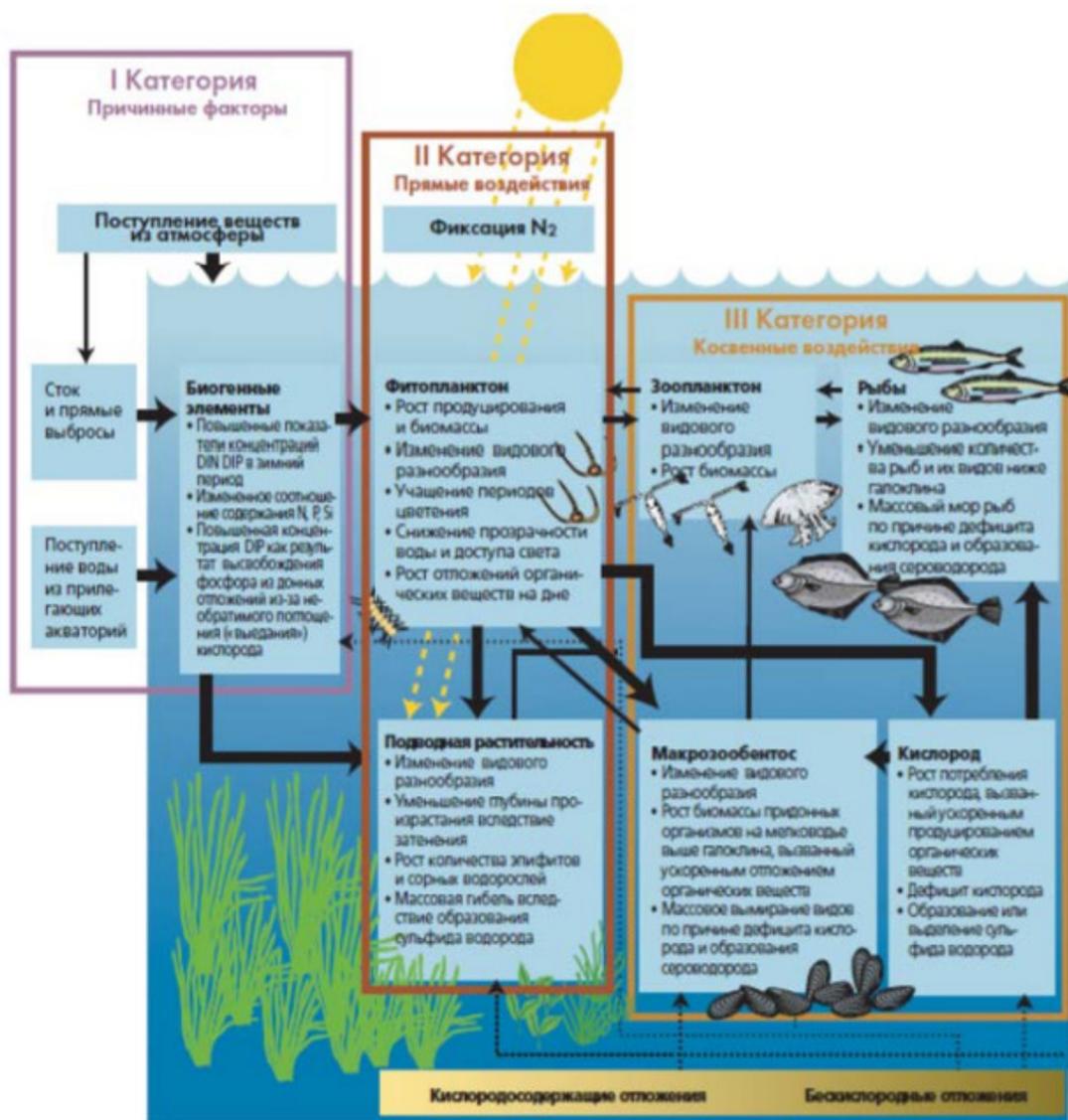


Рисунок 4 - Механизмы развития эвтрофикации [9]

Важно отметить влияние эвтрофикации на биоразнообразие и экосистему водоёма:

- 1) На состав и структуру биологического сообщества в водных экосистемах. Высокий уровень питательных веществ способствует росту водорослей, особенно водорослей рода сине-зелёных, снижая разнообразия других видов, так как водоросли могут конкурировать с другими организмами за доступ к свету и питательным веществам.
- 2) Увеличивает численность определенных видов водных растений и водорослей, приводя к уменьшению разнообразия других организмов, включая рыб, моллюсков и других морских животных, нарушая пищевые цепи и взаимодействия в экосистеме.
- 3) Распад органического вещества, образующегося из-за интенсивного роста водорослей, приводит к потреблению кислорода бактериями в процессе разложения, что приводит к уменьшению кислорода в водной среде.

- 4) Рост водорослей и водных растений приводит к увеличению пищевой базы для рядовых потребителей, например, моллюски и рыбы, однако снижение разнообразия видов может также снизить доступность пищи для хищников высших порядков, что, в свою очередь, может повлиять на динамику популяций.
- 5) На биогеохимические циклы, например, циклы азота и фосфора. Увеличивая поступления этих питательных веществ в морскую среду, приводя к их накоплению и перераспределению, меняя баланс и доступность питательных элементов для различных организмов и процессов в экосистеме.

Как было написано выше, что один из факторов, способствующее развитию эвтрофикации это изменение климата. Исследования [10], под данной проблеме, в регионе Балтийского моря указывают на продолжающееся потепление, которое ожидается сохраняться в течение двадцать первого века. Это потепление будет иметь значительное влияние на температуру воды и ледовые условия. Изменения уже заметны в гидрологическом цикле, и ожидается, что они станут более ярко выраженными в ближайшие десятилетия. Вместе с изменением климатических условий в регионе Балтийского моря также наблюдается усиление антропогенной нагрузки. С 1950-х годов поступление биогенных веществ в Балтику значительно увеличилось вследствие роста населения и более интенсивного использования удобрений в сельском хозяйстве, что способствует нежелательному росту водорослей и образованию плотных водорослевых цветков. Это, в свою очередь, оказывает негативное влияние на биоразнообразие и функционирование экосистем Балтийского моря.

"В последние два десятилетия, исследователи проявляют наибольший интерес к изучению режима биогенных соединений, особенно фосфора, и кислородного режима в придонных водах Восточной части Финского залива в связи с проблемой эвтрофирования" [11]. "Одной из основных проблем, которая привлекает внимание, является возникновение гипоксии, которое может быть вызвано как природными факторами, так и антропогенным воздействием" [12]. В Финском заливе систематически наблюдаются явления гипоксии и аноксии в придонных слоях воды, и механизмы их возникновения хорошо изучены. Исследования направлены на определение факторов, которые способствуют развитию этих явлений, а также на оценку их влияния на экосистему морской среды. Улучшение понимания кислородного режима и режима биогенных веществ в придонных водах помогает разработать эффективные стратегии для управления и снижения негативных последствий эвтрофирования в данном регионе. Необходимо принять меры по снижению антропогенной нагрузки, включая более эффективное управление сточными

водами и использование удобрений в сельском хозяйстве, а также применение технологий и практик, способствующих уменьшению выбросов питательных веществ, чем и занимается организация под названием ХЕЛКОМ.

1.3 План действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю и индикаторы эвтрофирования

ХЕЛКОМ (Хельсинкская Комиссия по Заливу) - это региональная организация, созданная для сотрудничества и координации действий по защите и восстановлению экологии Балтийского моря. План действий ХЕЛКОМ (Helcom Baltic Sea Action Plan) является одним из ключевых документов организации и представляет собой стратегию и конкретные меры по борьбе с загрязнением и сохранению биоразнообразия Балтийского моря. Основной целью Плана действий ХЕЛКОМ является достижение "хорошего экологического состояния" Балтийского моря к 2021 году. [13] Однако результаты отчета о состоянии Балтийского моря за период с 2011 по 2016 годы, опубликованные в 2018 году, свидетельствуют о том, что достижение поставленной цели не было достигнуто. Это состояние означает, что морская среда должна быть в достаточно здоровом состоянии, чтобы обеспечить устойчивое функционирование экосистемы и удовлетворять потребностям общества. Обновленный План мероприятий по Балтийскому морю основан на исходном ПМБМ и сохраняет высокий уровень амбиций. В нем включены все предыдущие согласованные действия, которые еще не были реализованы, а также добавлены новые мероприятия, направленные на укрепление уже существующих усилий и решение новых проблем, возникающих в регионе, которые должны быть реализованы не позднее 2030 года.

"Новый план включает в себя четыре сегмента" [13]:

- 1) Сегмент "Биоразнообразие", которое основывается на здоровье и экологически устойчивой экосистема Балтийского моря. Важно отметить, что изменение климата, такие как температура атмосферы и воды; соленость; речные стоки: кислород, солнечная радиация, как раз очень сильно влияет на биоразнообразие. Балтийское море страдает из-за климатических изменений и вредного воздействия человеческой деятельности. Многие виды рыб, птиц и морских млекопитающих находятся под угрозой исчезновения. "Необходимо принять меры по сохранению и восстановлению экосистемы моря, включая ограничение человеческого влияния и применение экосистемного и адаптивного управления. Цель - достижение желаемого состояния биоразнообразия и

социально-экономических выгод". [13] ХЕЛКОМ играет роль в содействии этим усилиям.

- 2) Сегмент "Эвтрофикация - Балтийское море, не затронутое эвтрофикацией". Важно отметить, что изменение климата, такие как температура воды; стратификация и циркуляция океана; биогенная нагрузка; кислород, как раз даёт очень сильно влияние. Эвтрофикация - это основная экологическая проблема для Балтийского моря, которая вызывает интенсивный рост водорослей и уменьшение кислорода на дне моря. В результате чего образуются области с недостатком кислорода или полностью без него, что негативно влияет на всю экосистему. "В настоящее время более 96% региона Балтийского моря страдает от эвтрофикации, включая открытое море и 86% прибрежных вод" [13]. Несмотря на некоторое улучшение, большая часть моря все еще находится в неподходящем состоянии. Эвтрофикация вызывается избыточным поступлением в воду фосфора и азота – так называемых биогенов. Они попадают в Балтийское море из природных и искусственных источников, как через воду, так и через воздух. Вода может принести биогены с реками или из точечных источников, таких как сточные системы и промышленные предприятия. Большая часть азота и фосфора поступает из рек, причем значительная доля – от сельскохозяйственных земель, в то время как точечные источники вносят небольшой процент от общего количества. "Воздушный транспорт также играет роль в поступлении азота, составляя 27% от общей нагрузки"[13]. Излишнее поступление биогенов в Балтийское море приводит к накоплению фосфора в донных отложениях. При гипоксии или недостатке кислорода, фосфат высвобождается из отложений, увеличивая общую нагрузку на морскую экосистему и усугубляя эвтрофикацию. За последние два десятилетия поступление биогенов значительно сократилось во всех суббассейнах Балтийского моря. "В настоящее время страны-участницы ХЕЛКОМ достигли снижения поступления азота на 12% и фосфора на 26%" [13]. Однако первоначальные цели, установленные в 2007 году, не были достигнуты к 2021 году. Большая часть сокращения поступления биогенов была достигнута за счет усилий, направленных на точечные источники, такие как очистные сооружения и промышленность, а также на сокращение выбросов в атмосферу в энергетическом и транспортном секторах. "Но сокращение поступления из диффузных источников, которые составляют около 35% поступлений в реки, было незначительным"[13]. Сельское хозяйство, имеющее большой потенциал для сокращения, остается основным источником диффузной нагрузки биогенов на Балтийское море. Также есть потенциал для дальнейшего сокращения точечных источников, особенно в верхней

части речных бассейнов, а также для небольших населенных пунктов и частных домов, где отсутствует адекватная очистка сточных вод. Несмотря на общий прогресс в сокращении осадка азота, необходимо продолжать усилия, особенно в судоходной отрасли. Выбросы аммиака остаются на прежнем уровне или даже увеличиваются, что требует принятия более эффективных мер для сокращения выбросов в сельскохозяйственном секторе. Для достижения желаемого состояния Балтийского моря, Хельсинкская Комиссия должна уменьшить количество биогенов, которые попадают туда из-за человеческой деятельности. HELCOM установили целевые значения поступлений биогенов, которые считаются безопасными для морской экосистемы, называемые индикаторы эвтрофирования. "Чтобы достичь надлежащего экологического состояния, максимально допустимые поступления азота составляют 792 209 тонн в год, а фосфора - 21 716 тонн в год. Эти значения основаны на последних данных о количестве биогенов, которые попадают в морскую экосистему через воду и воздух" [14].

3) Балтийское море страдает от загрязнения опасными веществами и мусором. Высокие уровни тяжелых металлов, органических загрязнителей и радиоактивных веществ остаются проблемой во всех его частях. Опасные вещества поступают в морскую среду из различных источников, включая бытовые химикаты, промышленность, сельское хозяйство, сжигание топлива и выбросы от транспорта. Некоторые загрязнители являются устойчивыми и могут накапливаться в отложениях, влияя на морскую экосистему. Кроме того, на дне моря присутствуют зарытые химические и боеприпасы. Необходимо принять меры для уменьшения загрязнения и восстановления экологического состояния моря. Для решения проблемы морского мусора необходимо предотвращать образование и попадание отходов в море, сокращать мусор на пляжах и в море, а также минимизировать поступление микропластика. HELCOM разработал региональный план действий по морскому мусору, включающий различные меры, и стремится сократить мусор на пляжах Балтийского моря. Оценка прогресса будет осуществляться на основе мониторинга и развития научных и технологических знаний.

4) Сегмент "Экологически устойчивая деятельность на море"[14]. Важно отметить, что изменение климата, температура атмосферы и воды; солнечная радиация; соленость; осадки; кислород; ветер; эрозия, как раз очень сильно влияет на морскую деятельность.

Для защиты Балтийского моря и достижения его экологического благополучия необходимо применять экологически устойчивый подход к управлению всеми морскими деятельностью. Судоходство и другие

факторы продолжают наносить вред морской среде, поэтому требуется сотрудничество и разработка соответствующих мер. Также важно улучшить готовность и реагирование на нефтяные и химические разливы в море из-за повышенного трафика и изменения климата.

"План мероприятий по Балтийскому морю, является стратегической программой ХЕЛКОМ и представляет собой набор мер и действий, направленных на достижение надлежащего экологического состояния моря и в конечном итоге на его оздоровление"[14]. Этот план разработан с учетом уникальных экологических и социо-экономических особенностей Балтийского моря и включает в себя широкий спектр инициатив, направленных на сокращение загрязнения, защиту биоразнообразия, улучшение качества воды и мониторинг состояния экосистемы моря. ПМБМ разработан совместными усилиями стран-членов HELCOM (Швеция, Дания, Финляндия, Литва, Латвия, Эстония, Германия, Польша и Россия) и заинтересованных сторон. Его реализация требует сотрудничества и взаимодействия между государствами, научными организациями, экспертами и общественными группами. ПМБМ играет важную роль в охране и устойчивом развитии Балтийского моря, а также в достижении международных целей в этой области.

"План действий HELCOM содержит ряд конкретных мероприятий, направленных на достижение поставленной цели. Они включают в себя следующие аспекты"[14]:

- 1) Мероприятие по сокращению выбросов загрязняющих веществ призывает к уменьшению загрязнения из различных источников, таких как промышленность, сельское хозяйство, сточные воды и транспортные средства, включая усиление контроля над выбросами и разработку стратегий по снижению загрязнения.
- 2) Мероприятие по защите и восстановлению морской среды предусматривает меры по охране и восстановлению уязвимых морских экосистем, таких как береговые зоны, морские побережья, острова и прибрежные воды. Он также включает установление защищенных морских территорий и введение мер по охране биоразнообразия.
- 3) Мероприятие по управлению морскими ресурсами предусматривает улучшение управления рыбными ресурсами Балтийского моря, чтобы обеспечить их устойчивое использование и сохранение. Он также включает меры по сокращению незаконного, нерегулируемого и нерегулируемого промысла рыбы.
- 4) Мероприятие по сотрудничеству и координации. HELCOM содействует сотрудничеству между странами-членами и заинтересованными

сторонами для достижения общих целей. План действий подразумевает обмен информацией, обучение и совместные исследования для эффективного решения проблем Балтийского моря.

ПМБМ является важным инструментом для принятия мер по сохранению и восстановлению Балтийского моря, представляя собой согласованный подход к устойчивому развитию региона и улучшению экологического состояния морской среды. "В наше время наблюдается снижение поступления биогенных веществ на 12% по азоту, и на 26% по фосфору"[14]. Результат достигнут всеми 9 странами- участницами HELCOM в течении последних 10 лет.

В соответствии с обновленным Планом действий по Балтийскому морю, необходимо провести мероприятия по сокращению поступления азота и фосфора в воды Финского залива и всего Балтийского моря к 2030 году.

Чтобы правильно оценить и контролировать уровень питательных веществ в водных экосистемах, необходимы индикаторы эвтрофирования. Эвтрофирование происходит, когда концентрация питательных веществ в воде превышает нормальные значения. Эти нормальные значения и установил HELCOM.

Раздел 1.4 Индикаторы эвтрофирования

Индикаторы эвтрофикации позволяют определить степень эвтрофирования и его последствия для водных систем. Они включают такие параметры, как концентрация биогенных элементов, уровень растворенного кислорода, биомасса фитопланктона, разнообразие и состав водных организмов. Путем мониторинга и анализа этих индикаторов можно оценить состояние водной экосистемы, выявить проблемные участки и принять соответствующие меры для предотвращения или уменьшения эвтрофирования. Индикаторы позволяют поддерживать экологическое равновесие. Принято выделять несколько основных индикаторов, которые помогают определить степень эвтрофирования[15].

- 1) Биогенные элементы: Измерение содержания азота и фосфора в воде является одним из наиболее простых и распространенных методов оценки эвтрофирования. Повышенные значения этих питательных веществ могут указывать на наличие эвтрофии.
- 2) "Диапазон глубины произрастания подводной растительности - отражает экологическую цель «Естественный ареал распространения растений и животных»"[16]. Избыточное развитие водорослей, особенно водорослей- водоцветов, является характерным признаком эвтрофирования.

Наблюдение и измерение покрытия водорослями могут служить важным индикатором состояния водной экосистемы.

- 3) Уровень растворенного кислорода: Эвтрофирование может приводить к ухудшению качества воды и снижению уровня растворенного кислорода. Недостаток кислорода в воде может привести к гибели рыб и других водных организмов.
- 4) Хлорофилл α : Трофические состояния определяются на основе содержания пигмента хлорофилла- α , которое является мерой активности фотосинтезирующих организмов в водной среде. Высокие значения пигмента могут указывать на эвтрофирование.
- 5) Прозрачность воды: Увеличение количества планктонных организмов или взвешенных частиц может привести к ухудшению прозрачности воды. Прозрачность является очевидным индикатором эвтрофирования водоемов и позволяет сделать первичные выводы. Мониторинг прозрачности воды проводится с конца девятнадцатого века и до настоящего времени. Для измерения используется диск Секки. Этот диск диаметром 30 см опускают в воду и следят за тем, на какой глубине он становится невидимым. До сих пор ни один современный метод мониторинга прозрачности поверхностных вод Мирового океана, включая космическое зондирование, не может сравниться с ним по простоте, точности и информативности. "Измерение прозрачности проводится в летний период"[18].

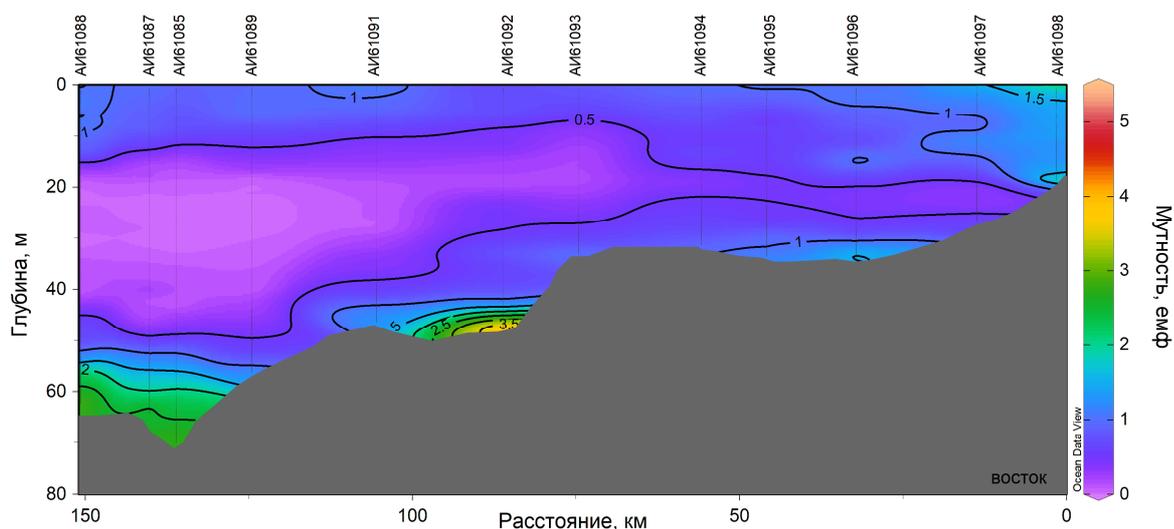


Рисунок 5- Распределение мутности на осевом разрезе восточной части Финского залива июль 2022год [17].

Авторы	Олиготрофный тип	Мезотрофный тип	Эвтрофный тип
Lonnerblad,1931	> 4	2–3	< 1
Alm,1960	> 5	2–5	< 2
Китаев,1984	4–8	1–4	< 1
Hendersen-Selers,1984	> 6	3–6	< 3
Романенко,1985	6–12	3–6	0,3–0,8

Рисунок 6-Классификации трофности водоемов по прозрачности в м. [18]

б) Индикатор «Содержание кислорода на дне». Истощение кислорода в водоеме происходит, когда его количество на дне превышает поступление через течения и перемешивание ветром из других слоев воды. Усиление биологических дыхательных процессов приводит к уменьшению растворимости кислорода из атмосферы и увеличению его потребления. "Дно становится лишенным жизни, за исключением бактерий, которые могут выживать без кислорода или при его минимальной концентрации. Многие из этих бактерий являются источниками метана, который создает пузырьки и приводит к образованию токсичных сероводородом областей на дне. Происходят геологические процессы, способные уничтожить рыбу и других гидробионтов, даже в верхних слоях водоема. Восстановление донной растительности на мертвом дне требует значительного времени, вплоть до десятилетий, при условии улучшения кислородных условий водоема"[2].

Важно отметить факт того, что измерения индикаторов эвтрофирования, такие как "азот" и "фосфор" проводятся в зимний период, поскольку в этот сезон первичная продуктивность водоемов достаточно низкая, что приводит к слабой зависимости концентрации биогенных элементов от их поглощения. Это означает, что эти элементы становятся значительным запасом питательных веществ для активного роста и развития фитопланктона. "Общий азот и фосфор, содержат растворенные органические питательные вещества, такие как белки, мочевины или гуминовые вещества, а также питательные вещества, связанные с твердыми частицами органического вещества, такими как фитопланктон и детрит"[19]. Неорганические питательные вещества, которые поступают в водоемы, быстро усваиваются организмами.

Общий азот, µмоль/л (зима)	Общий фосфор, µмоль/л (зима)	Прозрачность Секки, м (лето)	Хлорофилл-а, мкг/л (лето)	Концентрация растворенного кислорода, мл/л
<22.15	<0.56	5.42	<4.37	2,17

Рисунок 7-Целевые значения индикаторов эвтрофирования для Финского залива [20].

В настоящее время эвтрофикация остается одной из главных экологических проблем для Балтийского моря. Этот процесс имеет негативное воздействие на всю экосистему Балтийского моря.

Раздел 1.5 Описание структуры фитопланктонных сообществ и хлорофилла Финского залива.

Фитопланктон, растительный компонент планктона, который играет важную роль в морских и пресноводных экосистемах. Он представлен разнообразными формами и размерами, и составляет основу пищевых цепей в водных системах. Фитопланктон, состоящий из микроскопических водорослей и других фотосинтезирующих организмов, обладает незаметным для невооруженного глаза размером. Однако при массовом присутствии фитопланктона определенные виды могут формировать видимые пятна на поверхности воды. Это объясняется их содержанием хлорофилла и других пигментов, которые придает воде определенную окраску или оттенок, становясь заметными визуально. "Фитопланктон составляет около 1% от общей биомассы на Земле" [21]. Он играет важную роль в первичном производстве, превращая углекислый газ в органические соединения, которые служат пищей для других организмов в пищевой цепи. Плюс фитопланктон включает в себя фотосинтезирующие бактерии, такие как цианобактерии, которые осуществляют фотосинтез с выделением молекулярного кислорода. Обитает Фитопланктон в верхнем слое воды, известном как фотический, где достаточно солнечного света для фотосинтеза, в процессе которого он поглощает углекислый газ и выделяет кислород. Однако, при сильной солнечной радиации фитопланктон может подвергаться фотодеградации. Что касается роста и размножения, то для размножения фитопланктона необходимы питательные вещества, которые поступают в океан из различных источников, включая реки, континентальное выветривание и талую ледяную воду на полюсах. Развитие фитопланктона в Финском заливе сильно зависит от прозрачности водной среды. Вода здесь относительно неглубокая, и из-за перемешивания ветром и оседания мертвых организмов прозрачность воды снижается, что особенно

заметно вблизи береговых районов. В период интенсивного цветения фитопланктона также наблюдается значительное снижение прозрачности воды.

Антропогенное влияние существенно влияет на характер сезонной динамики фитопланктона, происходящий в результате изменений питательного состояния водоемов. По мере усиления трофического состояния водных систем наблюдается увеличение числа пиков в сезонной динамике биомассы. "В структуре фитопланктонных сообществ отмечается снижение роли диатомовых и золотистых водорослей, в то время как доминирующую позицию занимают сине-зеленые водоросли и динофиты. Динофлагелляты, характерные для стратифицированных глубоководных озер, также принимают увеличенное участие в сообществе. Важную роль в данном контексте играют хлорококковые зеленые водоросли и эвгленовые водоросли"[22].

Биомасса, а точнее количество, фитопланктона имеет три ступени явного появления: осенний, весенний, летний. В осеннее время, когда температура воды выравнивается по вертикали, биогены поднимаются со дна на поверхностный слой из-за чего продуктивность фитопланктона заметно сокращается почти как в зимнее время. Затем весной, когда появляется солнце, происходит развитие диатомовых водорослей (самые доминирующие). А дальше летнее время, когда биогенов становится меньше, на замену диатомовым, появляются сине-зеленые.

Фитопланктон состоит из различных видов, которые содержат хлорофилл, важный пигмент, участвующий в процессе фотосинтеза. Существуют несколько видов хлорофилла, таких как хлорофилл а и b, которые присутствуют в высших водорослях, а также хлорофилл с и d, которые являются составляющими низших водорослей.

Хлорофилл а играет основную роль в процессе фотосинтеза, позволяя фитопланктону преобразовывать солнечную энергию в органические соединения. Остальные виды хлорофилла в основном участвуют в поглощении света и транспортировке энергии внутри клетки фитопланктона[23]. Концентрация хлорофилла α и его изменчивость в природной воде являются важными критериями при оценке биомассы и продукции фитопланктона. Он является основным пигментом фитопланктона. Кроме того, хлорофилл α также служит индикатором оценки загрязнения природных вод [24]. "Изменения в концентрации хлорофилла α могут указывать на наличие органических или неорганических загрязнений, таких как пестициды, промышленные отходы или питательные вещества, которые могут способствовать эвтрофикации и усилению роста фитопланктона". Таким образом, мониторинг концентрации хлорофилла α в природных водах является важным инструментом для изучения

состояния водных экосистем, оценки биологической продуктивности и обнаружения потенциальных проблем загрязнения воды.

Сегодняшнее использование концентрации хлорофилла в качестве показателя для оценки трофического состояния водных экосистем является широко распространенным при мониторинге поверхностных вод. Однако интенсивность фотосинтеза и производства первичной продукции зависит от множества факторов, таких как освещение, температура, прозрачность воды, состав и физиологическая активность клеток и другие. "Это означает, что при одинаковом уровне трофичности водоема концентрации хлорофилла могут значительно различаться"[18].

"Концентрация хлорофилла позволяет выражать биомассу водорослей в единицах важнейшего компонента растительной клетки и широко используется для оценки биомассы фитопланктона"[29]. Повышенное количество фитопланктона также приводит к усиленному осаждению органического материала. "Это может привести к усиленному затенению воды за счет роста растительности, а также к аноксии из-за повышенного потребления кислорода во время разложения органического материала" [20].

Чтобы понять является ли водоём эвтрофированным, есть классификация трофности водоёма. Если концентрация по биомассе фитопланктона будет превышать 3(мг/л), он будет считаться эвтрофным. Так же, если концентрация хлорофилла α будет превышать 8(мг/л) он будет считаться эвтрофным.

Автор	Олиготрофные	Мезотрофные	Эвтрофные
Михеева, 1975	< 1,5	1,5–2,0	> 2,0
Милиус, Кываск, 1979	< 1,0	1,0–3,0	3,0–7,0
Китаев, 1984	< 0,5–1,0	1,0–4,0	4,0–16,0
Трифенова И. С., 1993	< 1,0	1,0–3,0	3,0–10,0

Рисунок 8 - Классификации трофности водоемов по биомассе фитопланктона[20]

Автор	Ультраолиготрофные	Олиготрофные	Мезотрофные	Эвтрофные	Гиперэвтрофные
Винберг Г.Г. (1960)		< 1	1–10	10–100	> 100
Китаев (1984)		< 1,5–3	3–12	12–48	
Meуbeck (1989)	0,01–0,3	0,3–2,5	2,5–8	8–25	> 25
Forsberg (1980)		< 3	3–7	7–40	> 40
Hackanson (1991)		< 2	2–8	6–35	> 35

Рисунок 9 - Классификации трофности природных вод по концентрации хлорофилла «а», мкг/л [20]

2 ХИМИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

2.1 Кислородный режим. Состояние глубинных вод.

Эвтрофирование может приводить к ухудшению качества воды и снижению уровня растворенного кислорода. Недостаток кислорода в воде может привести к гибели рыб и других водных организмов, а на дне, особенно в его глубоководных частях, может свидетельствовать о нарушении баланса водной экосистемы. Истощение кислородом наступает, когда его количество на дне превышает поступление через течения и перемешивание ветром из других водных слоев, поэтому глобальные климатические изменения играют важную роль в этом критическом явлении. Так же стоит отметить, что увеличение биологической активности приводит к уменьшению растворимости кислорода из атмосферы и увеличению его потребления.

Сезонное истощение кислорода на дне водоема имеет отрицательное влияние на всю экосистему. Дно лишается жизни, кроме некоторых видов бактерий, способных выживать в условиях с низким содержанием кислорода. Многие из этих бактерий становятся источниками метана, который образует пузырьки и создает токсичные сероводородом зоны на дне. Происходят геологические процессы, способные нанести вред рыбе и другим водным организмам даже в верхних слоях водоема. Восстановление донной растительности на мертвом дне требует значительного времени, несколько десятилетий, при условии улучшения кислородных условий водоема.

"Гидрохимический режим верхнего слоя воды имеет свои особенности, которые обусловлены географическим положением моря и разнообразием стоков пресных вод из различных стран. Данный режим подвержен сезонной стратификации и влиянию биотических и абиотических факторов. Динамика этого режима схожа с динамикой, характерной для фотического слоя"[12]. В термоклине и ниже него происходит уменьшение содержания кислорода, связанное с биохимическим разложением взвешенных веществ, которое замедляется из-за низкой температуры воды в этом переходном слое, где обычно отсутствует перемешивание. "Поэтому в верхнем слое воды сохраняются относительно высокие концентрации кислорода, которые формируют его максимум вертикального распределения. В глубоком слое воды из-за сложностей вертикального перемещения кислорода из верхнего слоя

основным источником аэрации является поступление воды посредством адвекции. Данный резкий переход в гидрохимическом режиме наблюдается на глубине 40 метров"[25]. Изменения, которые наблюдаются, главным образом обусловлены природными факторами. В глубоководной части залива улучшение кислородного режима на дне связывают с понижением солености и уменьшением содержания биогенов, особенно фосфора. Однако в мелководной зоне не редко наблюдаются неблагоприятные условия для кислорода, а также изменения в солености. Это обусловлено поступлением солоноватых вод из глубоководной части залива и притоком пресных вод от реки Невы.

В период с 1995 года по 2010 год были проведены научные экспедиции, в рамках которых были собраны данные о содержании кислорода, солености, температуре и фосфатах на различных станциях в восточной части Финского залива в летнее время[1]. Концентрации растворенного кислорода в поверхностном слое варьировались в пределах от 5,8 до 9,2 миллилитров на литр. В придонном слое были зарегистрированы минимальные показатели (ниже 3,0 миллилитров на литр) в 2006 и 2007 годах. Преобладающие концентрации составляли от 1,5 до 3,0 миллилитров на литр в глубоководной части, а в мелководном подбассейне были отмечены достаточно высокие значения от 6,0 до 9,2 миллилитров на литр. Самые низкие показатели были отмечены в 2006 и 2010 годах в глубоководных зонах, а также были замечены сниженные значения в зоне влияния сточных вод. Повышенные значения солености, особенно в переходном районе, можно объяснить изменением распределения характеристик в глубинных слоях. В этом районе, помимо заметного галоклина, также наблюдается значительное снижение концентрации кислорода.

В исследованиях РГГМУ, проведенных в восточной части Финского залива, экспедиционные измерения были выполнены с 6 по 7 июля 2022 года [26]. Было проведено 11 замеров на различных станциях, простирающихся от острова Гогланд до острова Котлин (рисунок 10). Пробы воды были взяты на стандартных глубинах. В результате экспедиции были получены данные о температуре, солености, концентрации растворенного кислорода, фосфатов и силикатов, а также были измерены показатели рН и мутности воды. На некоторых станциях были взяты пробы воды на содержание сероводорода в придонном слое (глубина от 55 до 62 метров). Определение содержания минерального азота в воде не проводилось. Отбор проб воды осуществлялся с использованием батометра на стандартных глубинах. Гидрохимические измерения проводились в соответствии с руководством по химическому анализу морских вод (РД 52.10.243-92, издание Гидрометеиздат, 1993). Для измерения показателя рН использовался портативный рН-метр, а содержание фосфатов, силикатов и сероводорода определялось фотометрическим методом.

Концентрация растворенного кислорода определялась с использованием объемного метода Винклера. Данная экспедиция показала, что летний кислородный режим в 2022 году можно охарактеризовать как благоприятный. Гипоксия, или недостаток кислорода, наблюдалась только в западной глубоководной части Финского залива на глубинах более 50 метров. (рисунок 11)

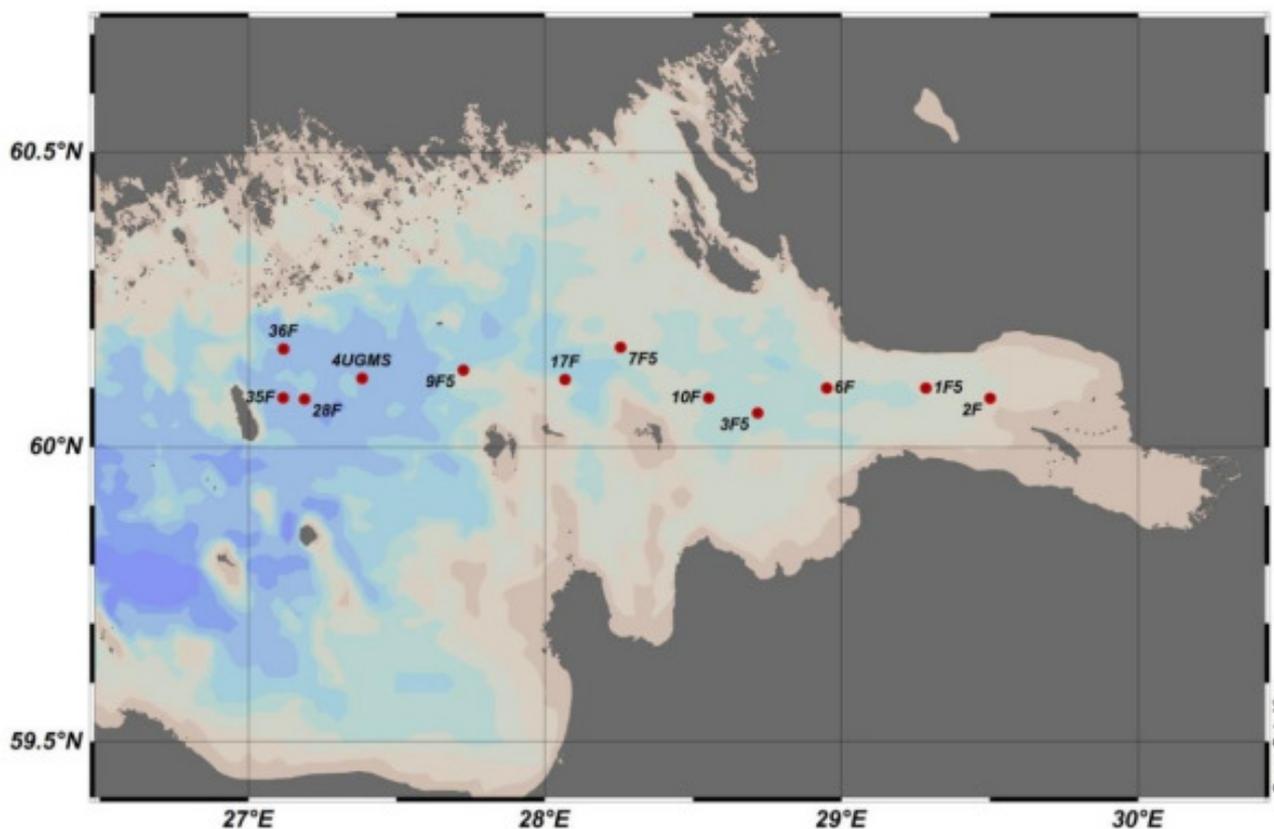


Рисунок 10 - Схема станций РГГМУ, для экспедиции в июле 2022 г. [26].

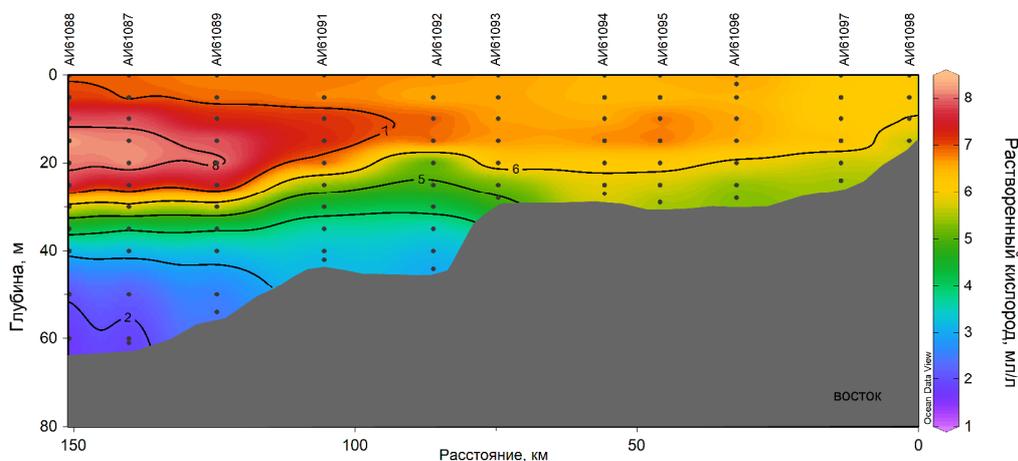


Рисунок 11 - Распределение растворенного кислорода в ходе экспедиционных исследований в июле 2022 г. Финского залива [26].

Раздел 2.2 Биогены

Биогенные элементы представляют собой химические элементы, которые играют важнейшую роль в жизнедеятельности всех живых организмов и без которых их существование становится невозможным. Известно около двадцати биогенных элементов, которые составляют основу клеток живых организмов, такие как азот, кремний, кислород, углерод, железо и другие элементы, обладающие наибольшей значимостью для нормального функционирования организмов. Они могут находиться в водных средах как в виде ионов, так и в виде коллоидов. Биогены имеют влияние на продуктивность (биологическую) водных объектов и служат показателями качества природных вод, причем их концентрация имеет важное значение, так как при мониторинге и оценке состояния водных объектов используется более широкое определение биогенных элементов, которое включает соединения, образующиеся в результате распада органических остатков и являющиеся "строительным материалом" для поддержания жизнедеятельности живых организмов.

Азот является важнейшим химическим элементом, так как он является структурным компонентом белков и аминокислот. Концентрация соединений азота является одним из ключевых показателей загрязнения водных объектов, так как при увеличении их содержания, вода приобретает токсичные свойства. В случае загрязнения водных объектов сточными водами, концентрация азотистых соединений может возрасти в сотни и тысячи раз по сравнению с естественным уровнем, что обусловлено выбросами из септиков (сооружение для механической очистки сточных вод) и применением минеральных удобрений[27].

Фосфор является важнейшим химическим элементом, так как он напрямую влияет на рост и развитие водной растительности. Недостаток фосфора приводит к нарушению жизнедеятельности водной фауны, а избыток приводит к ухудшению качества воды и проявлению процессов эвтрофикации водного объекта[28].

Избыточное содержание биогенных элементов является одной из главных причин почему идет интенсивное развитие водной растительности, приводя к явлению, известному как "цветение" водоемов. Процесс эвтрофирования природных вод характеризуется быстрым увеличением биомассы фитопланктона, обусловленным развитием "синезеленых водорослей", также известных как цианобактерии. Явление "цветения" водоемов приводит к значительным структурным изменениям в водных экосистемах, где синезеленые водоросли выступают в качестве доминирующей группы, замещая другие виды водной флоры и фауны. Эвтрофирование усиливается в случае

ускоренного роста водорослей, вызванного значительным количеством доступного азота и фосфора. Присутствие этих элементов связано с их содержанием в плодородных стоках сельскохозяйственных земель, моющих и чистящих средствах, а также других отходах, обогащенных удобрениями[29].

Раздел 2.3 Описание изменчивости фитопланктонных сообществ

Фитопланктон играет важную роль в водных экосистемах и оказывает влияние на качество воды. Он является ключевым компонентом биотической составляющей данных экосистем. Увеличение загрязнения водной среды и воздействие человека могут привести к изменениям в сообществах фитопланктона. Индикаторные свойства этих сообществ проявляются в изменениях состава видов и групп, а также в количественных характеристиках их развития. Антропогенное воздействие может вызывать как эвтрофирующий эффект, когда развитие фитопланктона усиливается из-за избыточного пополнения питательными веществами, так и регрессирующий эффект, который характеризуется снижением разнообразия и количества организмов фитопланктона. Важно проводить мониторинг и исследования для определения причин этих изменений и принятия мер по охране и восстановлению водных экосистем. Сохранение качества воды и биологического разнообразия фитопланктонных сообществ имеет важное значение для поддержания экологического баланса и жизнеспособности водных экосистем. [30].

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Биомасса фитопланктона(мелководный район)	3,38	3,25	3,18	3,25	3,30	3,15	3,00	2,90	2,75	2,65	2,70	3	3,5	3,2	2,5	1,5
Биомасса фитопланктона(глубоководный район)	2,50	2,75	2,95	2,80	2,75	2,70	2,60	2,55	2,50	2,40	2,42	1,7	0,9	1,2	1,35	1,5

Рисунок 12 - Многолетняя изменчивость биомассы фитопланктона(мг/л) в восточной части Финского залива в период с 2001 по 2016 год [31].

Развитие фитопланктона в Финском заливе в период с 2001 по 2016 года характеризуется значительными колебаниями количественных показателей. Такая высокая изменчивость указывает на неустойчивое состояние сообщества водных организмов. Возможными причинами могут быть изменения в гидрологическом режиме залива, загрязненные воды, изменения в питательных веществах и другие факторы окружающей среды. В связи с этим необходимо провести более детальное изучение и мониторинг фитопланктонных сообществ в Финском заливе, чтобы понять причины и последствия изменчивости. При помощи полученных результатов можно разработать более эффективные меры по охране и управлению водными ресурсами, с целью обеспечения стабильного и устойчивого состояния экосистемы.

Важно отметить, что продуктивность экосистемы ограничивается различными факторами, включая материальные и энергетические потоки. В случае олиготрофных и мезотрофных водоемов, можно предположить, что продуктивность фитопланктона и всей экосистемы зависит от концентрации минеральных элементов питания. Таким образом, можно сделать вывод, что концентрация этих элементов является основными ограничивающими факторами. Известно, что азот, фосфор и кремний являются тремя основными минеральными элементами, которые долгое время рассматривались как лимитирующие факторы. Концентрация этих элементов в водной среде существенно влияет на доступность питательных веществ для фитопланктона, что влияет на его размножение и биомассу. Понимание лимитирующих факторов и их взаимосвязи с продуктивностью фитопланктона является ключевым аспектом в изучении и управлении водными экосистемами. Это позволяет разработать эффективные стратегии охраны и управления, направленные на поддержание баланса и устойчивости водных экосистем.

Раздел 2.4 ГУП "Водоканал Санкт-Петербурга"

Водоканал Санкт-Петербурга активно работает над снижением негативного воздействия на окружающую среду и улучшением экологической обстановки в регионе Балтийского моря в соответствии с Хельсинкской конвенцией. Они предпринимают значительные усилия для сокращения сброса неочищенных сточных вод и повышения эффективности их очистки. Конкретное внимание уделяется удалению биогенных элементов, таких как азот и фосфор, которые являются основными загрязнителями водных ресурсов. Ожидается, что эти мероприятия приведут к улучшению экологической обстановки и защите морской экосистемы. Программа прекращения сброса сточных вод без очистки в водные объекты Санкт-Петербурга, разработанная в 2001 году, является одним из ключевых природоохранных проектов города. За годы ее реализации было переключено "более 300 прямых выпусков неочищенных сточных вод в систему коммунальной канализации", что привело к существенному сокращению загрязнения. Важным достижением стало внедрение современных методов интенсификации биологической очистки и химического осаждения фосфора, что позволило снизить содержание фосфора в очищенных сточных водах до установленных норм ("азот общий – не более 10 мг / куб. дм, фосфор общий – не более 0,5 мг / куб. дм.") [33].

Наименование веществ	Концентрация в общем объеме стоков на выходе с КОС, мг/л
Азот общий	9,5
Фосфор общий	<0,5

Рисунок 13 - Сведения об очистке сточных вод за 2022 год. * Нормативы взяты с учетом российских требований и рекомендаций Хельсинкской комиссии.

	2020	2021	2022
Фосфор общий на входе мг/л	4,00	5,16	4,43
Азот общий на входе мг/л	29,90	28,10	29,40
	2020	2021	2022
Фосфор общий на выходе мг/л	0,28	0,30	0,22
Азот общий на выходе мг/л	7,70	7,60	7,90

Рисунок 14 - Сведения об очистке сточных вод с 2020 по 2022 год. Водоканал Санкт-Петербурга «ГУП» на входе и выходе[33]

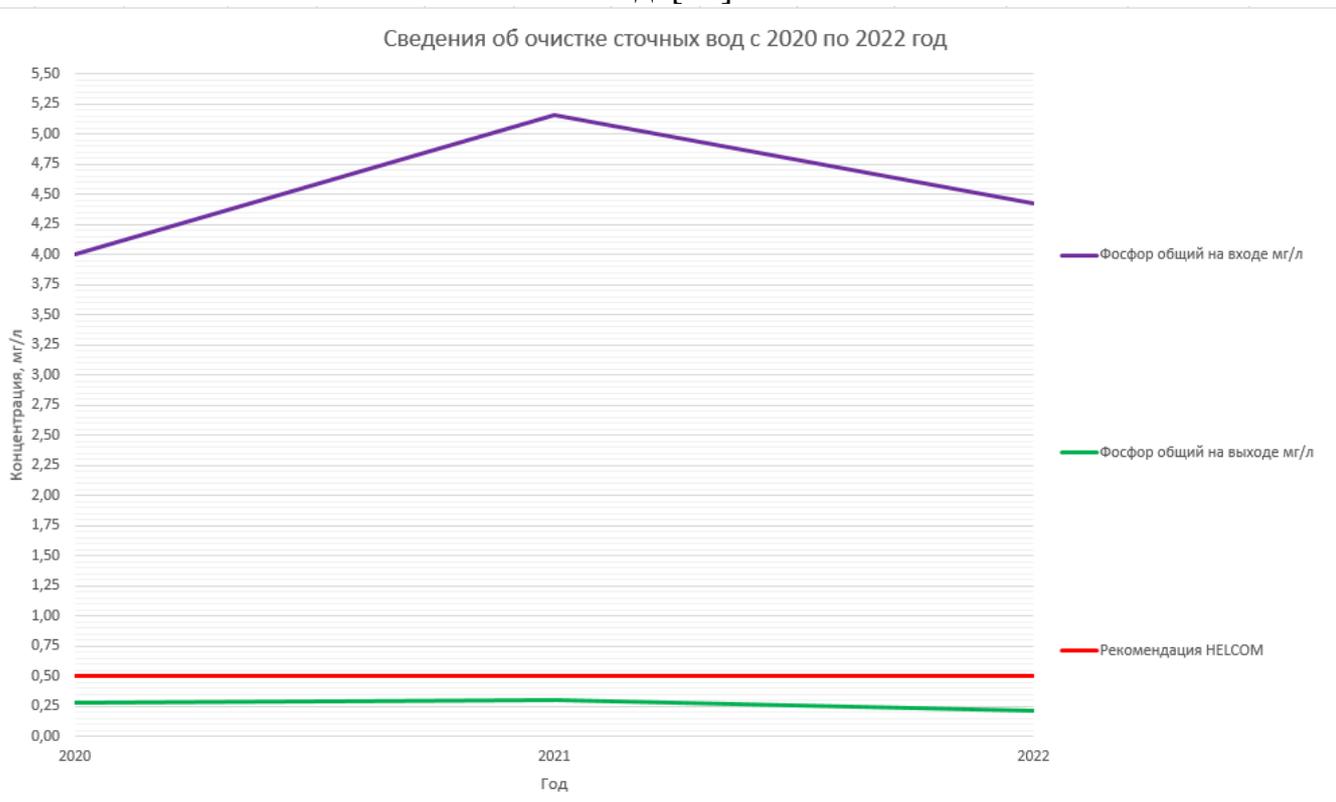


Рисунок 15- График сведений об очистке сточных вод с 2020 по 2022 год Водоканалом Санкт-Петербурга "ГУП", от Фосфора мг/л

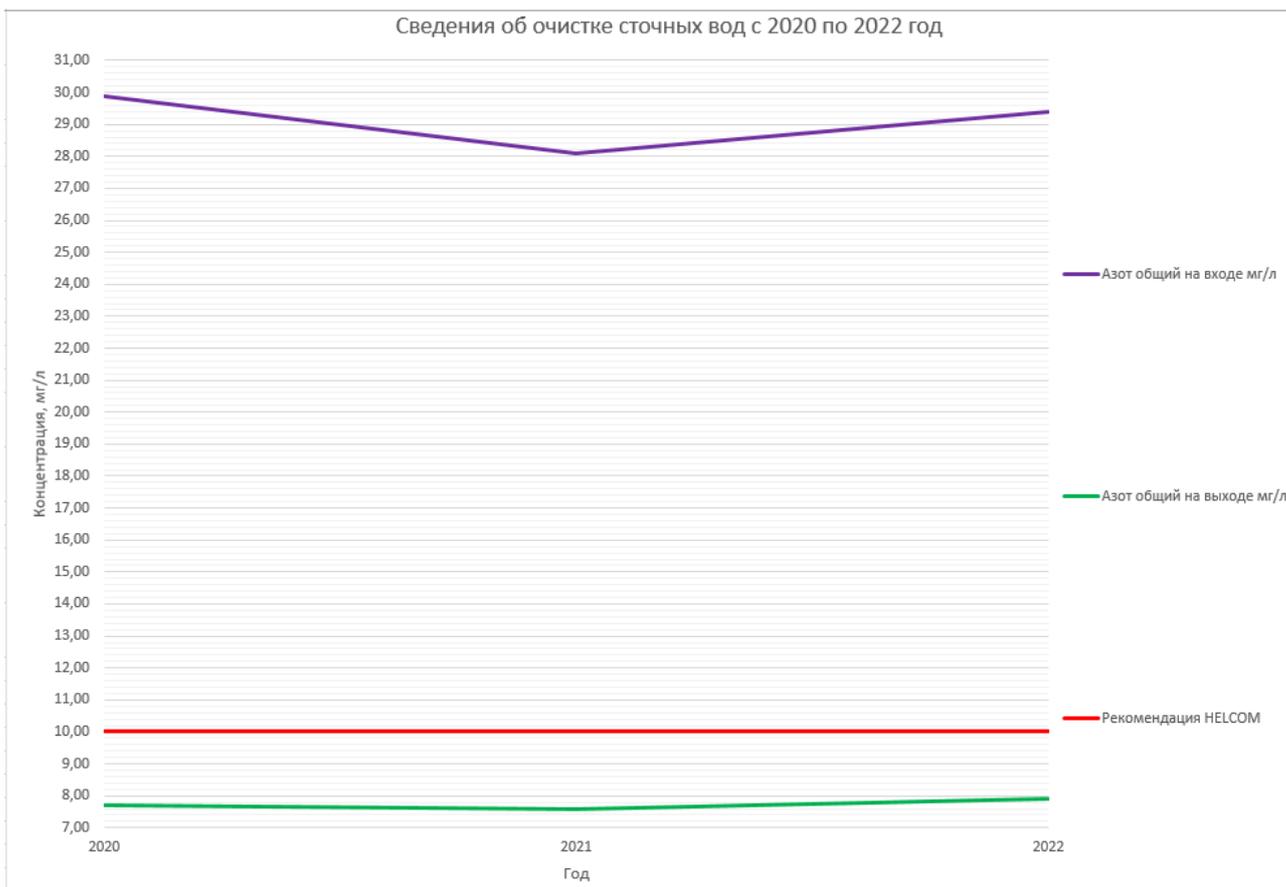


Рисунок 16 - График сведений об очистке сточных вод с 2020 по 2022 год Водоканалом Санкт-Петербурга "ГУП", от Азота мг/л

Анализируя данные представленные на рисунках 15 и 16, можно отметить следующее:

- 1) За период с 2020 по 2022 год наблюдается некоторая вариативность значений фосфора на входе, но общий тренд указывает на снижение его концентрации. В 2020 году фосфор на входе составлял 4,00 мг/л, в 2021 году этот показатель возрос до 5,16 мг/л, но затем снизился до 4,43 мг/л в 2022 году.
- 2) Значения азота общего на входе в сточные воды также неоднородны, но общая тенденция показывает его стабильное снижение. В 2020 году азот на входе составлял 29,90 мг/л, в 2021 году этот показатель уменьшился до 28,10 мг/л, а в 2022 году немного возрос до 29,40 мг/л.
- 3) За рассматриваемый период отмечается существенное снижение концентрации фосфора на выходе после процесса очистки сточных вод. В 2020 году фосфор на выходе составлял 0,28 мг/л, а к 2022 году значительно снизился до 0,22 мг/л.
- 4) Значения азота на выходе также отражают его снижение после процесса очистки сточных вод. К 2022 году азот на выходе составлял 7,90 мг/л.

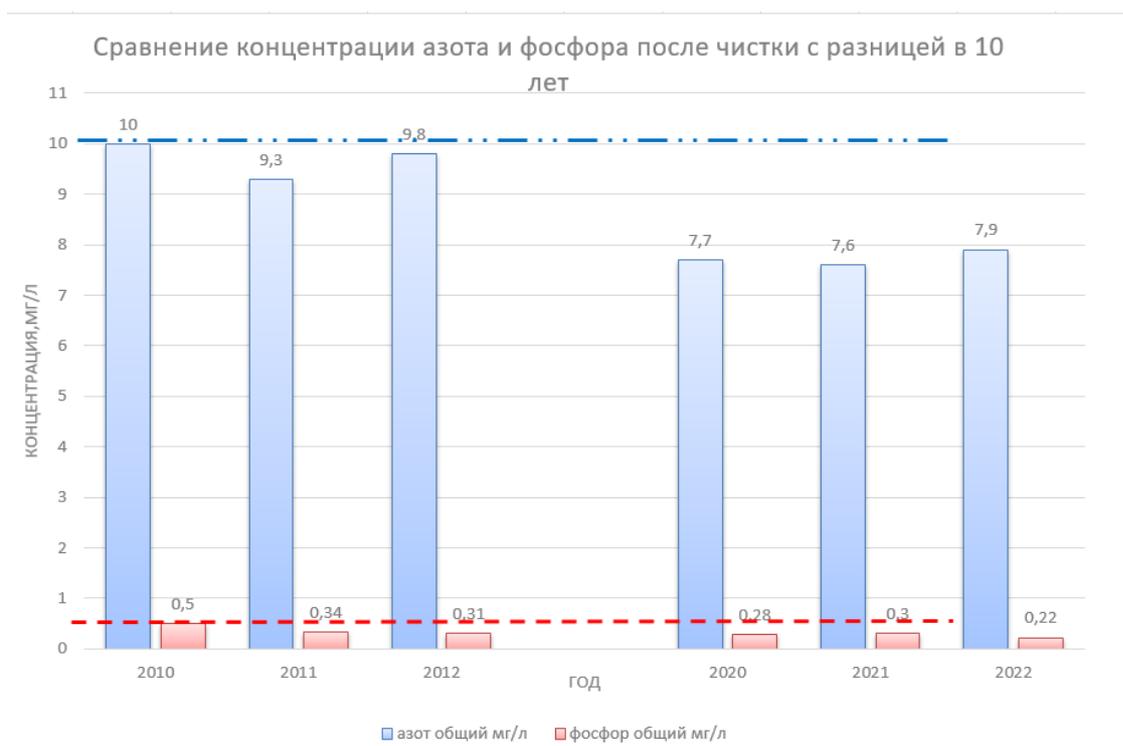


Рисунок 17 - Концентрация азота и фосфора после очистки в 2010-2012 и 2020-2022 годах. Синий пунктир - рекомендация HELCOM по азоту. Красный пунктир - рекомендация HELCOM по фосфору

Сравнивая значения азота общего и фосфора общего в разные года, можно сделать следующие наблюдения:

Азот общий:

- 1) В период с 2010 по 2012 года наблюдается концентрация чуть ниже рекомендации HELCOM (10мг/л)
- 2) В период с 2020 по 2022 года концентрация азота общего остается относительно стабильной, колеблясь в диапазоне от 7,6 до 7,9 мг/л., но при этом видно значительное снижение мг/л по сравнению с 2010-2012 годами.

Фосфор общий:

- 1) В период с 2010 по 2012 года концентрация фосфора общего чуть ниже рекомендации HELCOM (0,5 мг/л)
- 2) В период с 2020 по 2022 года концентрация значительно ниже, по сравнению с 2010 по 2012 годами на 0,5 мг/л.

Данные взяты с официального сайта Водоканала Санкт-Петербурга[33].

"Международный проект "Чистая Балтика" завершился летом 2011 года. В результате этого проекта Санкт-Петербург полностью следует новым рекомендациям Хельсинкской комиссии по защите Балтийского моря. Согласно

этим рекомендациям, содержание фосфора в общем сбросе городских сточных вод не превышает 0,5 мг/л." [37].

Исходя из данных предоставленных на рисунке 17, можно сделать вывод, что процессы очистки сточных вод, проводимые Водоканалом Санкт-Петербурга, приводят к существенному снижению концентрации фосфора и азота в очищенных сточных водах. Это свидетельствует о эффективности (99,6%) применяемых технологий и постоянной работе по совершенствованию системы очистки в целях улучшения водной экологии региона Балтийского моря.

3 Оценка состояния эвтрофированности Финского залива по данным натуральных измерений

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Растворенный кислород, мл/л (мелководный район)	4,80	4,60	4,40	4,80	4,75	4,50	4,40	4,20	3,80	3,00	3,30
Растворенный кислород, мл/л (глубоководный район)	3,70	4,10	4,10	4,55	5,00	5,00	4,95	4,85	4,00	3,15	2,95
Фосфаты, мкг/л (мелководный район)	30	60	70	63	58	55	40	38	44	62	65
Фосфаты, мкг/л (глубоководный район)	50	80	100	108	106	103	80	63	72	93	102
Хлорофилл а, м (мелководный район)	3,50	4,00	6,00	9,50	9,00	7,50	6,50	6,50	5,80	4,10	3,90
Хлорофилл а, м (глубоководный район)	1,80	1,90	2,30	3,50	4,00	3,50	3,80	3,70	2,90	2,50	2,30
Биомасса фитопланктона(мелководный район)	3,38	3,25	3,18	3,25	3,30	3,15	3,00	2,90	2,75	2,65	2,70
Биомасса фитопланктона(глубоководный район)	2,50	2,75	2,95	2,80	2,75	2,70	2,60	2,55	2,50	2,40	2,42
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Растворенный кислород, мл/л (мелководный район)	6,36	4,81	5,55	2,75	6,14						
Растворенный кислород, мл/л (глубоководный район)	5,33	5,18	5,7	5,1	4,65						
Фосфаты, мкг/л (мелководный район)	12,5	49,03	55,2	123,6	24,3						
Фосфаты, мкг/л (глубоководный район)	52,7	55,32	64,1	37,8	66,9					91,41	
Хлорофилл а, м (мелководный район)	4,2	5	3,2							6,1	
Хлорофилл а, м (глубоководный район)									3,11	4,1	
Биомасса фитопланктона(мелководный район)	3	3,5	3,2	2,5	1,5						
Биомасса фитопланктона(глубоководный район)	1,7	0,9	1,2	1,35	1,5						

Рисунок 18 - Данные концентрации растворенного кислорода, фосфатов, хлорофилла, биомассы фитопланктона на мелководных глубоководных районах в период с 2001 по 2021 год[31].

На рисунке 18 представлены данные по концентрации растворенного кислорода (мл/л), фосфатов(мкг/л), хлорофилла(мкг/л), биомассы

фитопланктона(мг/л) на мелководных глубоководных районах в период с 2001 по 2021 год, данные взяты из данных по экспедиции Шатровой О.В [31].

Во время комплексных исследований РГГМУ, проведенных в период 2001-2011 годов в Восточной части Финского залива, "было проведено 666 измерений гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических характеристик"[31]. Эти измерения включали температуру, соленость, растворенный кислород, фосфор-фосфаты, азот (нитриты + нитраты), хлорофилл "а" и биомассу фитопланктона. Все измерения проводились в фотическом и придонном слое на мелководных и глубоководных районах и перенесены на рисунок 18. Далее, в период с 2012 по 2016 года, данные взяты из базы РГГМУ по станциям 2F(мелководная), 2UGMS и 4UGMS (глубоководных). И в 2020 и 2021 году данные взяты из базы исследований РГГМУ, по тем же станциям.

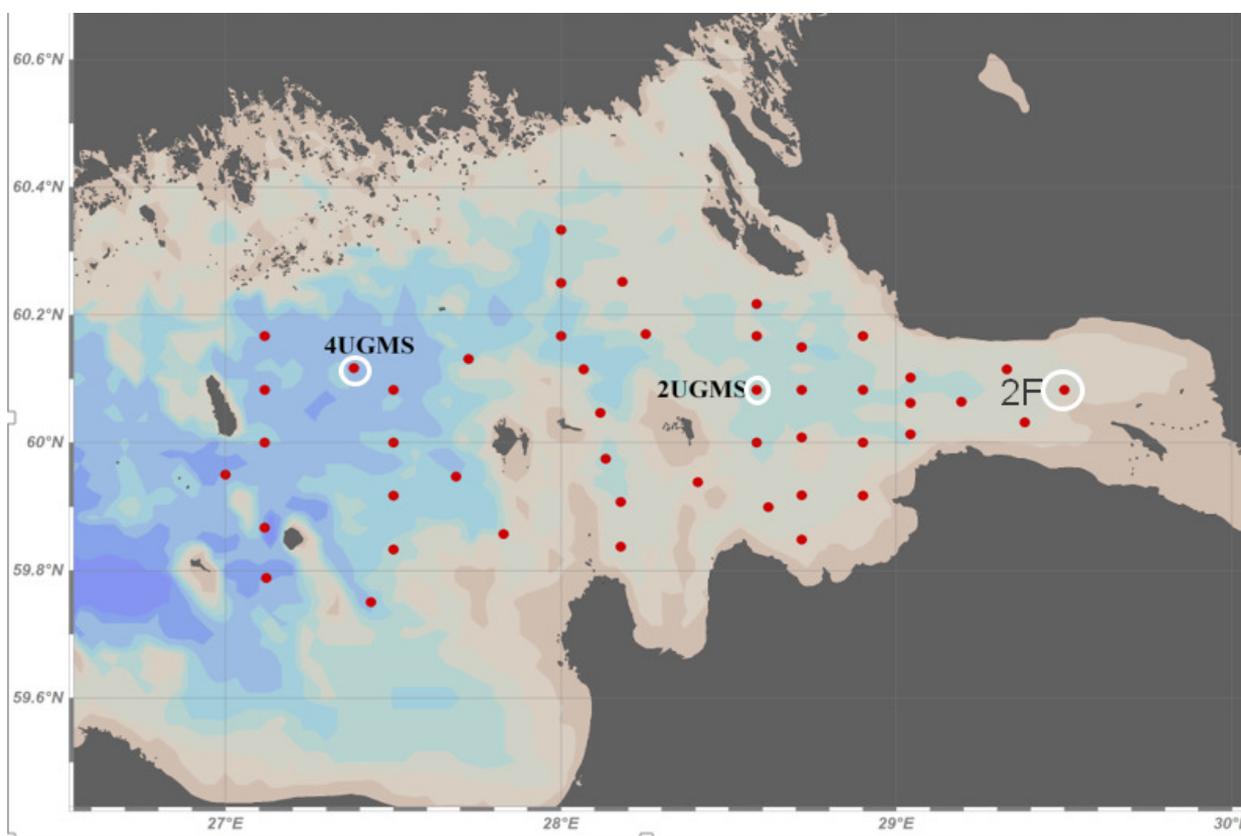


Рисунок 19 - Карта расположения станций отбора проб РГГМУ

Прозрачность(м):

- Вода с высокой прозрачностью обычно считается более чистой, в то время как вода с низкой может содержать больше взвешенных веществ, включая хлорофилл. "В период с 2001 по 2011 год прозрачность воды в Финском заливе изменялась от 1,3 до 5,6 метров" [31]. Такое снижение может являться следствием увеличения концентрации хлорофилла-а.

Растворенный кислород (мл/л):

- В мелководном районе наблюдается умеренное снижение концентрации кислорода с 2001 по 2010 год, после чего происходит резкое падение в 2011 году. В последующие годы концентрация варьирует, но общий тренд показывает некоторое восстановление.
- В глубоководном районе концентрация кислорода более стабильна по сравнению с мелководным районом, начиная с 2005 года, наблюдается постепенное повышение концентрации, хотя есть некоторые колебания в разные годы.



Рисунок 20 -Многолетняя изменчивость растворенного кислорода(мл/л) Финского залива, с линейным трендом[31].

Для кислородных условий с 2001 по 2016 год характерен слабый тренд к понижению содержания растворенного кислорода за 15 лет, что свидетельствует о том, что действие антропогенных факторов скорее всего преобладает над климатическими, последствиями которых считается ослабление стратификации и улучшение вентиляции глубинных вод Финского залива. Концентрация растворенного кислорода в мл/л измеряется и соответствует целевому значению HELCOM, "равному 2,17 мл/л"[15]. Это объясняется тем, что восточная часть залива характеризуется мелководностью, что способствует поддержанию необходимых уровней кислорода.

Фосфаты (мкг/л):

- В мелководном районе концентрация фосфатов варьирует в течение периода наблюдений, но общий тренд показывает некоторое увеличение после 2010 года.
- В глубоководном районе содержание фосфатов также имеет колебания, но общий тренд указывает на постепенное увеличение после 2005 года, с всплесками в некоторые годы.

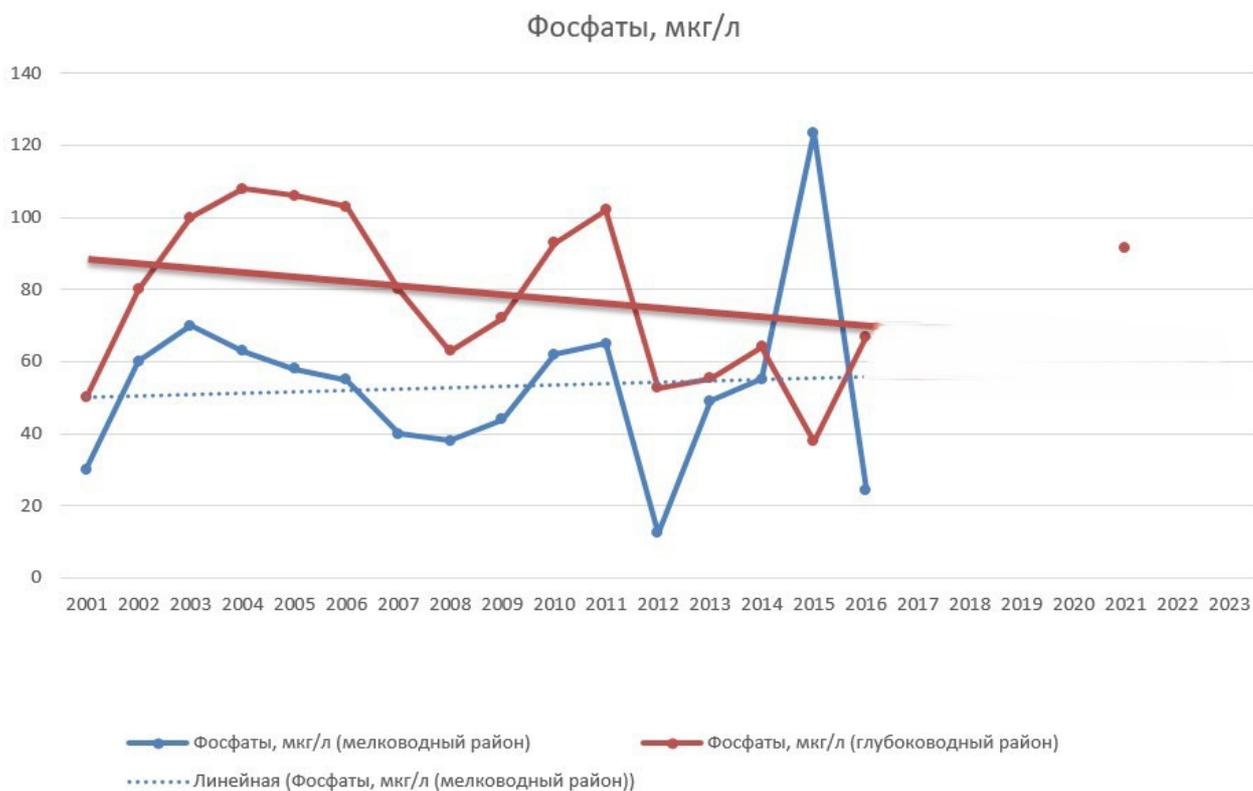


Рисунок 21 - Многолетняя изменчивость фосфатов (мкг/л) Финского залива, с линейным трендом

Смотря на рисунок 21 видно преобладание биогенной нагрузки на концентрацию фосфатов в придонном слое в сравнении с действием климатических факторов подтверждается положительным трендом изменчивости фосфатов за последние 15 лет. Меры, принятые по снижению поступления биогенных соединений со стоком р.Нева, не привели к значительному снижению содержания фосфатов, что обусловлено огромными запасами, накопленными в донных отложениях Финского залива.

Хлорофилл а (мкг/л):

- В мелководном районе концентрация хлорофилла имеет некоторые колебания в течение 22 лет, начиная с 2005 года, наблюдается общий тренд на снижение.

- В глубоководном районе концентрация хлорофилла также имеет колебания, но в целом показывает некоторое увеличение после 2005 года.

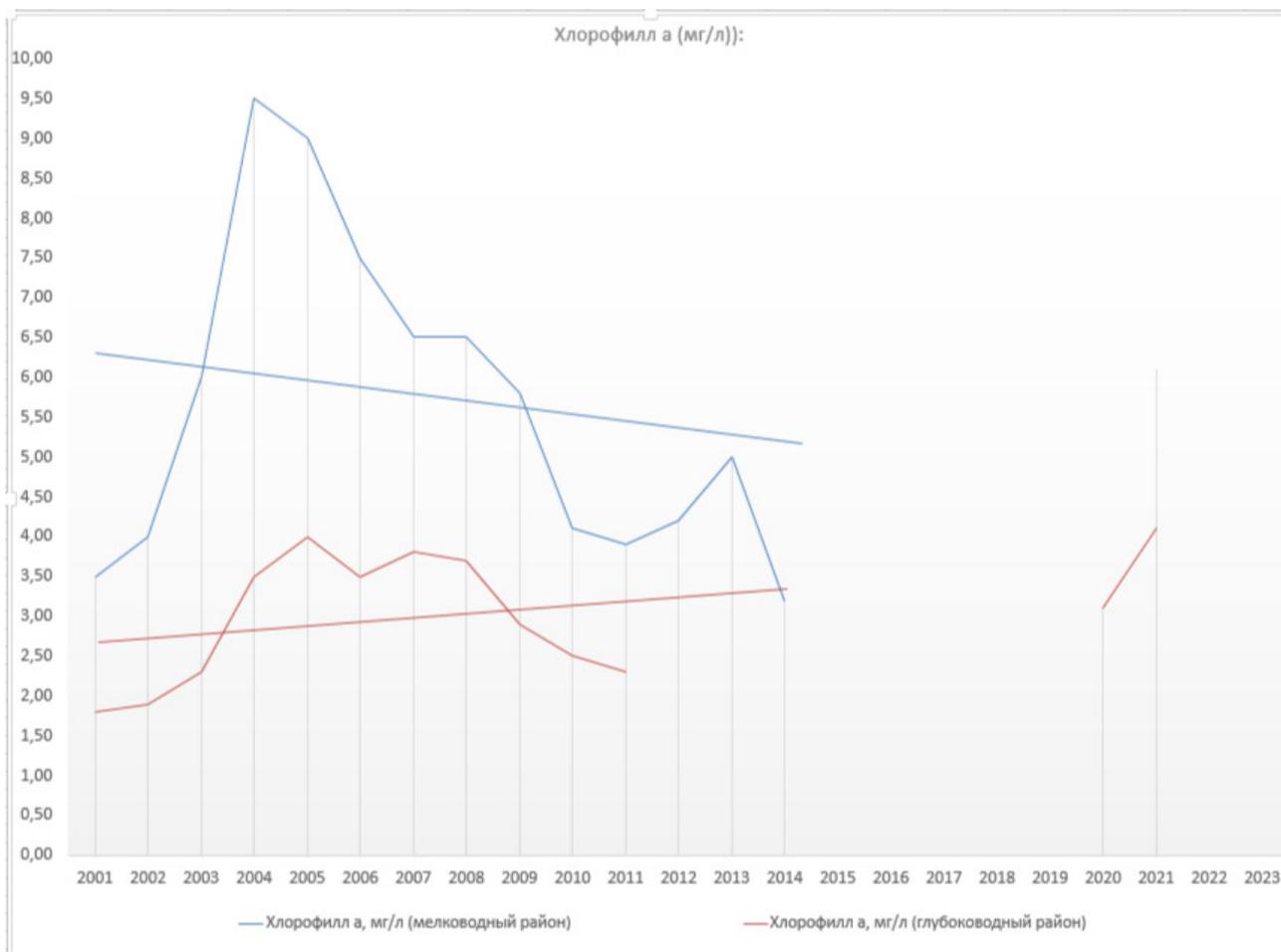
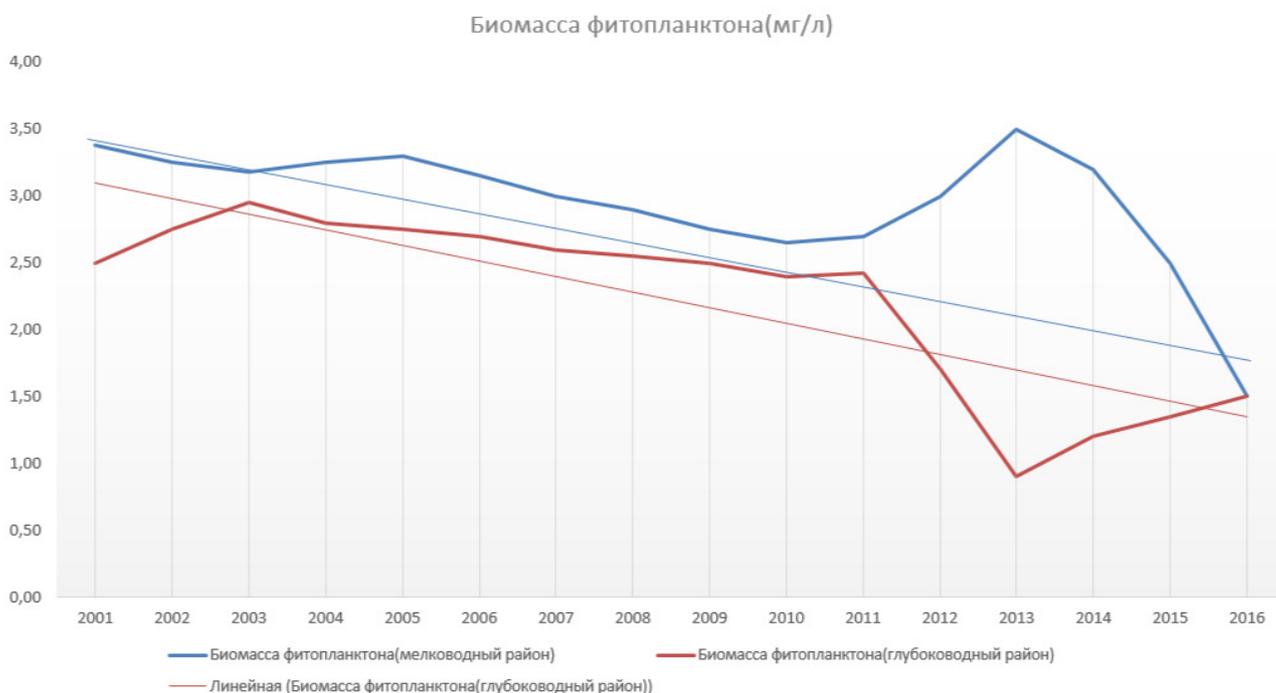


Рисунок 22 - Многолетняя изменчивость хлорофилла а (мкг/л) Финского залива, с линейным трендом. Прямые линии – тренд.

Биомасса фитопланктона (мг/л):

- В мелководном и глубоководном районах концентрация биомассы фитопланктона показывает колебания в течение наблюдаемого периода, но общий тренд указывает на снижение после 2005 года.



**Рисунок 23-Многолетняя изменчивость биомассы фитопланктона(мг/л)
Финского залива с линейным трендом**

Общая биомасса фитопланктона и концентрация, хлорофилла-а резко снизились из-за исчезновения крупных колониальных цианобактерий.

Для сравнения были определены станции по глубине 2F(мелководная), 2UGMS и 4UGMS (глубоководные), расположенные в восточной части Финского залива. Изучая более подробно каждую станцию, были построены графики для более детального анализа концентраций по расположению станций.

Станция 2F:

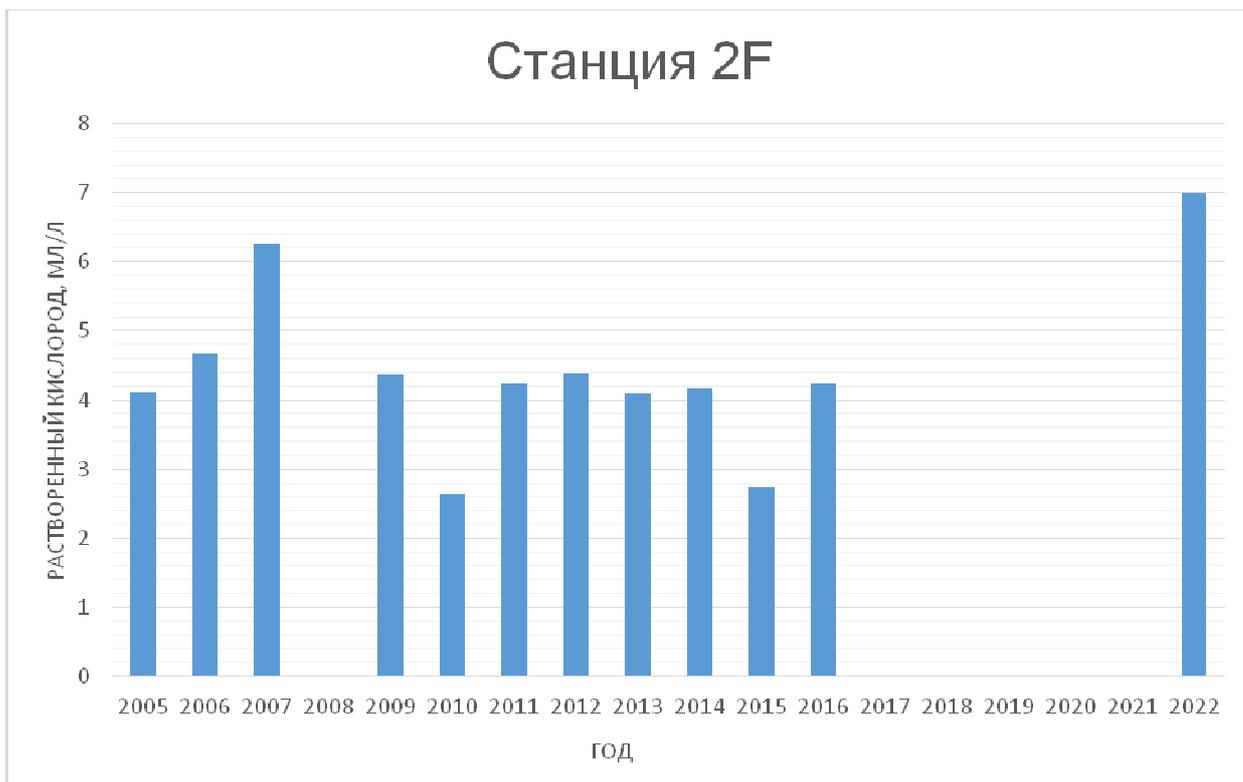


Рисунок 24 - Многолетняя изменчивость растворенного кислорода на станции 2F

Смотря на рисунок 24, можно увидеть, что содержание кислорода менялась в течении 12 лет, этому могут быть причины, такие как температура, атмосферное давление и ветер; при наличии большого количества биологической активности, уровень кислорода может уменьшаться из-за его потребления; изменение водообмена [38].

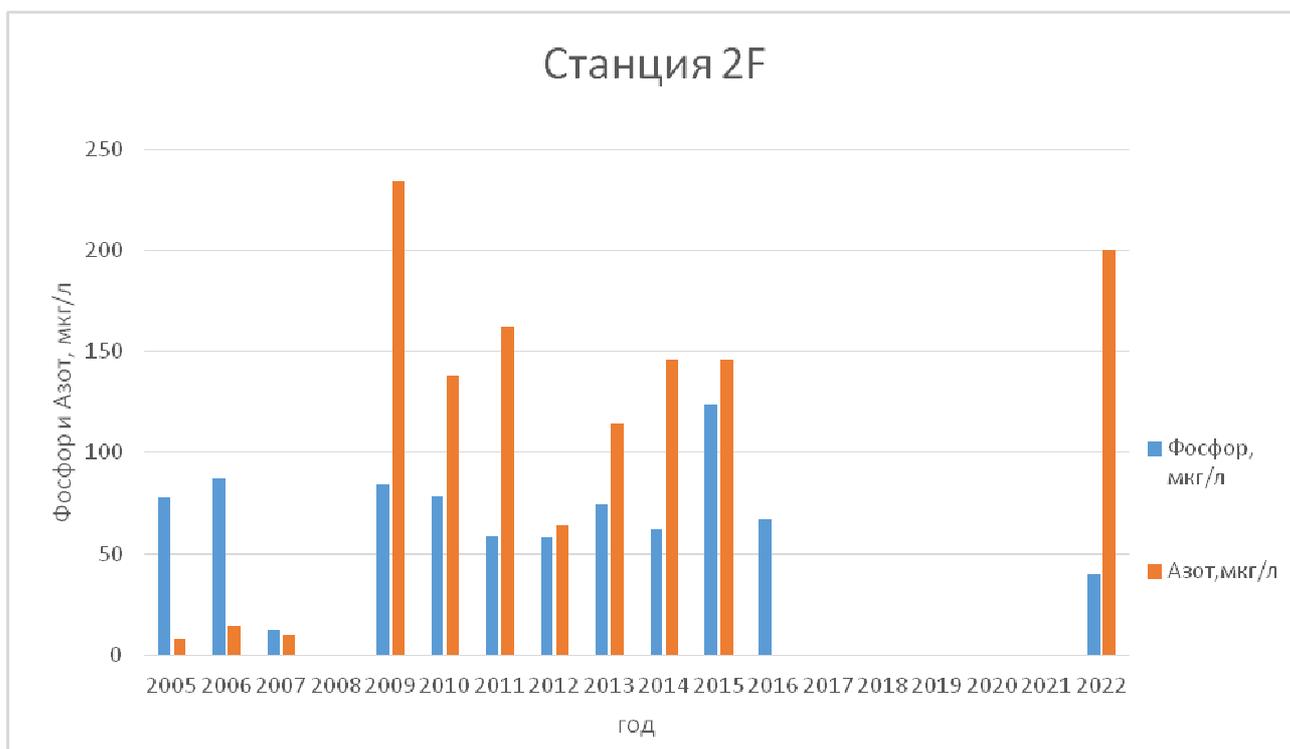


Рисунок 24 - Многолетняя изменчивость фосфора и азота на станции 2F

Анализ данных по растворенному кислороду, фосфору и азоту за период с 2005 по 2022 год позволяет выявить некоторые тренды и изменения концентрации этих веществ в Финском заливе.

Вывод по станции 2F, которая является мелкоглубинной:

Растворенный кислород (мл/л):

- Концентрация растворенного кислорода в Финском заливе варьировалась от 2,64 мл/л в 2010 году до 6,25 мл/л в 2007 году. В целом, наблюдалось некоторое колебание, но соответствие целевому значению HELCOM есть.

Фосфаты (мкг/л):

- Концентрация фосфора в заливе имела значительные изменения, варьируя от 12 мкг/л в 2007 году до 123,6 мкг/л в 2014 году.

Азот (мкг/л):

- Содержание азота в воде Финского залива также имела значительные колебания, с наблюдаемыми значениями от 8,03 мкг/л в 2005 году до 234,2 мкг/л в 2009 году (что является максимальным значением).

Есть пробелы по данным, начиная с 2016 года, заканчивая 2021 годом. Данные за 2022 год взяты из базы РГГМУ по станциям.

Станция 2ugms:

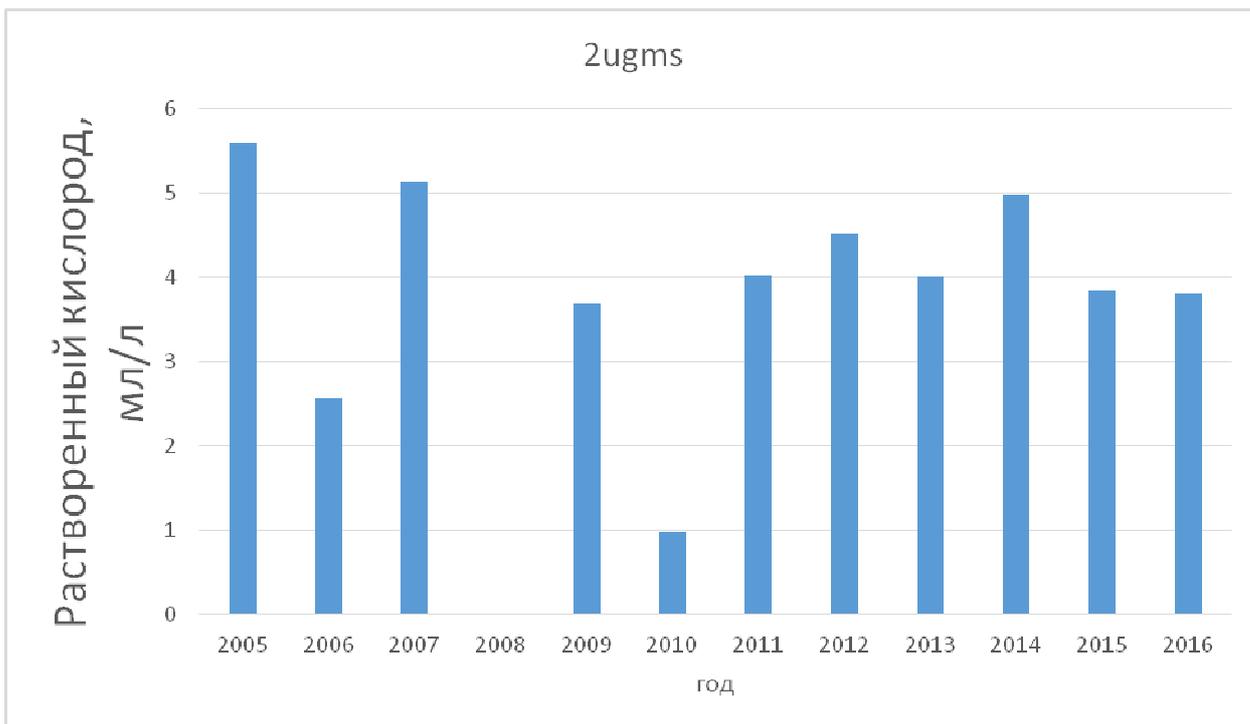


Рисунок 25 - Многолетняя изменчивость растворенного кислорода на станции 2UGMS

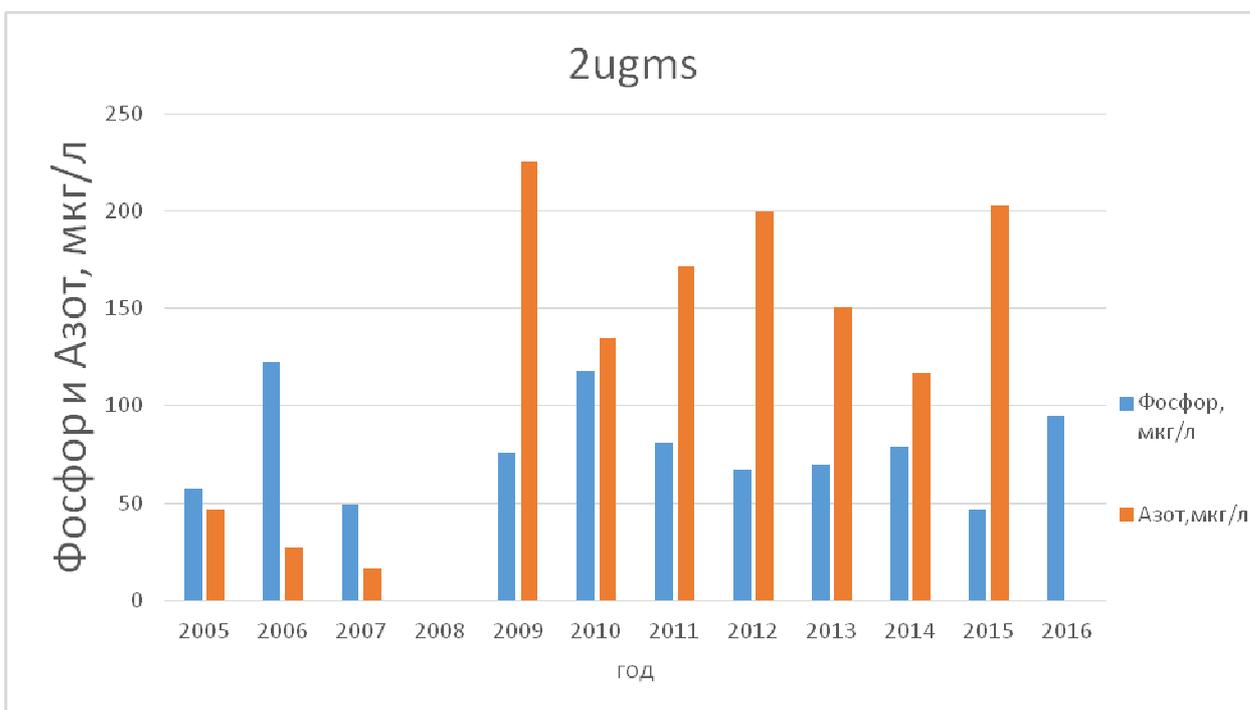


Рисунок 26 - Многолетняя изменчивость фосфора и азота на станции 2UGMS

Растворенный кислород (мл/л):

- В 2007 году было зафиксировано достаточно высокое значение - 5,12 мл/л, в то время как в 2010 году концентрация кислорода снизилась до 0,97 мл/л. Общая тенденция показывает переменные значения в разные года.

Фосфор (мкг/л):

- В 2006 году было замечено высокое значение - 122,3 мкг/л, а в 2015 году концентрация фосфора составляла 46,8 мкг/л. Общая тенденция указывает на изменчивость содержания фосфора.

Азот (мкг/л):

- В 2009 году было зафиксировано высокое значение - 225,2 мкг/л, в то время как в 2014 году концентрация составляла 79,1 мкг/л.

Станция 4ugms:

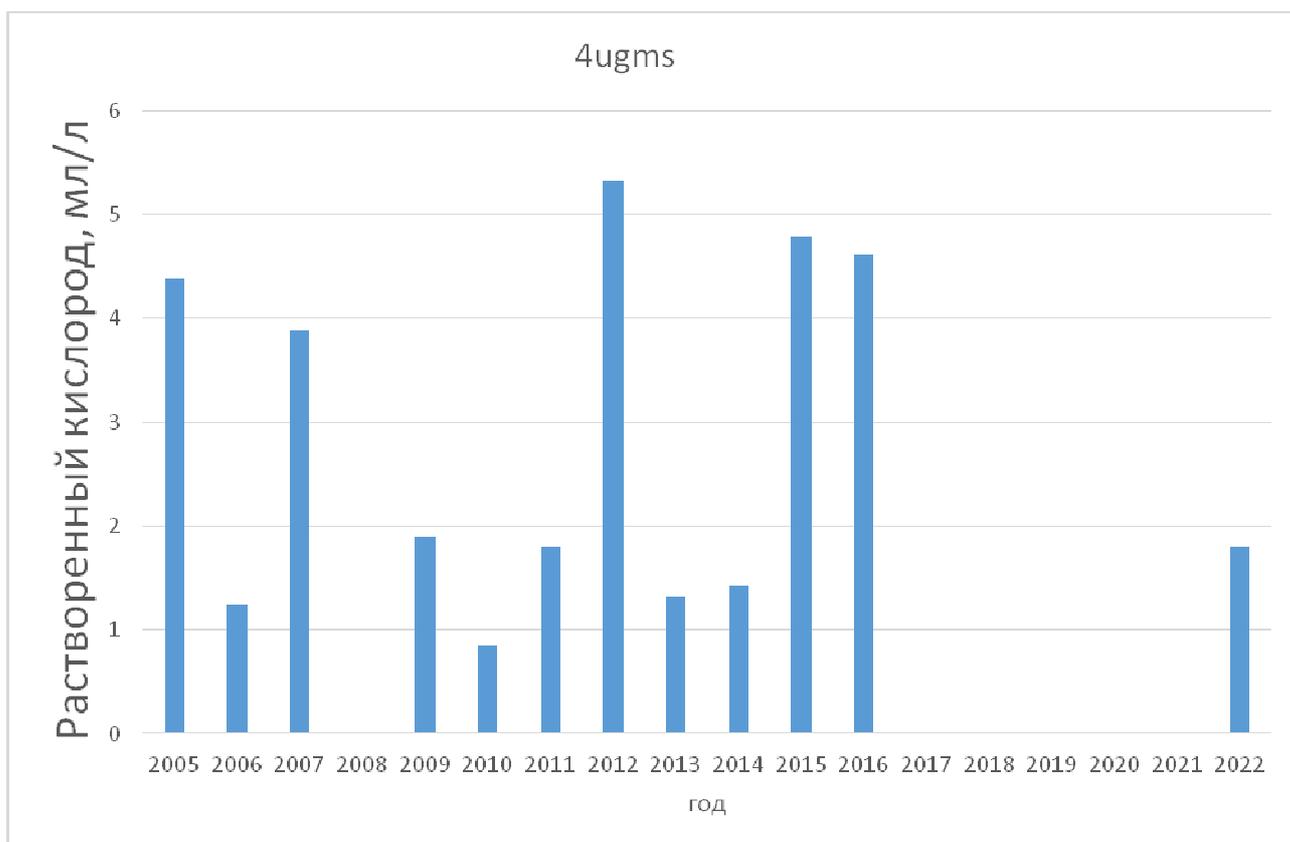


Рисунок 27 - Многолетняя изменчивость растворенного кислорода на станции 4UGMS

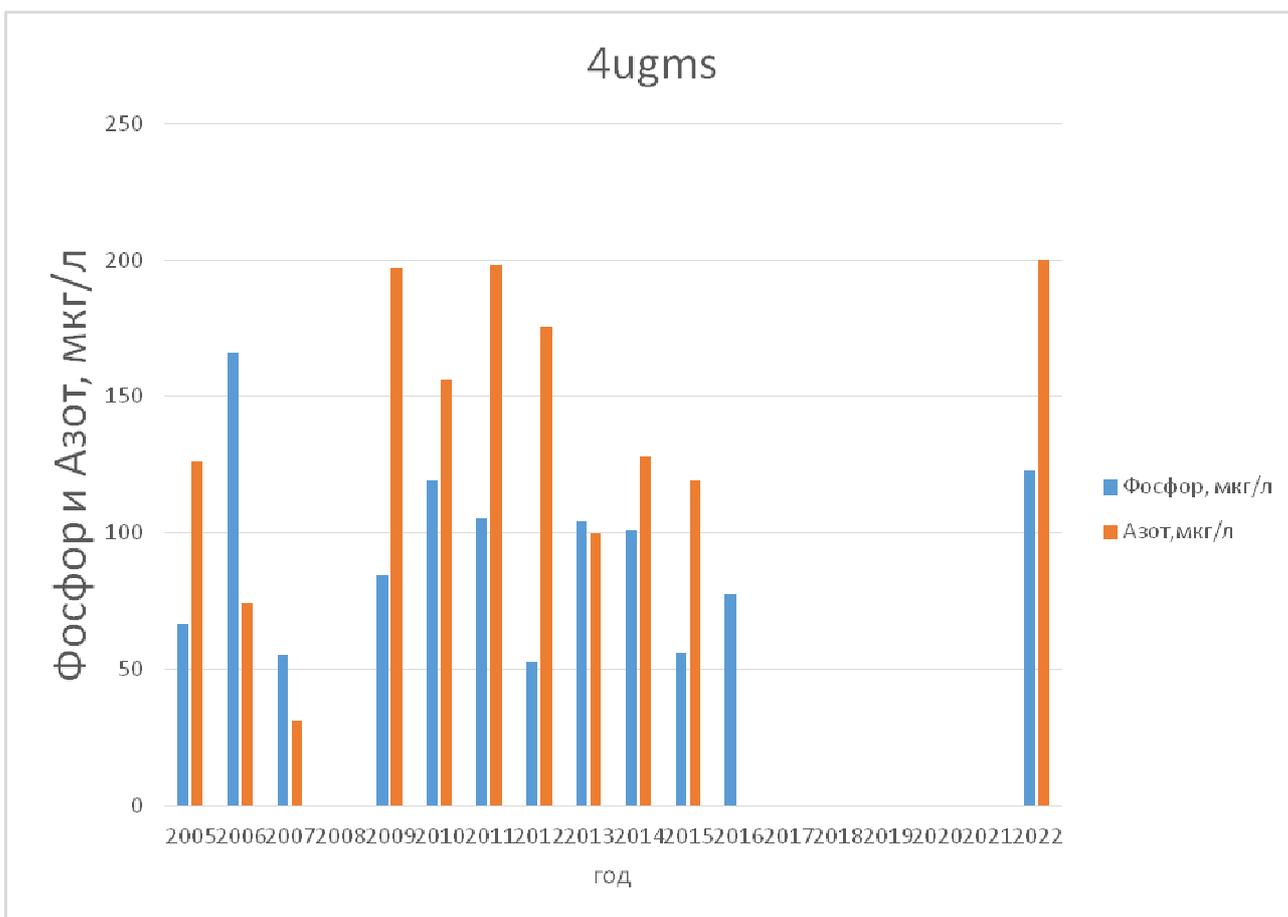


Рисунок 28 - Многолетняя изменчивость фосфора и азота на станции 4UGMS

Растворенный кислород (мл/л):

- В 2006 году было зарегистрировано низкое значение - 1,24 мл/л, в то время как в 2012 году концентрация достигла 5,33 мл/л, в среднем соответствует целевому значению ХЕЛКОМ.

Фосфор (мкг/л):

- В 2006 году было замечено высокое значение - 165,98 мкг/л, а в 2014 году содержание фосфора составило 56 мкг/л.

Азот (мкг/л):

- В 2009 году было зарегистрировано высокое значение - 197,5 мкг/л. В 2013 году концентрация азота составила 99,77 мкг/л.

Есть пробелы по данным, начиная с 2016 года, заканчивая 2021 годом. Данные за 2022 год взяты из базы РГГМУ по станциям.

Исходя из предоставленных данных, можно сделать вывод по анализу индикаторов эвтрофирования Финского залива. Согласно представленной информации на рисунке 18, можно сделать вывод о том, что если концентрация растворенного кислорода в Финском заливе соответствует установленному

целевому значению, то воды этого района будут классифицироваться как "грязные", согласно российским стандартам качества и относиться к V классу.

Растворенный кислород			
Очень чистые, I	лето, мг/л	зима, мг/л	% насыщения
Чистые, II	9	14-13	95
Умеренно загрязненные, III	8	12-11	80
Загрязненные, IV	7-6	10-9	70
Грязные, V	5-4	5-4	60
Очень грязные, VI	3-2	5-1	30

Рисунок 29 - Уровень загрязнения воды и класс качества [39].

Если концентрация хлорофилла- α в водах Финского залива будет соответствовать установленному целевому значению, то согласно всем рассмотренным классификациям, эти воды будут относиться к категории мезотрофных. Мезотрофным можно считать водоём, в котором концентрация хлорофилла- α от 2,3 до 9 мкг/л [18]. Когда вода имеет высокую прозрачность, мы обычно считаем ее более чистой, в то время как вода с низкой может содержать больше веществ, включая хлорофилл. В течение периода с 2001 по 2021 год в Финском заливе наблюдалось изменение прозрачности водоёма, которая варьировалась с 1,3 до 5,6 метров (мезотрофный тип по Цветковой). Такое снижение прозрачности может быть связано с увеличением концентрации хлорофилла- α [31]. HELCOM отмечает, что поступление фосфора в Финский залив сократилось на 26% с 2014 года, а также было отмечено снижение нагрузки азотом на 12%. Эти положительные изменения свидетельствуют о успешном сотрудничестве между странами-участницами HELCOM в последние годы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эвтрофикация является серьезной экологической проблемой, которая вызывает значительные негативные изменения во всей экосистеме водоема. В особенности, для Балтийского моря и Финского залива эта проблема является одной из главных. Эвтрофирование в Финском заливе имеет как антропогенный, так и естественный характер, влияющий на него физико-географическое положение. При оценке эвтрофирования Финского залива было выявлено, что ситуация не улучшилась за последние годы. Это свидетельствует о серьезных проблемах в качестве водных ресурсов и экологической стабильности этого региона.

Исходя из выполненных исследований, приходим к таким выводам, что после 2011 года в Финский залив произошли заметные изменения, которые выражаются в значительном снижении биомассы фитопланктона в глубоководных районах и значительном повышении в мелководных районах, но при этом остается высокое содержание азота и фосфора как в придонном и фотическом слоях. Увеличение концентрации нитритов и нитратов в придонных водах является дополнительным подтверждением, что в экосистеме Финского залива происходят серьезные изменения. При уменьшении концентрации азота и фосфора с поверхностного слоя наблюдается снижение биомассы фитопланктона и концентрации хлорофилла «а», в то время как концентрация биогенных элементов увеличивается. Возможно, это связано с распреснением воды, что приводит к уменьшению биомассы фитопланктона. Однако, следует учитывать, что изменение климата и воздействие представителей флоры и фауны (которые не проживают в данном месте) также могут оказывать заметное влияние на экосистему залива. Поэтому, при анализе данных необходимо учитывать, как климатические, так и биологические факторы.

В ходе работы был проведен анализ документации HELCOM и сравнение старого и нового Планов действий по Балтийскому морю. В рамках ПДБМ 2007 были определены основные направления, в том числе проблема эвтрофикации, ее экологические задачи и соответствующие индикаторы. Также были изучены максимально допустимые поступления биогенных элементов в залив. В 2013 году были установлены целевые значения индикаторов для акваторий Балтийского моря. Однако, к 2021 году не удалось достичь поставленных целей, что привело к обновлению ПДБМ, который обещает к 2030 году снизить показатели биогенов. В новой версии Плана основные направления работы HELCOM остались неизменными, но были обновлены данные о максимально допустимых поступлениях биогенов и добавлены цели управления. Так же отметили, что значительная изменчивость в превышении целевых значений

индикаторов эвтрофирования в восточной части залива, что может быть связано с различиями в морфометрических характеристиках этих акваторий, а также в формировании гидрохимического и гидробиологического режима. Для более точной оценки ситуации необходимо учитывать эти различия и проводить дополнительные исследования. Была также сформулирована повестка дня, указывающая на необходимость соблюдения рекомендаций HELCOM всеми странами, которые оказывают влияние на экосистему Балтийского моря, для достижения хорошего экологического статуса.

Результаты изучения материала показали, что ГУП "Водоканал Санкт-Петербурга" играет важную роль в борьбе с загрязнителями Финского залива. В настоящее время активно решаются проблемы только двух (фосфор и азот) из девятнадцати выявленных загрязнителей. Несмотря на некоторые улучшения, они оказывают незначительное влияние на степень эвтрофирования, и целевые значения индикаторов не достигнуты. Проанализированы соответствия значений индикаторов по целевым значениям на основе имеющихся данных HELCOM, ГУП "Водоканал Санкт-Петербурга", станций из базы данных РГГМУ. Было проведено сравнение целевых значений индикаторов с 2010-2012 по 2020-2022 года. В результате можно сделать вывод, что концентрация после очистки стала ниже, благодаря новым технологиям водоканала.

Сделан анализ по индикаторам эвтрофирования в акватории Финского залива. Было выявлено, что единственный целевой показатель, которого смогли достичь в водоёме, это растворенный кислород, который на протяжении 10 лет, начиная с 2010 года был в цели, если оценивать по HELCOM. Самые большие отклонения от целевых индикаторов оказались у биогенных элементов и хлорофилла. Сравнивая данные многолетних наблюдений, сделан вывод о том, что на протяжении 15 лет, подтверждается положительный тренд изменчивости фосфатов и хлорофилла, но меры, принятые HELCOM, не привели к большому изменению концентрации, из-за донных отложений и климатических условий. Выдвинута гипотеза о том, чтобы установить отдельные целевые значения индикаторов эвтрофирования по глубоководным и мелководным районам.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Волощук, Е. В. Оценка влияния абиотических и биотических факторов на экологическое состояние придонных вод и донных отложений Финского залива в условиях изменения климата : специальность 25.00.36 "Геоэкология (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук / Волощук Екатерина Васильевна. – Санкт-Петербург, 2017. – 22 с. – EDN ZQDITD.

[2] <https://geographyofrussia.com/morya-rossii-baltijskoe-more/>

[3] <https://russiaregions.ru/finskij-zaliv/finskij-zaliv-podrobnaya-informatsiya-opisanie-foto-video>

[4] Усенков, С. М. Донные отложения как индикаторы загрязнения восточной части Финского залива / С. М. Усенков // Навигация и гидрография. – 2005. – № 20-21. – С. 163-174. – EDN NDHEAH.

[5] Клячкин, С. В. Моделирование сезонного хода и краткосрочный прогноз ледовых условий Восточной части Финского залива : специальность 11.00.08 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук / Клячкин Сергей Владимирович. – Санкт-Петербург, 1996. – 25 с. – EDN ZJKUFF.

[6] Михайлов, А.Е. (1997). Общая циркуляция вод [Текст] / А.Е. Михайлов, Е.С. Чернышева // Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря. Вып. 5. Экосистемные модели. Оценка современного состояния Финского залива. Ч.2. / Под ред. И.Н. Давидана, О.П. Савчука.– СПб.: Гидрометеиздат, 1997. – С.245 – 261.

[7] Еремина Т.Р. - Балтийское море в настоящем и будущем – климатические изменения и антропогенное воздействие [Текст]. –СПб., Изд-во «Лема», 2016. –с.34-51.

[8] Белова, В. А. Проблема эвтрофикации водоемов / В. А. Белова, Я. П. Валявский // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сборник статей по материалам 72-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2016 год, Краснодар, 01 февраля – 01 2017 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2017. – С. 119-121. – EDN ZAEVDB.

[9] https://www.researchgate.net/figure/Conceptual-model-of-eutrophication-The-arrows-indicate-the-interactions-between_fig3_222717213

- [10] Анализ влияния климатических изменений и антропогенной деятельности на гидрометеорологический режим и состояние экосистемы Финского залива Балтийского моря, Ерёмина Т.В., Волощук Е.В. 2023
- [11] Владимирова О.М., Еремина Т.Р., Исаев А.В., Рябченко В.А., Савчук О.П. Модельные оценки составляющих баланса азота и фосфора в экосистеме Финского залива// Ученые записки РГГМУ № 53, с. 72-82, 2018
- [12] Еремина, Т. Р. Влияние изменчивости климата на кислородный режим глубинных вод восточной части Финского залива / Т. Р. Еремина, А. А. Максимов, Е. В. Волощук // Океанология. – 2012. – Т. 52, № 6. – С. 836. – EDN PNPKN.
- [13] http://www.helcom.ru/helcom_documents/pdbm
- [14] http://www.helcom.ru/media/Draft%20updated%20Baltic%20Sea%20Action%20Plan_RU.pdf
- [15] <https://indicators.helcom.fi/>
- [16] Ершова, А. А. Оценка состояния Финского залива по индикаторам эвтрофирования Хелком / А. А. Ершова, К. Д. Коробченкова, Ю. С. Агранова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2018. – № 51. – С. 137-149. – EDN XZTQAX.
- [17] Особенности кислородных условий и режима биогенных соединений в восточной части Финского залива летом 2022 года / Т. Р. Еремина, Е. В. Волощук, Е. С. Бубнова [и др.] // Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022 : Труды XI Международной научно-практической конференции, Москва, 24–28 октября 2022 года. Том II (IV). – Тверь: Общество с ограниченной ответственностью "ПолиПРЕСС", 2022. – С. 148-153. – EDN BSGDDV.
- [18] Неверова-Дзиопак, Е. В. Оценка трофического состояния поверхностных вод / Е. В. Неверова-Дзиопак, Л. И. Цветкова ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. – 176 с. – ISBN 978-5-9227-0999-6. – EDN KOLTDW.
- [19] http://stateofthebalticsea.helcom.fi/wp-content/uploads/2018/07/HELCOM_Thematic-assessment-of-eutrophication-2011-2016_pre-publication.pdf

- [20] <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/10/BSEP133.pdf>
- [21] https://www.studmed.ru/view/sauskan-vi-ekologiya-i-biologicheskaya-produktivnost-okeana_41c51bb1291.html?page=2
- [22] <https://www.ibiw.ru/index.php?p=edu/eco/eco6>
- [23] Рабинович Ю., Говинджи К. 1967. Роль хлорофилла в фотосинтезе // Молекулы и клетки. № 2. с. 72–83
- [24] <https://files.stroyinf.ru/Data/105/10583.pdf>
- [25] http://resources.krc.karelia.ru/water/doc/papers/Water_envir_2011_080-82.pdf
- [26] Конференция «Морские исследования и образование», Москва 24-29 октября 2022 года
- [27] Модельные оценки составляющих баланса азота и фосфора в экосистеме Финского залива / О. М. Владимирова, Т. Р. Еремина, А. В. Исаев [и др.] // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2018. – № 53. – С. 72-82. – EDN YWMPIL.
- [28] Хрисанов Н. И., Осипов Г. К. 1993. Управление эвтрофированием водоемов // Санкт-Петербург, Гидрометиздат. с. 5-6.
- [29] http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-090542.pdf
- [30] Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Под ред. В. А. Абакумова. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. — 318 с
- [31] Шатрова, О. В. Анализ изменчивости параметров эвтрофирования в Финском заливе по данным натуральных наблюдений / О. В. Шатрова, Т. Р. Еремина, Е. К. Ланге // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2016. – № 44. – С. 129-140. – EDN WWMTDV
- [32] <https://elibrary.ru/item.asp?id=29708377>
- [33] https://www.vodokanal.spb.ru/kanalizovanie/ekologiya_baltijskogo_morya/
- [34] <https://files.stroyinf.ru/Data/105/10583.pdf>
- [35] Особенности кислородных условий и режима биогенных соединений в восточной части Финского залива летом 2022 года / Т. Р. Еремина, Е. В. Волощук, Е. С. Бубнова [и др.] // Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022 : Труды XI Международной научно-практической конференции, Москва, 24–28 октября 2022 года. Том II (IV). – Тверь:

Общество с ограниченной ответственностью "ПолиПРЕСС", 2022. – С. 148-153. – EDN BSGDDV.

[36] Боровкова, К. А. Исследование суточной изменчивости потенциальной фотосинтетической активности фитопланктона на примере Финского залива и Юго-Восточной части Балтийского моря флуоресцентным методом / К. А. Боровкова, С. А. Мошаров, В. А. Кречик // Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022 : Труды XI Международной научно-практической конференции, Москва, 24–28 октября 2022 года. Том III (IV). – Тверь: Общество с ограниченной ответственностью "ПолиПРЕСС", 2022. – С. 306-310. – EDN BSOIKX.

[37] http://www.resetilovs.lv/image/File/1_Normi_Rossija_Helkom.pdf

[38] <https://global-ocean.ru/geografiya/finskij-zaliv-gde-naxoditsya-fiziko-geograficheskaya-xarakteristika-kakie-strany-omyvaet/>

[39] <https://alminda.ru/about/4957/14283/14304/>

