



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления
прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

«Влияние изменения климата на экосистему Балтийского моря»

Исполнитель: Хасанова Виктория Рафаэлевна

Руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент

Ерёмина Татьяна Рэмовна

«К защите допускаю»

И.о. заведующего кафедрой _____


(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«04» 06 2024 г.

г. Санкт-Петербург

2024

Оглавление

Введение	2
1. Потепление климата в Балтийском море	4
1.1 Физико-географическая характеристика района исследования	4
1.2 Условия формирования ХПС.	7
1.3 Климатические изменения в Балтийском море.	8
1.4 Влияние изменения климата на экосистему Финского залива	10
2. Холодный промежуточный слой.....	12
2.1 Метод выделения и материалы	12
2.2 Вертикальная структура ХПС по данным за многолетний период.....	14
2.3 Анализ характеристик ХПС.	18
3. Влияние ХПС на экосистему.....	22
3.1 Влияние изменчивости ХПС на гидрохимические характеристики Финского залива.....	22
3.2 Влияние ХПС и гидрохимических характеристик района на биомассу фитопланктона.	30
3.3 Анализ влияния на экосистему.	33
Заключение	36
Список литературы.	37

Введение

Одним из главных компонентов природной среды является климат, его влияние на растительность, животный мир, а также на распределение водных ресурсов немыслимо.

Изменение климата – проблема, с которой столкнулось всё человечество, на сегодняшний день она является одной из важнейших проблем. Изучать данную проблему необходимо, а также необходимо держать под четким контролем процессы, на которые она влияет.

Балтийское море окружено множеством Европейских стран, поэтому за его гидрофизическими характеристиками ведется постоянный контроль.

Вместе с ростом средней температуры атмосферного воздуха в регионе, в Балтийском море изменяются такие характеристики, как температура воды, соленость, уровень, ледяной покров и гидрохимический состав вод.

Особое воздействие на экосистему Балтийского моря оказывает холодный промежуточный слой (ХПС), который по характеристикам заметно отличается от выше- и нижележащих слоев, что является основой его выделения в вертикальной термохалинной структуре вод.

Балтийское море имеет верхний распресненный реками слой и нижележащие соленые и относительно теплые воды атлантического океана, поэтому выделение ХПС на вертикальных профилях температуры воды возможно только в теплое время года, когда наиболее ярко выражена верхняя граница сезонного термоклина.

Целью данной выпускной квалификационной работы является исследование изменчивости ХПС и его влияния на экосистему Балтийского моря.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Применить методику выделения ХПС в Финском заливе Балтийского моря;
2. Провести анализ экспедиционных данных, полученных со станции 4ugms,
3. Выявить вертикальную структуру ХПС по различным параметрам, определить диапазоны изменения основных характеристик (температуры, солености, плотности);
4. Оценить влияние ХПС на экосистему Финского залива.

1. Потепление климата в Балтийском море

1.1 Физико-географическая характеристика района исследования

Балтийское море – средиземное, внутриматериковое море, относящееся к бассейну Атлантического океана. Оно расположено между параллелями $65^{\circ}56'$ и $54^{\circ}46'$ с.ш. и меридианами $9^{\circ}57'$ и $30^{\circ}00'$ в.д. Связь с океаном осуществляется через проливы Каттегат, Скагеррак, Датские (Малый и Большой Белт и Зунд) и Северное море. В связи с тем, что водообмен с Северным морем ограничен Датскими проливами и далее проливами Каттегат и Скагеррак, небольших глубин и значительного пресноводного баланса, Балтика – солоноватый водоем. [1] Оно омывает берега таких стран, как Россия, Эстония, Латвия, Дания, Литва, Польша, Германия, Швеция.

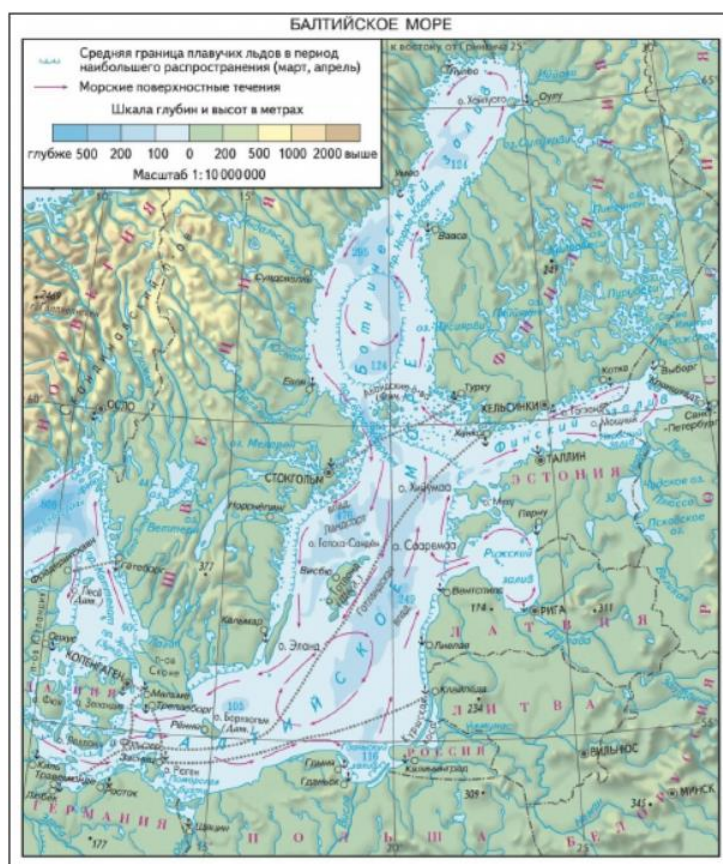


Рисунок 1.1 Карта Балтийского моря [2]

За счёт того, что Балтийское море практически со всех сторон окружено сушей, оно относится к типу внутренних морей. Самая северная точка расположена на $65^{\circ}58'$ с.ш., а самая южная – на $53^{\circ}39'$ с.ш.. Площадь Балтийского моря, включая проливы составляет 425,3 тыс.км², а объем воды – 20,2 тыс.км³. Средняя глубина моря 51 м, а максимальная – 459 м. Большую часть (60% площади) занимают глубины до 50 метров, а глубины свыше 200 метров составляют лишь 0,4% площади моря.

Балтийское море – одна из наиболее изученных частей Мирового океана, это обусловлено тем, что море окружено развитыми Европейскими странами и с давних времен активно используется для торговли и мореплавания. Гидрометеорологические и гидрохимические характеристики активно исследуются прибрежными странами.

Уровень Балтийского моря формируется под воздействием многих факторов, к ним относятся: водообмен с Северным морем, атмосферные осадки и испарение с поверхности моря, речной сток, воздействие ветра, изменения атмосферного давления, приливообразующие силы Луны и Солнца, перераспределение полей плотности, циркуляция вод [1].

Речной сток играет важную роль в формировании режима моря, так как с океаном море связано лишь узкими мелководными проливами. В Балтийское море впадает около 250 рек, за год они приносят в море примерно 433 км³ воды, а это 2,1% от общего объема моря. Реки, которые вносят наибольший вклад: Нева протяженностью 74 км, с площадью водосбора 281 км², со стоком 2530 км³/с, Висла, длиной 1068 км, площадью водосбора 193 км², стоком 1030 км³/с, Западная Двина, протяженностью 1020 км, площадью водосбора 88 км², сток 730 км³/с. Сток распределяется по районам не равномерно, например в Финском заливе он равен 110 км³/год, в Рижском – 37, а в центральной части 112 км³/год [3]. Обильный речной сток приносит в море большое количество биогенных веществ, таких как фосфор и азот. Чрезмерное количество биогенов

негативно влияет на общее состояние вод моря и является одним из главных факторов, влияющих на эвтрофикацию.

Помимо речного стока, фосфор и азот в Балтийское море поступает из донных отложений, увеличивая тем самым первичную продуктивность.

Под воздействием солеформирующих факторов – атмосферной циркуляции, речного стока и водообмена с Северным морем – создается устойчивая плотностная стратификация, которая определяет гидрохимический и гидрологический режимы. В формировании гидрохимического режима, помимо физических процессов, приводящих к образованию пикноклина, участвуют и биохимические: продуцирование в процессе фотосинтеза, биологический круговорот веществ и деструкция органического вещества. Структура гидрохимических параметров Балтийского моря, как и термохалинная структура, представлены двумя зонами: поверхностным и глубинным слоем [1].

Балтийское море одно из самых слабосоленых морей мира. Это объясняется положением моря, обильными осадками, и тем что в море впадает огромное количество рек, приносящих с собой пресные воды. Соленость воды в Балтике изменяется в широких диапазонах, так, средняя соленость поверхностных вод в районе о. Борнхольм равна 8‰, в то время как в Финском заливе она меняется в пределах 2-3‰. Воды глубинного слоя наиболее соленые – от 15-20‰.

Финский залив, находящийся на востоке – самый большой залив моря, он омывает берега России, Финляндии и Эстонии и является важным объектом исследования и контроля, его протяженность составляет 380 километров, а размеры акватории 29505 км². Объем воды в Финском заливе 1120 км³, что составляет 5% от общего объема водной массы Балтийского моря. Площадь водосборного бассейна – 421 тыс. км³, приток воды примерно – 109 км³ в год.[4] Залив достаточно мелководен, его средняя глубина – 38 метров, максимальная – 121 метр.

Восточная часть Финского залива наиболее подвержена процессам эвтрофикации, основной причиной данного процесса являются колоссальные

поступления азота и фосфора из различных источников и слабый водообмен с центральной частью Балтики. Эвтрофикация оказывает огромное воздействие на экосистему, бескислородная среда является губительной для большинства организмов.

1.2 Условия формирования ХПС.

В термохалинной структуре вод средиземных морей выделяется два слоя, слой поверхностных теплых распресненных вод и нижний осолоненный холодный слой. Однако в Балтийском море летом, помимо двух основных слоев наблюдается промежуточный слой, который имеет аномально низкую температуру, повышенную соленость и высокое насыщение кислородом [5].

Таким образом в Балтийском море сверху находится прогретый (за теплые месяцы) поверхностный слой, затем ХПС, и тяжелые, но теплые атлантические воды.

Образование ХПС связано с зимним охлаждением водных масс. Процесс формирования холодных промежуточных вод зависит от нескольких причин: абсолютных значений температуры воды на поверхности моря в зимний период, температуры в зоне расположения зимнего термоклина в конце гидрологической зимы, от глубины конвективного перемешивания в весенний период, от степени ветрового перемешивания и от прогрева в весенне-летний сезон. Кроме того, в Южной Балтике на параметры холодного промежуточного слоя существенное влияние оказывают поступления относительно тёплых североморских вод [6].

Холодный промежуточный слой начинает формироваться одновременно с сезонным термоклином, с конца апреля – начала мая. Лучше всего ХПС выделяется в летний период, а с исчезновением сезонного термоклина, примерно в конце ноября, он пропадает. По мощности ХПС максимально развивается в весенний период (около 30-40 м) и наблюдается практически по всей акватории. Ось ядра в этот период расположена на глубине около 40-50 м. Летом мощность

ХПС снижается (до 20-30 м), при этом ось ядра заглубляется на глубины 50-60 м. Осенью мощность ХПС не превышает 20 м, а ядро находится на своей максимальной глубине (примерно до 60 м) [7].

1.3 Климатические изменения в Балтийском море.

Балтийское море – это полузамкнутый бассейн, который находится под влиянием суши и крупномасштабных атмосферных процессов. Балтика – солоноватый водоем [1]. Многолетний анализ климата показал, что потепление в регионе Балтийского моря будет длиться на протяжении всего двадцать первого века и в первую очередь оно будет влиять на температуру воды и ледовые условия [8, 9]. Помимо этого, наблюдаются значимые изменения в гидрологическом цикле, которые, по прогнозам, будут становиться всё более ярко выраженными в следующие десятилетия. Основные гидрометеорологические характеристики, на которые влияет изменение климата, - это повышение температуры поверхностного слоя моря, изменение речного стока, распреснение, снижение продолжительности ледового периода и площади ледообразования [8, 9].

В 80-е годы прошлого века положительные тренды температуры поверхности Балтийского моря четко прослеживаются по данным дистанционного зондирования, натурным наблюдениям, а также по модельным оценкам [12].

По данным многолетних наблюдений за температурой поверхности воды определили период, когда рост температуры стал значительным. Например, на основе ежедневных наблюдений с маяков в датских проливах установили, что средняя температура поверхности воды за 10 лет существенно не изменялась в период с 1904 г. по 1985 г., средние значения равнялись 8,1-9,1°C, после 1985 значения температуры поверхности воды стали расти, и на 1998 г. среднее значение достигло 9,8 °C, таким образом, сравнивая с предыдущим периодом,

температура возросла почти на 8% [8]. За период с 1982 по 2012 г. в Балтийском море происходило повышение температуры поверхности воды, к 2012 году море прогрелось на 1-2 °С если рассматривать целый год, и почти на 5 °С, при наблюдении за теплыми месяцами (июль-сентябрь) [10].

На основе данных спутникового зондирования в период с начала 1993 г. по конец 2017 г [11]. рассчитывались линейные тренды температуры поверхности воды (ТПВ) для всей Балтики. Средняя тенденция изменения поверхностной температуры моря (к востоку от 9° в. д.) составила $0,043 \pm 0,01$ °С/год («±» — стандартное отклонение), что дает среднее потепление на 1,1 °С за рассматриваемый период [12].

По данным инфракрасных спутниковых снимков за период 1990—2008 гг. заметно повышение температуры от 0,8 до 1 °С, самых высоких значений линейный тренд достигал в Ботническом и Финском заливах. В центральной части моря повышение температуры составило 0,5—0,9 °С/10 лет [12].

На рисунке 2 показаны данные наибольшей площади ледяного покрова в течении года начиная с 1720 г., их предоставил Финский метеорологический институт. Заметна значительная межгодовая изменчивость, наличие всех градаций ледовитости - очень умеренная, умеренная, средняя, сильная и экстремально сильная [12].

Судя по расчетам моделей, до конца 21 века в Балтийском море температура воды продолжит расти, вследствие чего сократится площадь и период ледяного покрова. В процессах судоходства и портовой деятельности это поспособствует снижению затрат на использование ледокольного флота для проводки судов в период зимы [12].

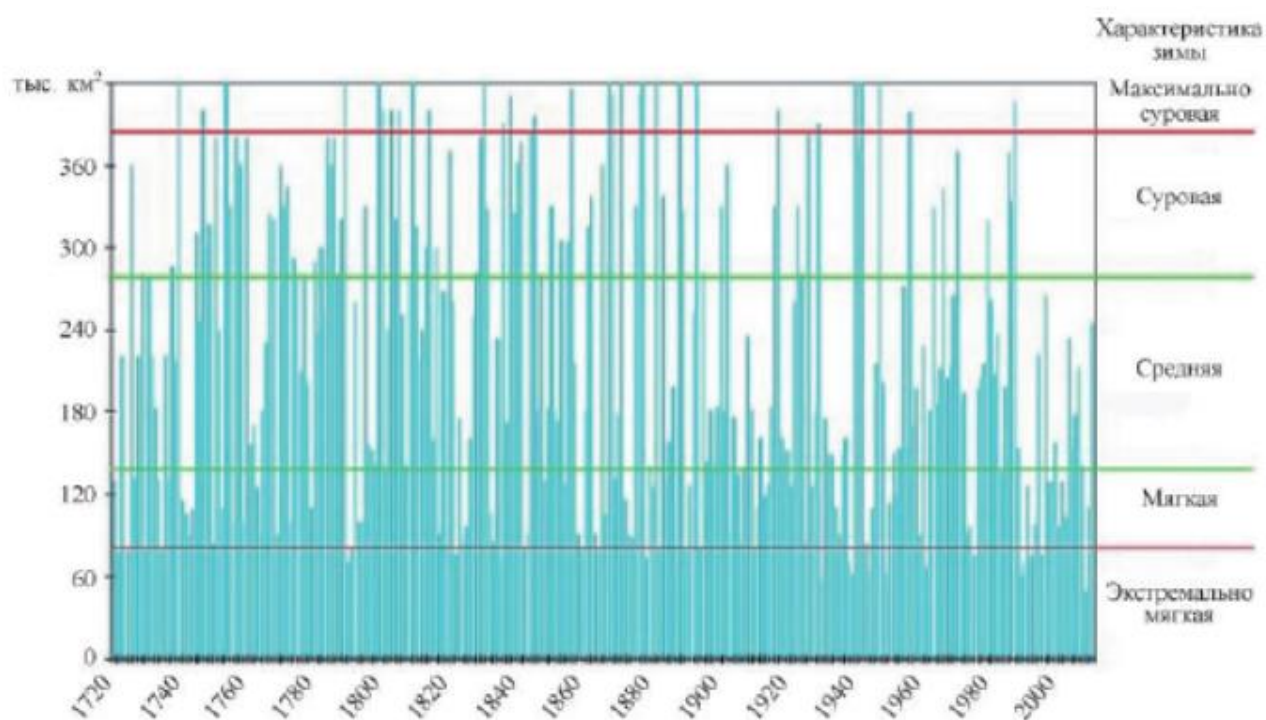


Рисунок 1.2 Многолетняя изменчивость максимальной площади ледяного покрова в Балтийском море за период исторических наблюдений с 1720 по 2010 г [12].

1.4 Влияние изменения климата на экосистему Финского залива

Потепление климата в последние десятилетия оказывало значительное влияние на Финский залив. Финский залив – одна из наиболее подверженных эвтрофикации акваторий Балтийского моря, в нем повышенное содержание биогенных веществ, приходящих со стоком реки Невы. Нева определяет гидрологический режим Финского залива, она является связующим звеном залива с Ладожским озером, а также приносит в акваторию 95% от общего речного стока. Уже долгое время проводится комплекс мероприятий, направленный на снижение биогенной нагрузки на водоем, реализуются меры, предусмотренные в Плане действий, это должно было привести к снижению уровня эвтрофикации и улучшения качества вод. Несмотря на предпринятые меры, всё-таки выполняемые исследования показали, что ожидаемого улучшения не случилось [12].

Главным фактором, влияющим на структурно-функциональные характеристики фитопланктона в восточной части Финского залива, остается термохалинный режим [12].

Наиболее заметно влияние изменения климата на биоресурсы. Температура играет важную роль в процессах жизнедеятельности рыб, она влияет кормовую базу, ареал обитания, межвидовую конкуренцию, а также потепление климата может положительно отразиться на процессе их роста [13].

Однако, на сообщества рыб также влияют кислородные условия залива, и если температура поверхности моря к концу текущего столетия возрастет, по сравнению с её современным значением (в 3 и 1,5 раза соответственно, по существующим перспективным оценкам), соленость уменьшится, а эвтрофикация увеличится, то эффективность рыболовного сектора уменьшится[13].

2. Холодный промежуточный слой

2.1 Метод выделения и материалы

Основой для расчетов послужили данные, собранные в ходе экспедиционных исследований РГГМУ, в период с 2004 по 2016 год (за 2008 год данные отсутствуют). Измерения снимались с глубоководной станции 4ugms в июле-августе, выбор именно этой станции обусловлен тем, что измерения на ней проводились практически каждый год.

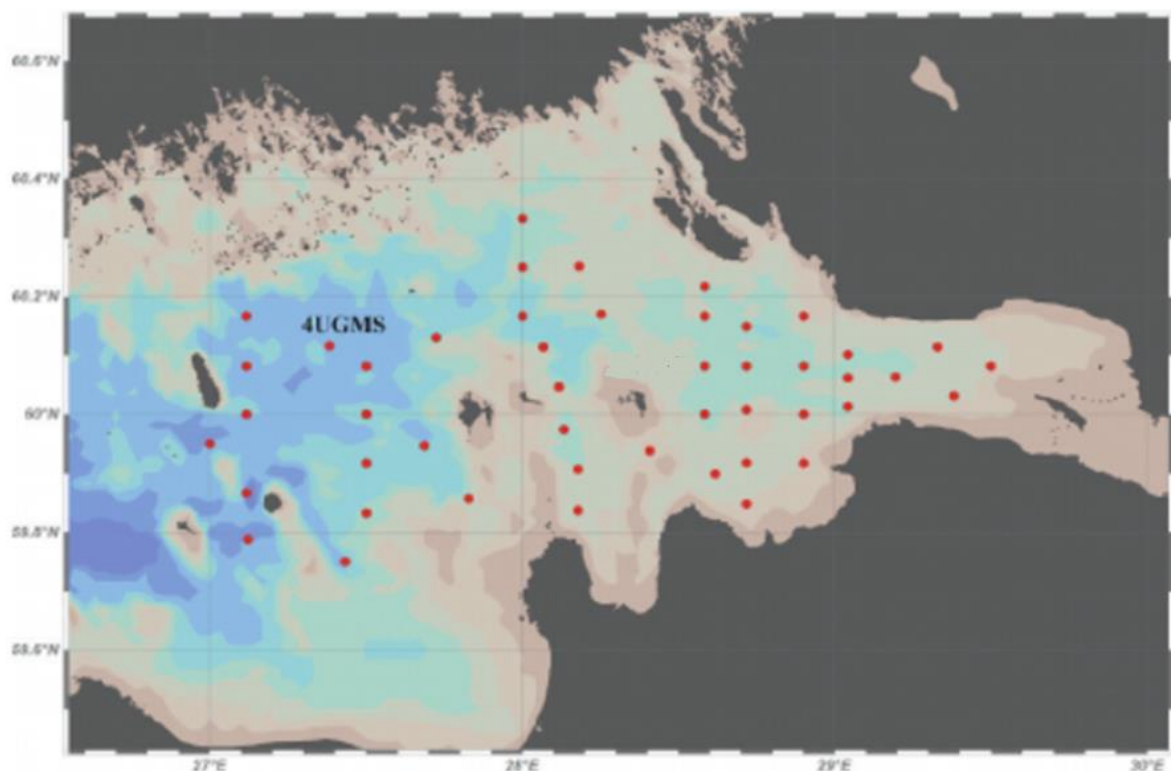


Рисунок 2.1 Станция 4ugms на карте расположения станций отбора проб РГГМУ

В настоящее время четкого критерия выделения ХПС не предусмотрено, но за счет того, что наиболее выраженной особенностью вертикальной структуры в Балтийском море является холодный промежуточный слой, а аномально низкая температура воды может быть хорошим естественным

трассером для процессов формирования и транспортировки вод, для определения границ ХПС использовалась вертикальная структура температуры воды [14].

Была разработана методика выделения ХПС в Балтийском море. Согласно ей, ХПС в Балтийском море начинается с глубины, на котором температура имеет максимальный отрицательный градиент по вертикали. Ядро ХПС располагается на глубине с минимальной температурой [14].

Для того, чтобы определить ХПС в Финском заливе, воспользуемся анализом вертикальных профилей температуры и плотности в наиболее глубокой части залива (для того, чтобы вертикальная структура не была искажена возможным влиянием берегов) в наиболее теплые месяцы года (когда ХПС лучше всего выделяется) [14].

2.2 Вертикальная структура ХПС по данным за многолетний период.

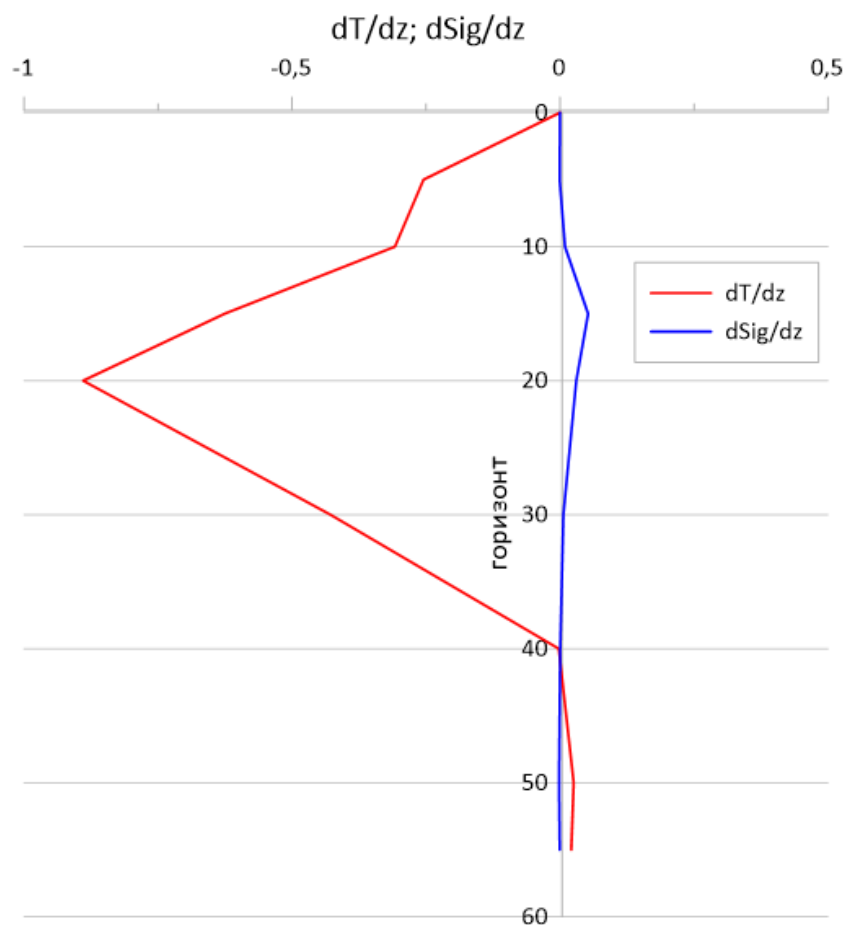


Рисунок 2.2 Осредненные градиенты температуры и плотности по вертикали за период с 2004 по 2016 год ($^\circ\text{C}/\text{м}$, $\text{кг}/\text{м}^3/\text{м}$) (за исключением 2008).

По профилю dT/dz (рис.4) видно, что наибольший отрицательный градиент температуры наблюдался на горизонте 20 метров ($-0,89^\circ\text{C}/\text{м}$), из чего следует, что верхняя граница ХПС в среднем была на нём. Наибольший положительный градиент температуры наблюдался на горизонте 50 метров ($0,03^\circ\text{C}/\text{м}$), этот горизонт и будет являться горизонтом, на котором в среднем находилась нижняя граница ХПС.

Также по рисунку 4 можно заметить, что градиент условной плотности был близок к нулю, однако замечен небольшой положительный скачок на горизонтах 10-30 метров. Максимальное значение градиента условной плотности было равно $0,052 \text{ кг}/\text{м}^3/\text{м}$ на горизонте 15 метров.

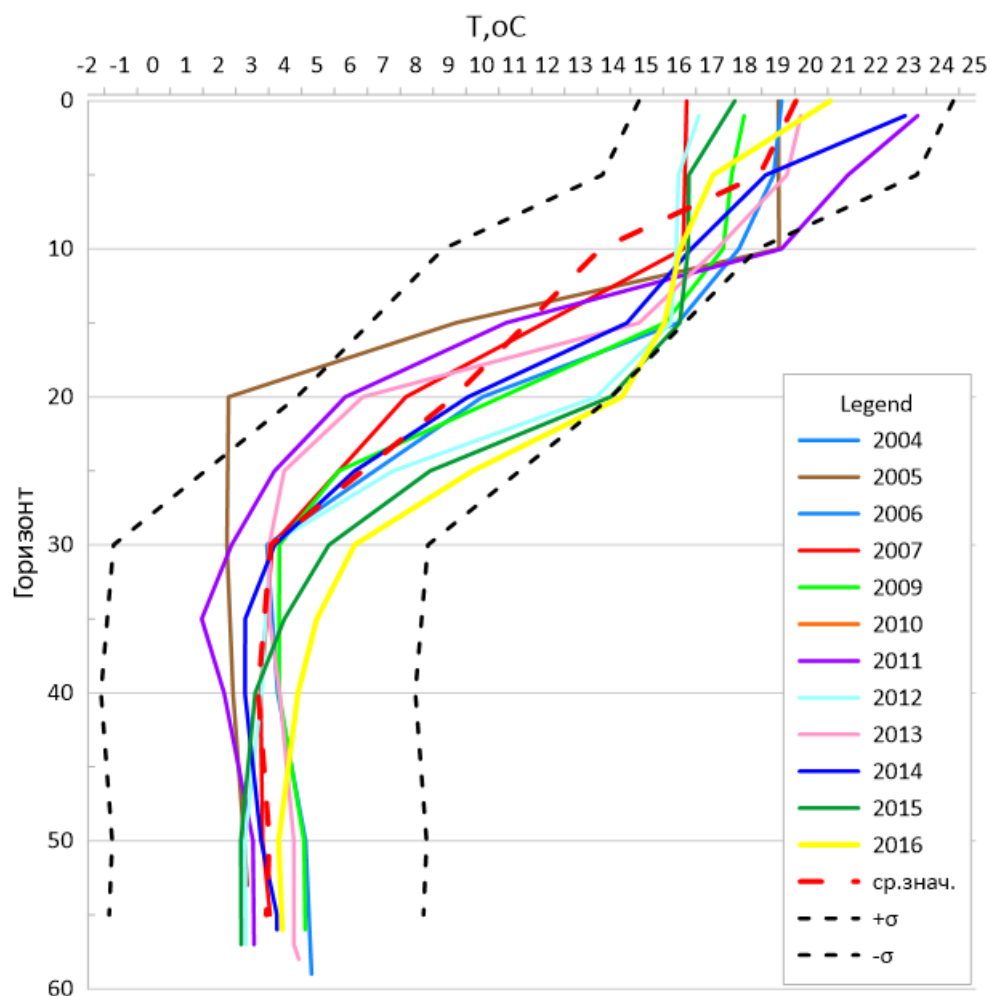


Рисунок 2.3 Профили температуры моря (°C) за 2004-2016 год (за исключением 2008 года).

Анализируя профили температуры за 2004-2016 годы (рис. 5), можно заметить, что в 2005 году на горизонте 20 метров отмечалось минимальное значение ($2,225^{\circ}\text{C}$), в то время как в среднем минимальное значение температуры наблюдалось на горизонте 30 метров. Наименьшее значение температуры наблюдалось в 2011 году на горизонте 35 метров ($1,46$).

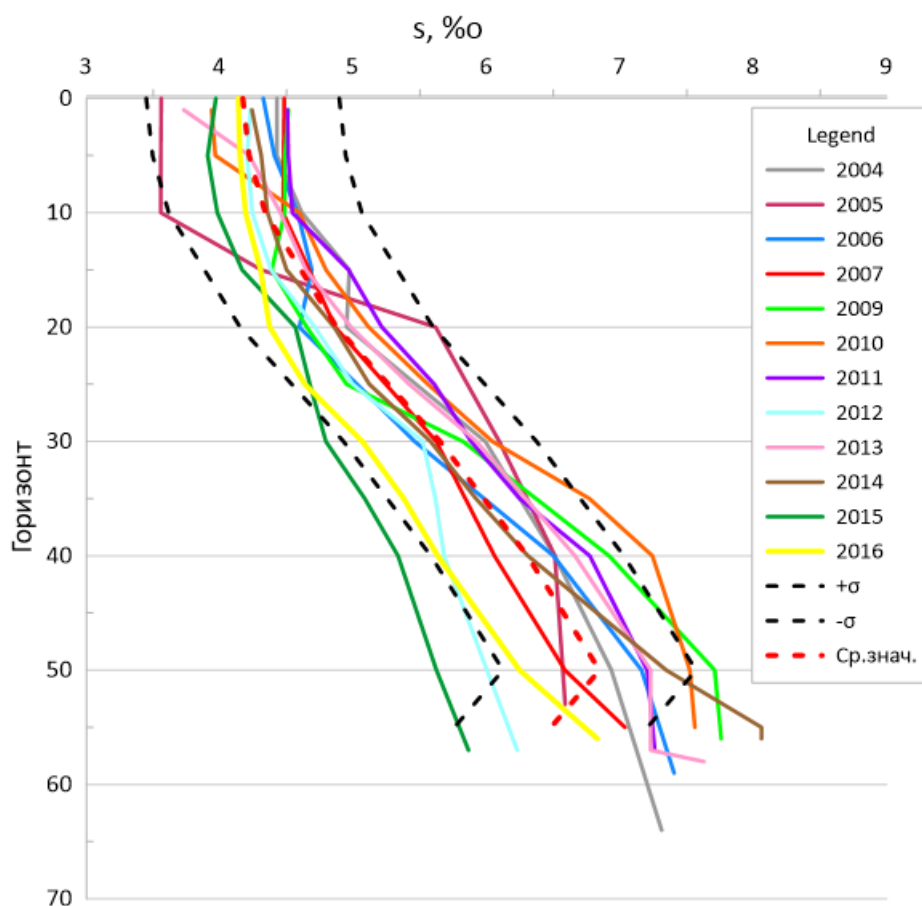


Рисунок 2.4 Профили солёности (‰) за 2004-2016 год (за исключением 2008).

Максимальных значений солёность достигала в 2014 году (8,0596‰), на горизонте 56 метров (ниже ХПС). Минимальные значения наблюдались в 2005 году (3,56‰) на горизонте 10 метров (выше ХПС). Можно заметить, что максимальное среднее значение солёности наблюдалось не на самом глубоководном горизонте (55 метров), а на горизонте 50 метров (6,85‰), который в среднем является нижней границей ХПС (рис.4).

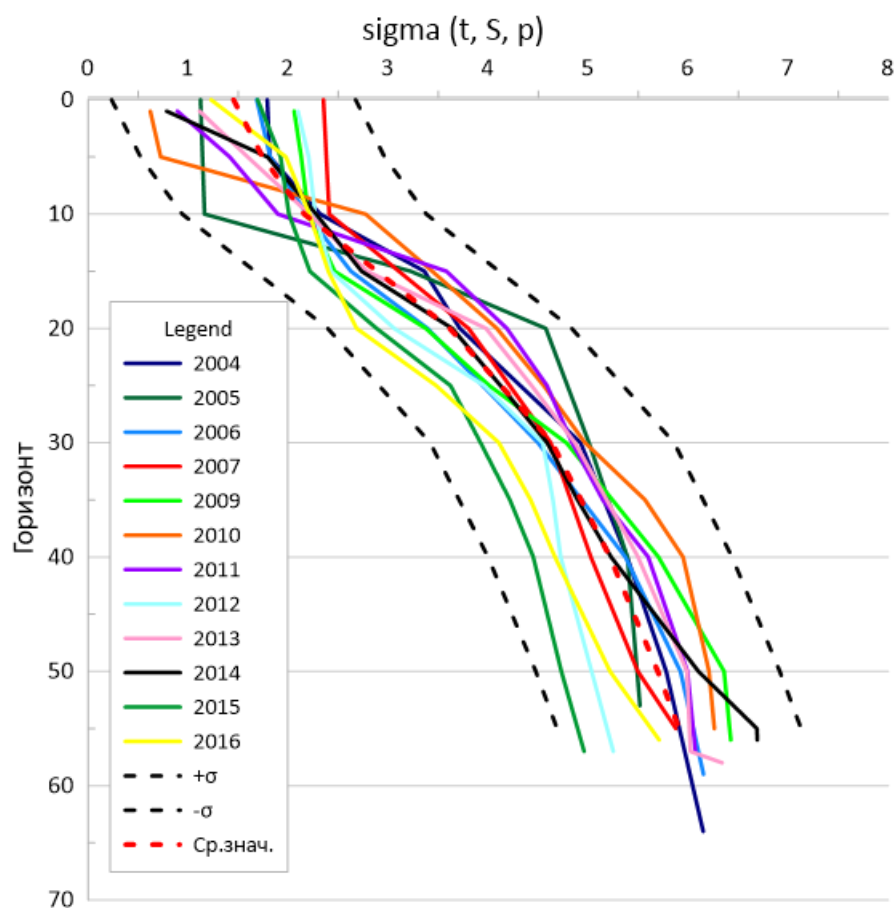


Рисунок 2.5 Профили условной плотности (кг/м^3) за 2004-2016 год (за исключением 2008).

Значения условной плотности достигали максимума в 2014 году на горизонте 56 метров $-6,69\text{кг/м}^3$ (ниже Холодного промежуточного слоя). Максимальное среднее значение условной плотности было на горизонте 50 метров $- 5,69 \text{ кг/м}^3$ (на нижней границе ХПС).

2.3 Анализ характеристик ХПС.

Результаты исследования ХПС в период с 2004 по 2016 год (отсутствуют данные за 2008 год) представлены в таблицах 1,2.

Таблица 1. Характеристики ХПС 2004-2016 г. (отсутствуют данные за 2008 год) на станции 4ugms.

Год	Ядро ХПС, °C	(dT/dz)min, °C/м	(dT/dz)max, °C/м	Tcp, °C	Scp, ‰	sigma (T,S,p), кг/м3	Толщина ХПС, м
2004	2,029	-0,932	0,039	5,751	5,870	4,633	35
2005	2,225	-1,968	0,034	3,788	5,824	4,742	38
2006	3,440	-1,188	0,085	5,458	5,929	4,795	30
2007	3,250	-0,844	0,046	4,274	6,033	4,964	35
2008	Данные отсутствуют						
2009	3,810	-0,994	0,076	5,682	6,010	4,844	30
2010	2,860	-1,570	0,188	6,450	5,732	4,476	30
2011	1,460	-1,678	0,136	4,362	5,781	4,656	25
2012	2,770	-1,236	0,005	3,847	5,674	4,692	32
2013	3,513	-1,681	0,062	4,238	5,856	4,791	20
2014	2,775	-0,966	0,096	4,561	6,170	5,036	35
2015	2,650	-1,099	0,001	4,351	5,229	4,316	32
2016	3,800	-0,908	0,018	5,478	5,632	4,599	31
ср. знач.	2,882	-1,255	0,066	4,853	5,812	4,712	31

Исходя из данных, представленных в таблице 1, можно сделать следующие выводы:

1. Температура ядра ХПС была минимальной в 2011 году (1,46°C), наибольшая температура ядра ХПС наблюдалась в 2009 году (3,81°C), средняя температура ядра ХПС была равна 2,88°C

2. Максимальный отрицательный градиент температуры наблюдался в 2005 году (-1,97(°C/м), минимальный – в 2007 (-0,84°C/м), средний отрицательный градиент температуры равнялся -1,26°C/м.,

3. Максимальный положительный градиент температуры наблюдался в 2010 году ($0,188^{\circ}\text{C}/\text{м}$), минимальный – в 2012 ($0,005^{\circ}\text{C}/\text{м}$), средний положительный градиент температуры был равен $0,066^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

4. Наибольшая средняя температура ХПС была выявлена в 2010 году и равнялась она – $6,450^{\circ}\text{C}$, это значение значительно выделяется на общем фоне, что может быть связано с тем, что в этом году верхняя граница ХПС была на горизонте 10 метров, наименьшая средняя температура ХПС наблюдалась в 2005 году и была равна $3,788^{\circ}\text{C}$, средняя температура ХПС за период с 2004 по 2016 год составляла $4,853^{\circ}\text{C}$.

5. Наибольшая средняя соленость ХПС была в 2014 году ($6,170\%$), наименьшая – в 2015 ($5,229\%$), средняя соленость – $5,812\%$.

6. Наибольшее значение условной плотности наблюдалось в 2014 году ($5,036\text{ кг}/\text{м}^3$), наименьшее – в 2015 году ($4,316\text{ кг}/\text{м}^3$), среднее значение условной плотности - $4,712\text{ кг}/\text{м}^3$.

7. Наибольшая толщина ХПС была в 2005 году (38 метров), наименьшая в 2013 году (20 метров), среднее значение толщины ХПС в промежутки 2004-2016 годы – 31 метр.

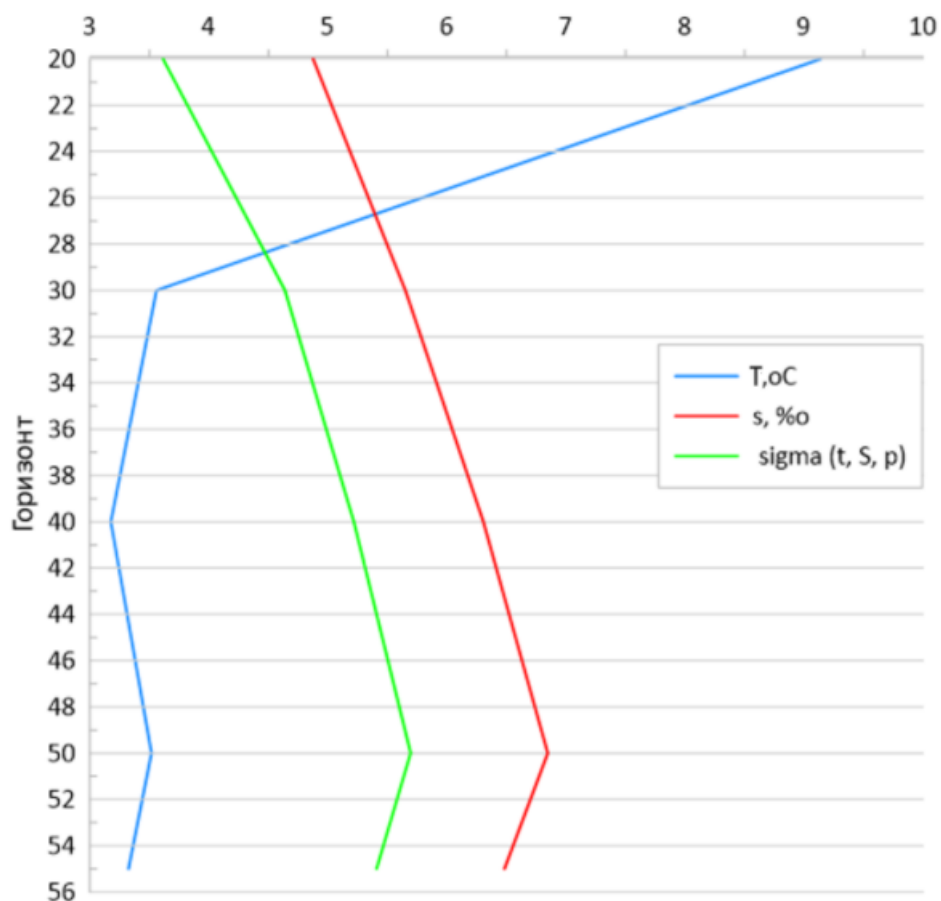


Рисунок 2.6 Осредненный вертикальный профиль характеристик ХПС в период с 2004 по 2016 год.

Таблица 2. Средние значения характеристик ХПС (отсутствуют данные за 2008 год) на станции 4ugms по горизонтам.

горизонт	T, °C	S, ‰	sigma (T, S, p), кг/м³	dT/dz
20	9,14	4,87	3,61	-0,89
30	3,56	5,65	4,64	-0,43
40	3,18	6,30	5,22	0,00
50	3,52	6,85	5,69	0,03
55	3,32	6,48	5,41	0,02

Исходя из данных, представленных в таблице 2, можно сделать следующие выводы:

1. Средняя температура уменьшалась с глубиной, однако наименьшее значение наблюдалось на горизонте 40 метров ($3,517^{\circ}\text{C}$), это связано с тем, что на нем в среднем располагалось ядро ХПС.

2. Соленость увеличивалась с глубиной, максимального значения она достигала на горизонте 50 метров ($6,846\text{‰}$), отметим, что этот горизонт в среднем являлся границей ХПС.

3. Условная плотность, как и соленость, с глубиной возрастала, и так же достигала максимального среднего значения на горизонте 50 метров ($5,694 \text{ кг/м}^3$).

4. Наибольший средний отрицательный градиент температуры по вертикали был на горизонте 20 метров ($-0,890$), наибольший средний положительный градиент наблюдался на горизонте 50 метров ($0,025$). Из этого можно сделать вывод о том, что в среднем ХПС располагался на горизонтах 20-50 метров.

На основе полученных результатов, можно сделать вывод о том, что Холодный Промежуточный слой достаточно хорошо определяется в водах Финского залива в июле-августе.

3. Влияние на экосистему

3.1 Влияние изменчивости ХПС на гидрохимические характеристики Финского залива

Данные для анализа гидрохимических характеристик были взяты из экспедиционных исследований РГГМУ, проводившихся в период с 2004 по 2016 год (отсутствуют данные за 2008 год) на станции 4 ugms в июле-августе.

Используя данные многолетней изменчивости температуры ХПС был построен график, представленный на рисунке 3.1.

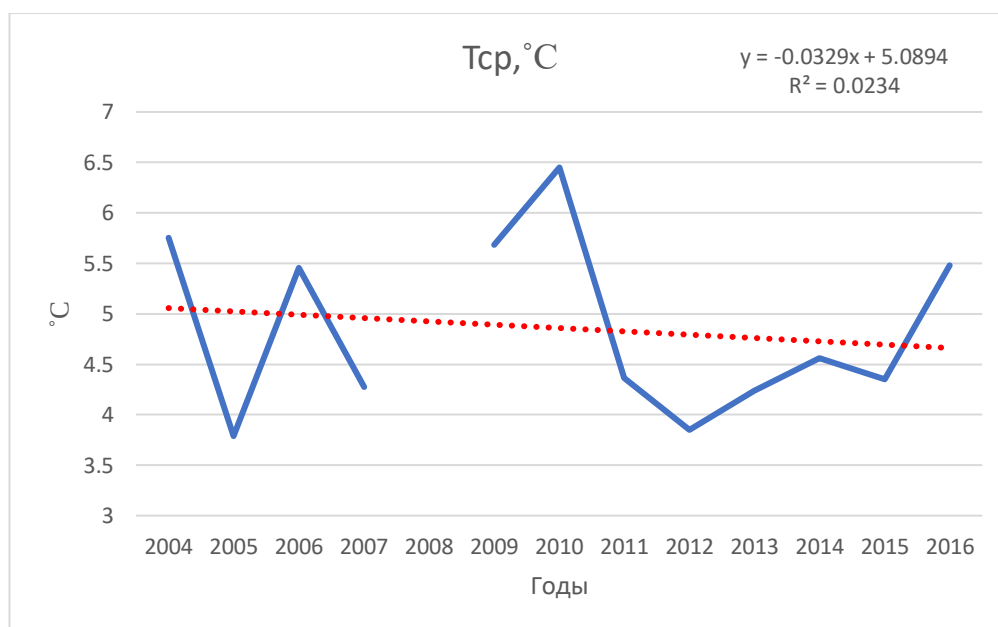


Рисунок 3.1 Многолетняя изменчивость средней температуры ХПС в период с 2004 по 2016 год.

По графику на рисунке 3.1 можно заметить, что температура ХПС колеблется в течении всего периода, но при имеет отрицательный тренд. Максимальное среднее значение температуры наблюдалось в 2010 году, и оно значительно больше среднего значения всего периода, из чего можно сделать

вывод о том, что в этом году была наиболее теплая зима, за счет чего глубоководный слой в Финском заливе прогрелся довольно быстро и плотностная стратификация в этом году была слабее чем в остальных.



Рисунок 3.2 Многолетняя изменчивость толщины ХПС.

По графику на рисунке 3.2 видно, что толщина ХПС с годами достаточно сильно изменялась, это связано с влиянием суровости предшествующих зим, если зима была теплая, то ХПС имел меньшую толщину, и наоборот, при суровой зиме, значения возрастали. Наблюдались 2 пика, в 2010 и 2014 году, из чего можно сделать вывод, что зимы 2009-2010 и 2013-2014 были наиболее суровыми.

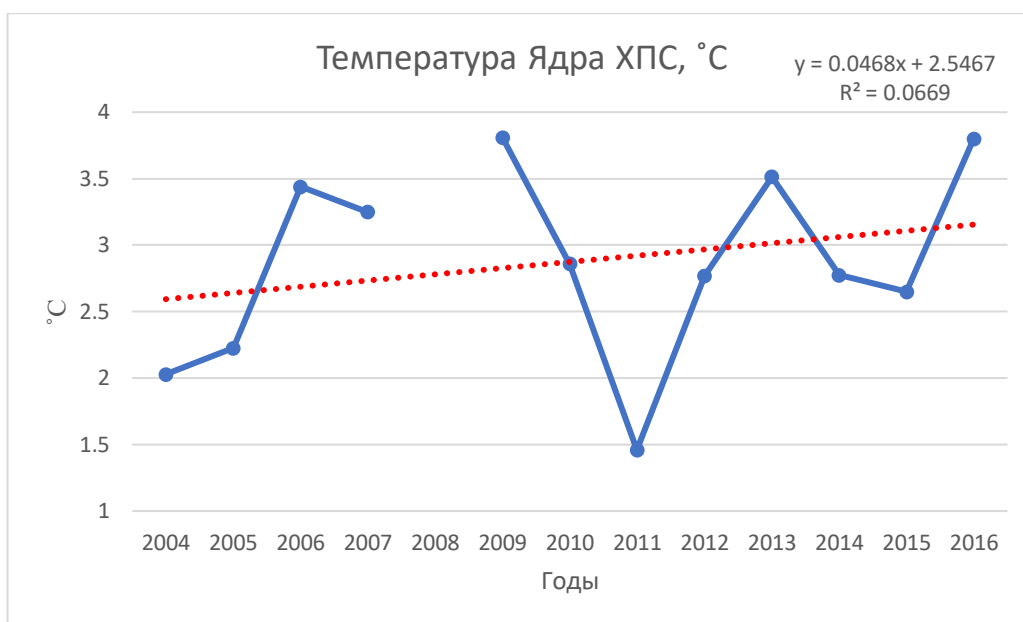


Рис.3.3 Многолетняя изменчивость температуры ядра ХПС.

По графику на рисунке 3.3 можно заметить, что температура ядра имела положительный тренд, минимальное значение было отмечено в 2011 году, толщина ХПС в этом году была одной из наибольших, из чего можно сделать вывод, что предшествующая зима была достаточно суровой. Также можно заметить, что наибольшие температуры ядра наблюдались в 2009 и 2016 году, в эти годы наблюдалась наименьшая толщина ХПС, из чего следует, что предшествующие зимы были достаточно теплыми.

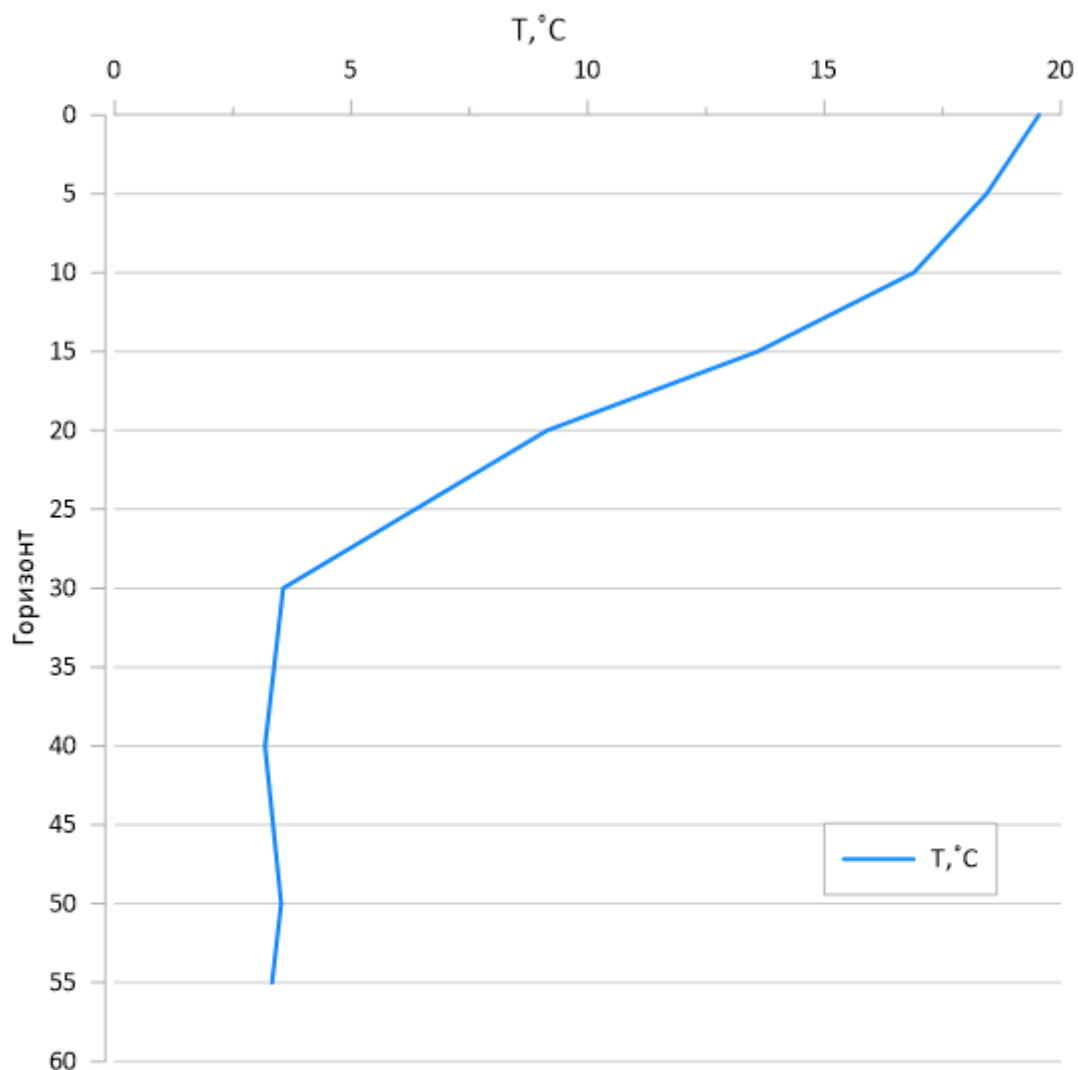


Рисунок 3.4 Осредненный за период с 2004 по 2016 год вертикальный профиль температуры воды в Финском заливе

Анализируя рисунок 3.4 можно заметить, что границы ХПС располагались в промежутке 20-50 метров, температура ядра ХПС в среднем была расположена на горизонте 40 метров.

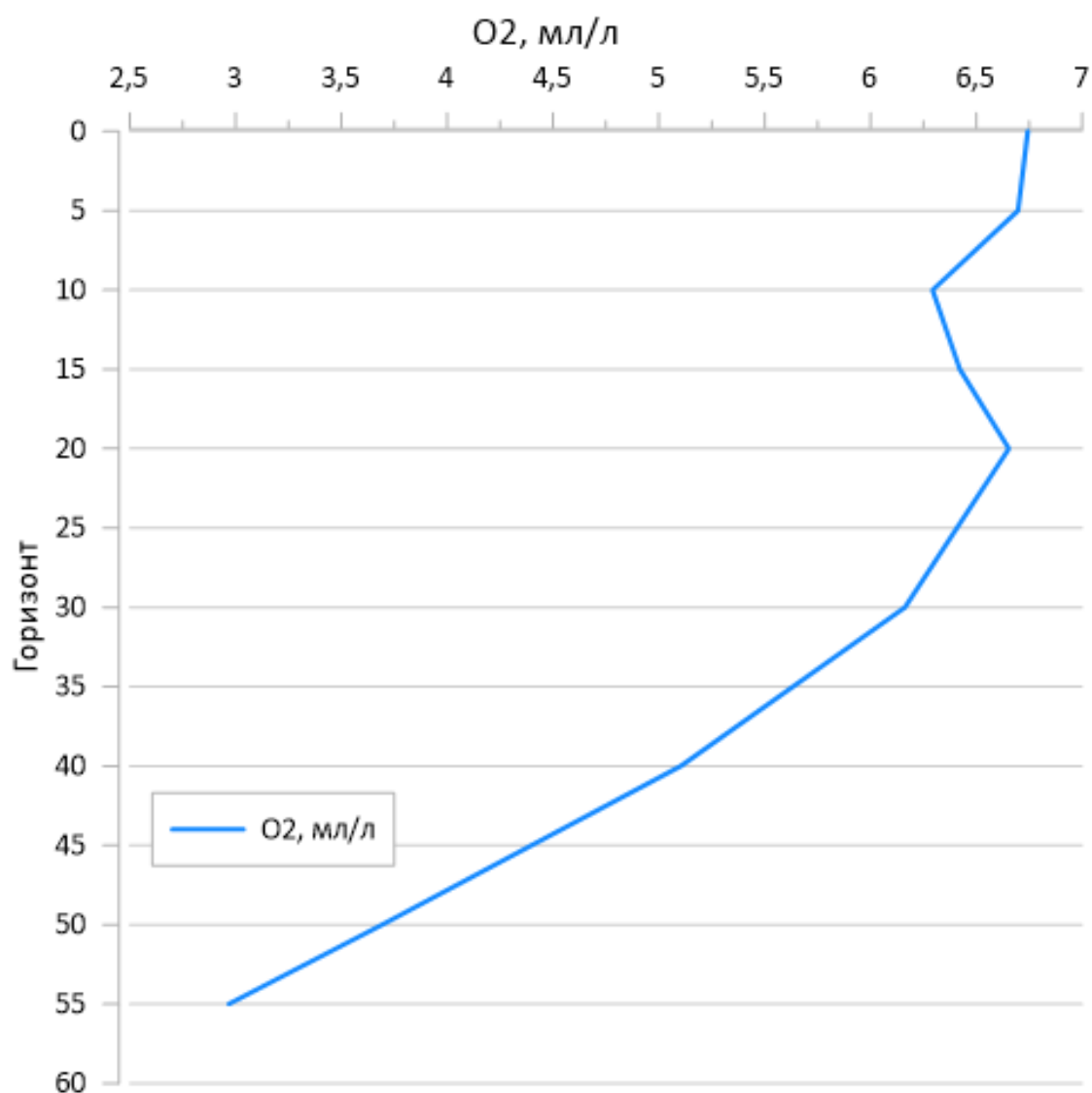


Рисунок 3.5 Осредненный за период с 2004 по 2016 год вертикальный профиль концентрации растворенного кислорода в Финском заливе

По рисунку 3.5 видно, что растворенный кислород с глубиной уменьшался, однако можно заметить, однако в промежутке 10-20 метров можно заметить рост его концентрации, который может быть вызван переходом поверхностного слоя в ХПС (слоем скачка).

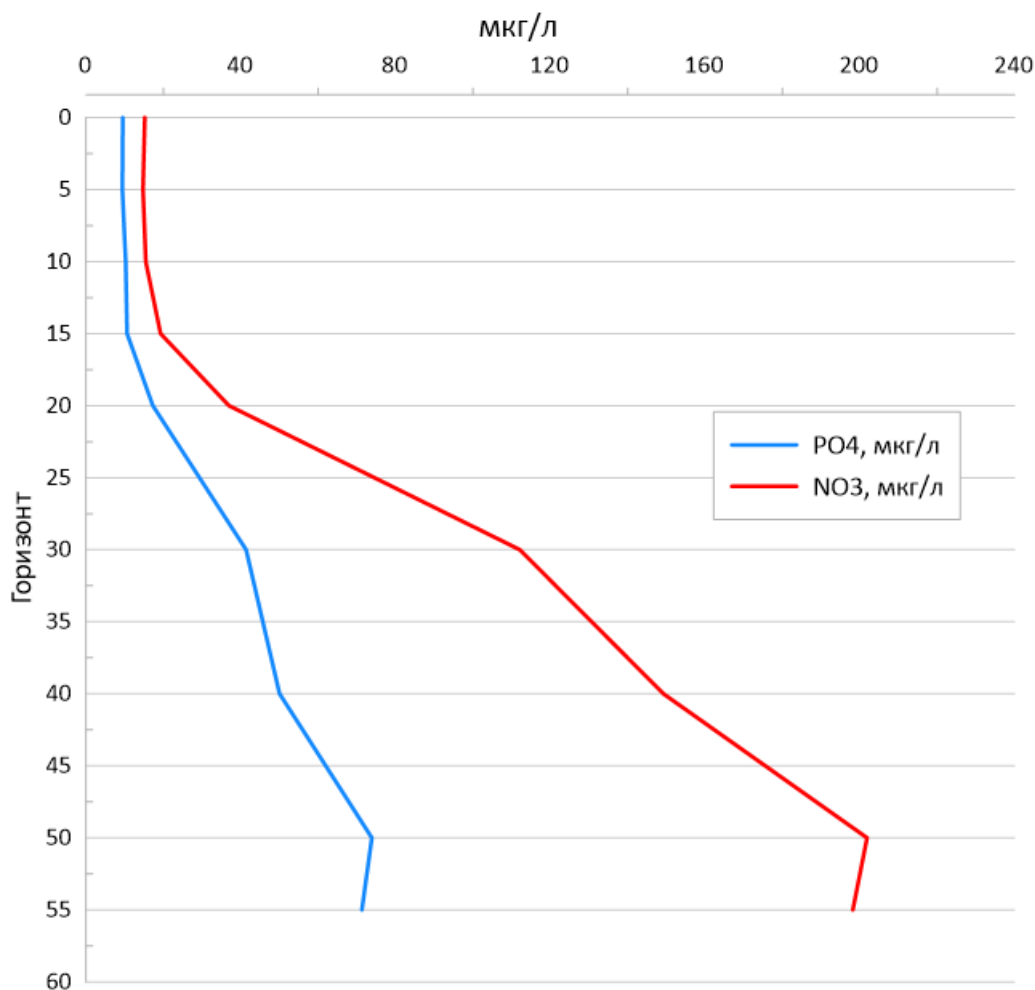


Рисунок 3.6 Осредненные вертикальные профили изменчивости концентрации нитратов (отсутствуют данные за 2004, 2008 и 2016 годы) и фосфатов (отсутствуют данные за 2004, 2016 годы) в период с 2004 по 2016 год

Анализируя профили, представленные на рисунке 3.6 можно сделать вывод о том, что с глубиной концентрация биогенных веществ в заливе возрастает, наименьшие значения наблюдаются в поверхностном слое, такое распределение может быть вызвано поглощением биогенов фитопланктонными сообществами и понижением температуры вод ХПС, в результате которого стратификация слоев усиливается, тем самым затрудняя поступление в поверхностный слой питательных веществ. Наибольшие значения концентрации биогенных веществ наблюдаются на нижней границе ХПС, после которого происходит их уменьшение, которое связано с уменьшением концентрации растворенного кислорода.

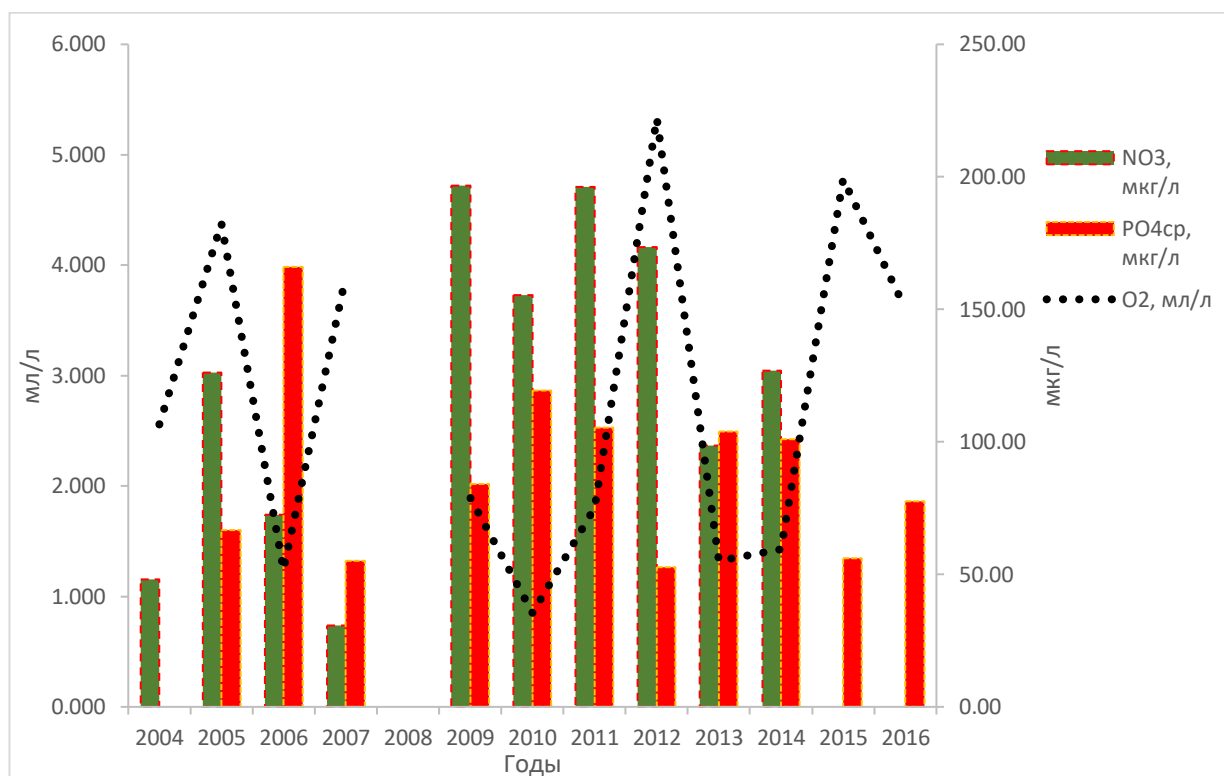


Рис. 3.7 Многолетняя изменчивость концентрации NO₃, PO₄, O₂ в придонном слое.

На рисунке 3.7 представлено содержание гидрохимических элементов в придонном слое моря. Можно заметить, что в течение периода все вещества достаточно сильно колебались. Их содержание в придонном слое зависело прежде всего от толщины ХПС, поскольку при небольшой толщине ХПС, стратификация слоев уменьшалась, и растворенные вещества вымывались со дна в вышележащие слои. Растворенный кислород, поступающий с поверхности, также зависел от толщины слоя, при большой толщине ХПС, водообмен затруднялся, и кислород плохо поступал в придонные слои.

Также был проведен анализ малых выборок [15], для того, чтобы выявить связь между основными характеристиками ХПС (температура ядра, толщина) и кислородом ниже ХПС.

Выявление связи между температурой ядра ХПС и кислородом ниже ХПС:

Таблица 3. Расчет коэффициента корреляции Спирмена между ядром ХПС и кислородом ниже ХПС.

Номер	Т ядра, °С	O ₂ , мл/л	Ранги(ряд 1)	Ранги(ряд 2)	Разность рангов di	di ²
1	2,0	2,6	2	6	-4	16
2	2,2	4,4	3	10	-7	49
3	3,4	1,2	9	3	6	36
4	3,3	3,9	8	9	-1	1
5	3,8	1,9	12	5	7	49
6	2,9	0,9	7	1	6	36
7	1,5	1,8	1	4	-3	9
8	2,8	5,3	5	12	-7	49
9	3,5	2,8	10	7	3	9
10	2,8	1,4	6	2	4	16
11	2,6	4,8	4	11	-7	49
12	3,8	3,6	11	8	3	9

Ранговый коэффициент корреляции Спирмена в этом случае равен -0,15. После проверки на значимость, на основе t-критерия Стьюдента (t^*), было выявлено, что $t^* < t_{кр}$ ($-0,47 < 2,23$), это означает, что значение коэффициента корреляции между этими двумя характеристиками не значимо.

Выявление связи между толщиной ХПС и кислородом ниже ХПС:

Таблица 4. Расчет коэффициента корреляции Спирмена между толщиной ХПС и кислородом ниже ХПС.

Номер	Толщина ХПС	O ₂ , мл/л	Ранги(Ряд 1)	Ранги(Ряд 2)	Разность рангов di	di ²
1	35	2,6	5,5	6,0	-0,5	0,3
2	38	4,4	7,5	10,0	-2,5	6,3
3	39	1,2	9,0	3,0	6,0	36,0
4	35	3,9	5,5	9,0	-3,5	12,3
5	31	1,9	1,5	5,0	-3,5	12,3
6	45	0,9	11,0	1,0	10,0	100,0
7	42	1,8	10,0	4,0	6,0	36,0
8	32	5,3	3,5	12,0	-8,5	72,3
9	38	2,8	7,5	7,0	0,5	0,3
10	51	1,4	12,0	2,0	10,0	100,0
11	32	4,8	3,5	11,0	-7,5	56,3
12	31	3,6	1,5	8,0	-6,5	42,3

Ранговый коэффициент корреляции Спирмена равнялся -0,66. После проверки на значимость, на основе t-критерия Стьюдента (t^*), было выявлено,

что $t^* < t_{кр}$ ($-2,76 < 2,23$), это означает, что значение коэффициента корреляции между этими двумя характеристиками не значимо.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что и в случае с температурой ядра ХПС, и в случае с толщиной ХПС, связь с концентрацией кислорода на дне практически отсутствует, из чего следует, что характеристики ХПС не оказывают прямого воздействия на концентрацию кислорода на дне, однако нельзя исключать их косвенного воздействия на придонный слой.

3.2 Влияние ХПС и гидрохимических характеристик района на биомассу фитопланктона.

Биомасса фитопланктона зависит от наличия в воде питательных веществ (биогенов). Температура также оказывает влияние на биомассу фитопланктона, повышение температуры может положительно сказываться на росте биомассы, однако слишком высокая температура может быть губительной для фитопланктона.

Данные, использованные в анализе были взяты из экспедиций РГГМУ, которые проводились на станции 4ugms в период с 2004 по 2016 год.

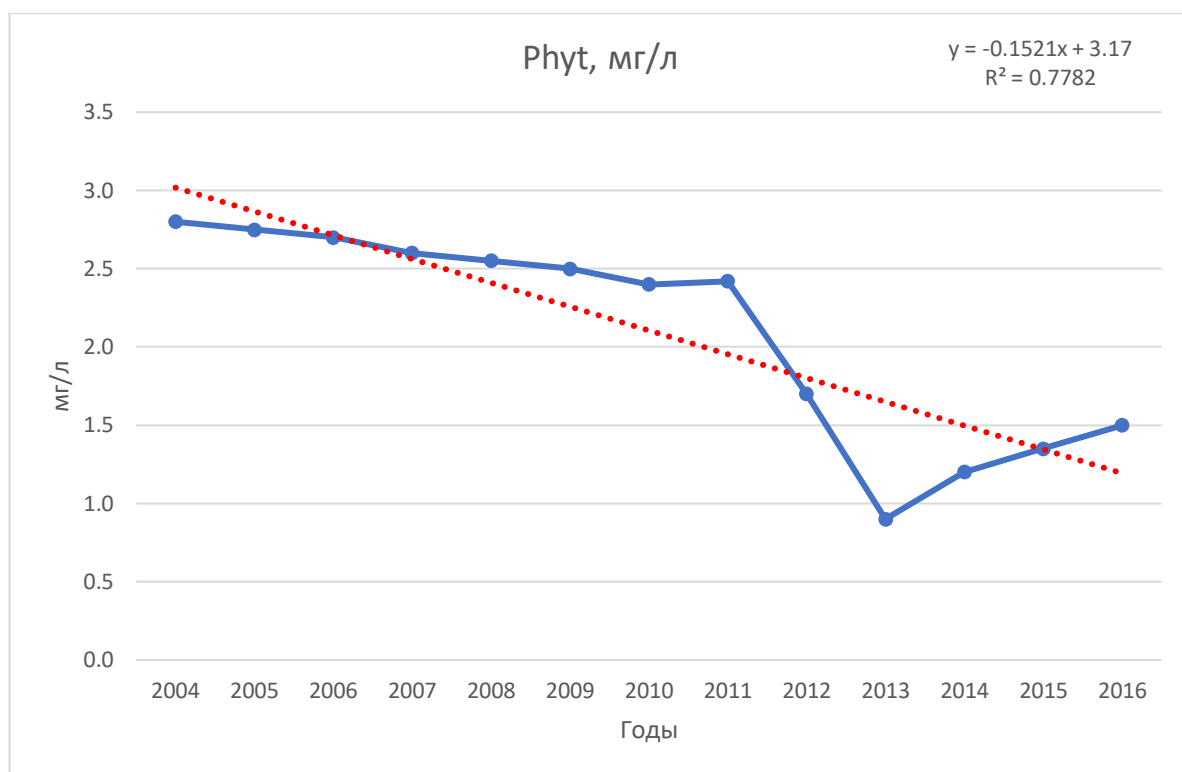


Рисунок 3.7 Изменчивость биомассы фитопланктона в период с 2004 по 2016 год.

На графике изменения биомассы фитопланктона виден четкий отрицательный тренд, минимальное значение наблюдалось в 2013 году, это может быть связано с тем, что в 2012 году наблюдалось минимальное среднее значение температуры ХПС, которое может быть вызвано влиянием предшествующей зимы (2011-2012года), вследствие чего в этом году стратификация слоев была увеличена и питательные вещества плохо поступали в поверхностный слой.

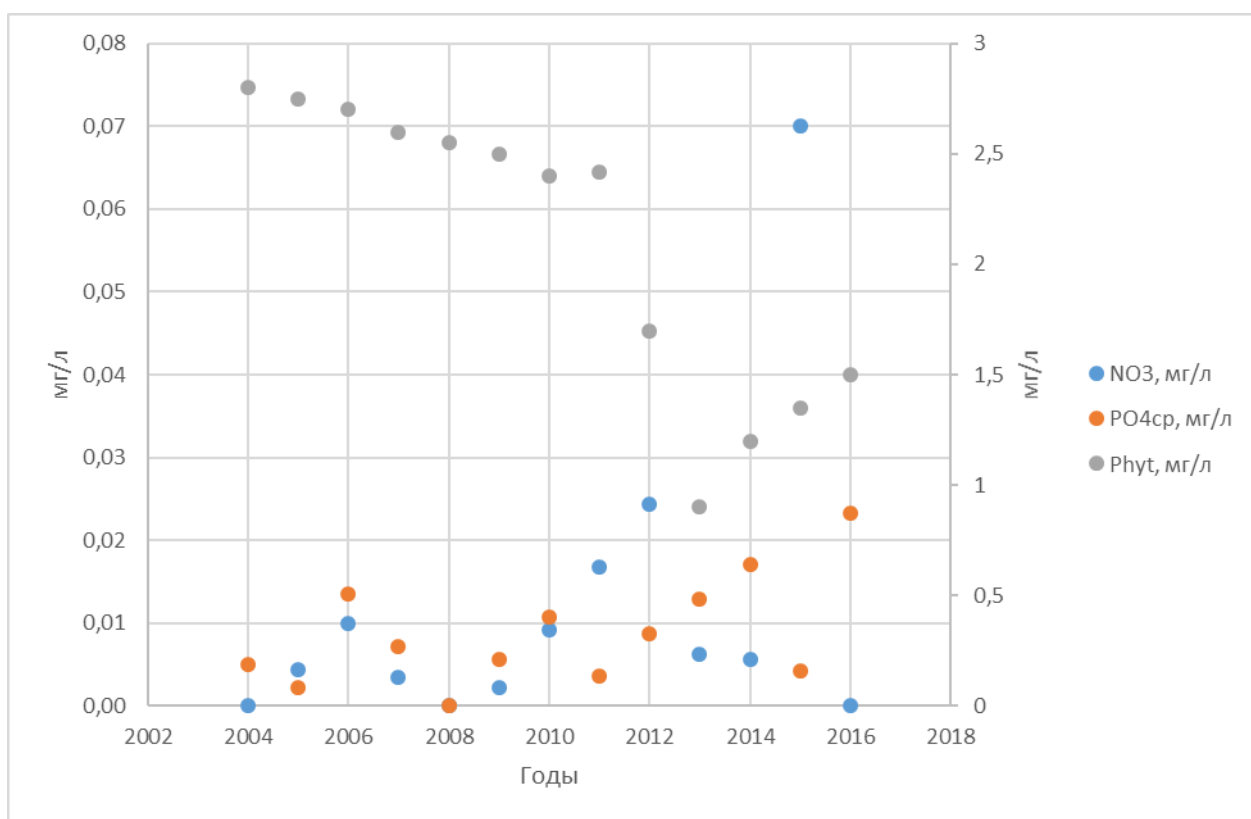


Рисунок 3.8. Облако точек изменения концентрации нитратов, фосфатов и биомассы фитопланктона в поверхностном слое в период с 2004 по 2016 год

По облаку точек на рисунке 3.8 можно заметить что концентрация фитопланктона до 2013 года падала, это связано с недостаточным количеством поступающих в поверхностный слой биогенов, после 2013 года питательные вещества необходимые для роста фитопланктона начали расти, тем самым стимулировали рост фитопланктона.



Рисунок 3.9 Облако точек изменения содержания растворенного кислорода и биомассы фитопланктона в поверхностном слое в период с 2004 по 2016 годы

Концентрация растворенного кислорода имеет зависимость от биомассы фитопланктона, так как фитопланктон в процессе фотосинтеза выделяет кислород. Таким образом, как можно заметить из облака точек, с уменьшением концентрации в поверхностном слое фитопланктона, уменьшается количество растворенного кислорода, и наоборот. В 2012 году произошло резкое снижение биомассы фитопланктона.

3.3 Анализ влияния на экосистему.

Проведя анализ экспедиционных данных на станции глубоководной 4 ugms были составлены таблицы 5,6.

Таблица 5. Средние значения гидрохимических характеристик и температуры по вертикали в период с 2004 по 2016 год.

Горизонт	O ₂ , мл/л	PO ₄ , мг/л	NO ₃ , мг/л	T, °C
0	6,74	0,01	0,02	19,54
5	6,70	0,01	0,01	18,43
10	6,29	0,01	0,02	16,89
15	6,42	0,01	0,02	13,59
20	6,65	0,02	0,04	9,14
30	6,16	0,04	0,11	3,56
40	5,10	0,05	0,15	3,18
50	3,69	0,07	0,20	3,52
55	2,97	0,07	0,20	3,32

1. Концентрация растворенного кислорода с глубиной уменьшалась, но на горизонтах 10-20 метров происходил рост, вызванный перемешиванием слоев (слоем скачка).
2. Концентрация нитратов и фосфатов подобно с увеличением горизонта росла, на что оказывал возможное влияние ХПС, в годы, где наблюдались низкие температуры, стратификация слоев увеличивалась, и не давала биогенным элементам перейти в поверхностные слои.
3. Средняя температура с глубиной уменьшалась, но максимальное значение наблюдалось не на дне, а в ХПС (ядро ХПС).

Таблица 6. Значения гидрохимических характеристик поверхностного слоя в период с 2004 по 2016 год.

Годы	O ₂ , мл/л	NO ₃ , мг/л	PO ₄ ср, мг/л	Phyt, мг/л
2004	6,395	-	0,005	2,800
2005	6,373	0,004	0,002	2,750
2006	6,889	0,010	0,013	2,700
2007	6,678	0,003	0,007	2,600
2008	-	-	-	2,550
2009	6,685	0,002	0,006	2,500
2010	6,510	0,009	0,011	2,400
2011	6,373	0,017	0,004	2,420
2012	6,940	0,024	0,009	1,700
2013	6,774	0,006	0,013	0,900
2014	6,460	0,006	0,017	1,200
2015	6,960	0,070	0,004	1,350
2016	4,137	-	0,023	1,500

По данным таблицы 6, можно сделать вывод о том, что все характеристики кроме фитопланктона испытывали значительную межгодовую изменчивость, не было значительного понижения или повышения концентраций. Изменчивость концентраций может быть вызвана изменением характеристик ХПС, в периоды, когда его толщина и мощность усиливалась, увеличивалась стратификация слоев, что отрицательно влияло на поступление в поверхностные воды со дна питательных веществ, тем самым вызывая снижение биомассы фитопланктона.

Заключение

В результате исследования водной толщи глубоководной части Финского залива, а именно его холодного промежуточного слоя, можно сделать вывод о том, что прямой связи с изменением характеристик в Финском заливе не выявлено, но в любом случае, его изменчивость оказывает непосредственное воздействие на концентрацию веществ в поверхностном и придонных слоях.

При высоких температурах холодного промежуточного слоя, стратификация уменьшается и поступление в поверхностный слой питательных веществ для фитопланктонных сообществ улучшается. При низких температурах ХПС наоборот, затрудняется водообмен между слоями и взвешенные органические вещества образуют скопления у дна, плохо поступая в вышележащие слои, что приводит к лимитированию фитопланктона. Минерализация растворенного органического вещества приводит к снижению содержания кислорода.

По изученным данным изменчивости температуры водной толщи и построенным графикам, можно сделать вывод о том, что температура имеет отрицательный тренд, что может быть связано с суровостью зимы, поскольку водная толща не успевает прогреваться даже к июлю-августу.

Можно отметить, что биомасса фитопланктона на протяжении всего периода наблюдений уменьшалась, это было связано с недостатком биогенных элементов в Фотическом слое.

Появление ХПС в водной толще связывают с остатком вод зимнего квазигомогенного слоя, который возникает в результате осенне-зимней вертикальной конвекции из-за выхолаживания с поверхности.

Список литературы.

1. В.Ф.Дубравин – Эволюции гидрохимических структур Балтийского моря, 2021.
2. ЕСИМО : единая государственная система информации об обстановке в мировом океане : [электронный ресурс] / федеральная программа “мировой океан”. — URL: http://esimo.oceanography.ru/esp2/index/index/esp_id/1/section_id/2 (дата обращения 18.05.2024). — Текст : электронный.
3. 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.
4. Безгодов А. В., Цветков В. Ю. 2014 – год Финского залива в России, Финляндии, Эстонии [Текст] / Сборник научных трудов // по материалам Шестой Международной конференции «Ладожский парламент». СПб, 2015. – 131 с.
5. О.И.Лобчук – Пространственная изменчивость положения границ и мощности Холодного промежуточного слоя в Балтийском море в весенний период, 2019.
6. Б.С.Залогин, А.Н.Косарев – Природа мира. Моря – М. «Мысль», 1999. С.121-129.
7. Karol Kuliński, Gregor Rehder, Eero Asmala, Alena Bartosova, Jacob Carstensen, Bo Gustafsson, Per O. J. Hall, Christoph Humborg, Tom Jilbert, Klaus Jürgens, H. E. Markus Meier, Bärbel Müller-Karulis, Michael Naumann, Jørgen E. Olesen, Oleg Savchuk, Andreas Schramm, Caroline P. Slomp, Mikhail Sofiev, Anna Sobek, Beata Szymczycha, and Emma Undeman - Biogeochemical functioning of the Baltic Sea, 2022.

8. BACC II Author Team. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Springer Science & Business Media. 2015: 501 p. doi:10.1007/978-3-319-16006-1.
9. Костяной А. Г., Ерёмина Т. Р., Иванов В. В. и др. Морские природные системы / Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет. СПб.: Научные технологии, 2022 С. 202—207.
10. Høyer J. L., Karagali I. Sea surface temperature climate data record for the North Sea and Baltic Sea // Journal of Climate. 2016.29. 7 P. 2529—2541. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0663.1.
11. Mulet S., Nardelli B. B., Good S. et al. Ocean temperature and salinity. / In: Copernicus Marine Service Ocean State Report. 2018 Issue 2 Journal of Operational Oceanography, 11: sup1, P. 13—16. doi:10.1080/1755876X.2018.1489208.
12. Волощук Е.В., Еремина Т.Р., Ланге Е.К., Аверкиев А.С. - Гидрометеорология и экология. 2023 №72. С. 493—511.
13. Катцов В. М., С. М. Семенов, Т.Р.Еремина и др. – Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет. СПб.: Научные технологии, 2022.
14. Степанова Н.Б. – Вертикальная термохалинная структура и механизмы формирования Холодного промежуточного слоя Балтийского моря, 2015.
15. Гордеева С.М. – Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации», 2017.