



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)

«Исследование индикаторов эвтрофикации в Балтийском море»

Исполнитель: Семенова Эда Леонидовна

Руководитель: кандидат географических наук,

Волощук Екатерина Васильевна

«К защите допускаю»

И.о. заведующего кафедрой _____

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«10» 06 2025г.

г. Санкт-Петербург

2025

Оглавление

Введение	3
1. Проблема эвтрофикации в Балтийском море	5
1.1 Физико-географическое описание Балтийского моря	5
1.2 Проблема эвтрофикации в Балтийском море и ее оценка на основе индикаторов эвтрофирования.....	8
2. Исследование индикаторов эвтрофикации в отдельных подбассейнах Балтийского моря.....	12
2.1 Материалы и методы.....	12
2.2 Оценка состояния экосистемы Ботнического залива	17
2.3 Оценка состояния экосистемы Финского залива.....	25
2.4 Оценка состояния экосистемы Гданьского залива	31
3. Сравнительная характеристика уровня загрязненности подбассейнов Балтийского моря по индикаторам	38
Заключение	46
Список использованной литературы.....	48

Введение

Проблема загрязнения поверхностных вод приобрела особое внимание в XX веке на фоне роста антропогенного воздействия, что привело к стремительному увеличению числа эвтрофированных водоёмов. В настоящее время задача снижения степени эвтрофикации водных экосистем является одной из приоритетных в рамках современной науки и практики. Одной из ключевых экологических проблем Балтийского моря считается эвтрофикация, которая представляет собой процесс ухудшения качества воды и повышения ее биологической продуктивности, вызванный избыточным поступлением биогенных элементов под влиянием естественных, природных и человеческих факторов. Чрезмерное содержание питательных веществ стимулирует рост биомассы фитопланктона, в частности сине-зеленых водорослей, что ведет к накоплению органики, снижению прозрачности воды и уменьшению концентрации растворенного кислорода в придонных слоях, что вызывает гипоксические явления.

Целью данной работы является оценка и анализ экологического состояния вод в Балтийском море на основе индикаторов эвтрофикации и их целевых значений.

Для решения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Описать район исследования и дать оценку его экологического состояния;
2. Рассмотреть индикаторы эвтрофикации Балтийского моря;
3. Проанализировать временную изменчивость индикаторов из полученных данных в районах Балтийского моря с разной степенью эвтрофикации;
4. Оценить состояние экосистемы подбассейнов Балтийского моря;
5. Провести сравнительный анализ характеристики Балтийского моря по целевым значениям.

Объектом исследования данной работы является Балтийское море, а именно его подбассейны, такие как Ботнический, Финский и Гданьский заливы, характеризующиеся разной степенью эвтрофикации,

В качестве методов для выполнения цели и сформулированных задач, будут использоваться сбор и обработка измерений по индикаторам из различных баз данных за многолетний период, осреднение полученных данных по индикаторам в рамках наблюдаемого сезона по годам в целях анализа временной изменчивости, сравнение полученных исходных данных с установленными целевыми значениями и анализ на основе полученных результатов в ходе работы.

1. Проблема эвтрофикации в Балтийском море

1.1 Физико-географическое описание Балтийского моря

Балтийское море является внутриконтинентальным шельфовым бассейном Атлантического океана. Площадь Балтийского моря вместе с проливами составляет 425,4 тыс. км², а объем воды - 20,1 тыс. км³. В море впадает 250 рек. Годовой сток составляет примерно 433 км³. Длина береговой линии по примерным подсчетам составляет около 7000 км, если учитывать протяженность береговых линий островов, находящихся в Балтийском море, то длина береговой линии составит примерно 22000 км. Средняя глубина моря 48 м, максимальная 459 м (в точке 58°35' с. ш. и 18°14' в. д.). Преобладают глубины до 50 м, на долю которых приходится 60 % площади моря, на долю глубин более 200 м - около 0,3 % площади моря [1].

Балтийское море омывает берега Дании, Германии, Польши, Латвии, Литвы, Эстонии, России, Финляндии и Швеции (Рисунок 1). На западе граница Балтийского моря проходит по линии мыс Скаген (северная оконечность п-ва Ютландия) - юго-западная оконечность о. Черн (севернее Гетеборга). Связь Балтийского моря с Атлантическим океаном осуществляется через Северное море, проливы Скагеррак, Каттегат и Датские проливы (Большой и Малый Бельт, Эресунн (Зунд) и Фемарн-Бельт). Однако, эта связь затруднена из-за мелководности проливов (глубина на порогах 7-18 м). Затрудненный водообмен между Балтийским и Северным морями играет важнейшую роль в формировании природных особенностей Балтийского моря [1].

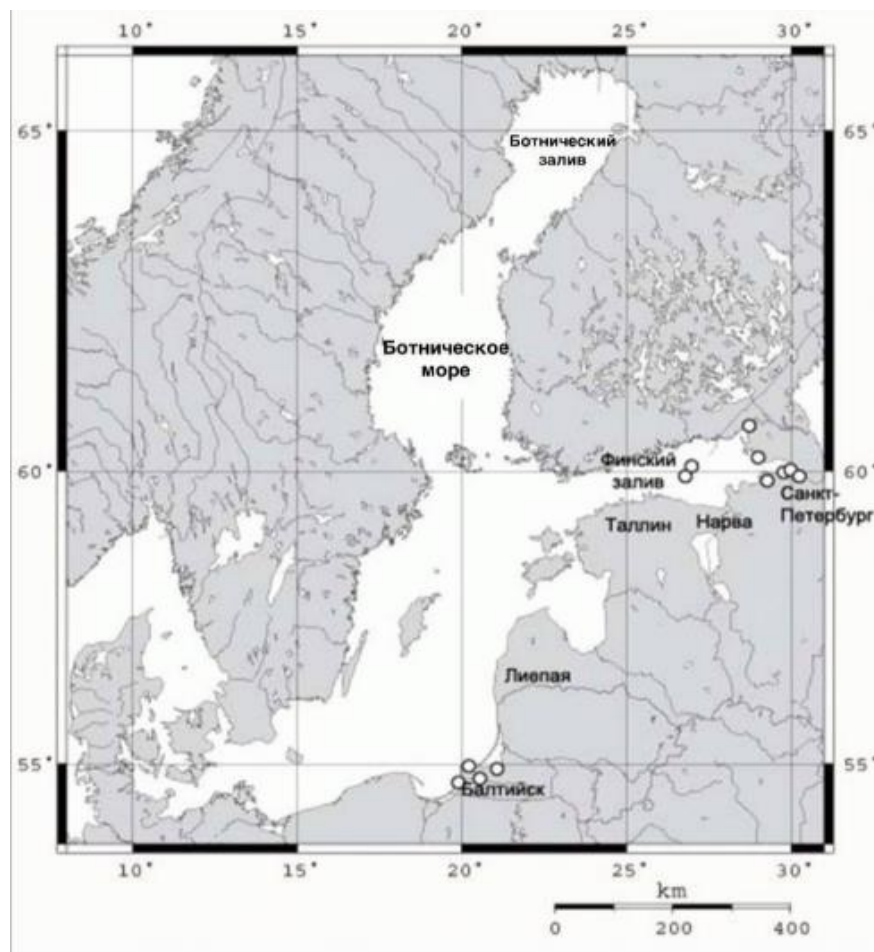


Рис. 1. Географическое расположение Балтийского моря на карте. [1]

Климат Балтийского моря характеризуется как умеренный с чертами континентальности и находится под сильным влиянием Атлантического океана. Его сезонные особенности определяются взаимодействием барических центров: исландского минимума, Азорского максимума на западе и Сибирского максимума на востоке. Своеобразная конфигурация моря и значительная протяженность с севера на юг и с запада на восток создают климатические различия в разных регионах Балтийского моря [5].

Основная интенсивность циклонической деятельности достигается в осенне-зимний период. В это время циклоны сопровождаются сильными ветрами, частыми штормами и вызывают большие подъёмы уровня воды у побережья. В летние месяцы циклоны ослабевают и их повторяемость уменьшается. Летом дуют преимущественно западные, северо-западные и юго-западные слабые до умеренных ветры [3].

Горизонтальная циркуляция носит циклонический характер, где скорость постоянных течений 3-4 см/с, иногда доходит до 10-15 см/с. Направление дрейфовых течений определяется преобладающими ветрами. Глубинная циркуляция также имеет циклонический характер и в большей степени зависит от поступления соленых вод Северного моря.

Приливы небольшие - от 0,04 до 0,1 м, имеют полусуточные и суточные ритмы. Под влиянием ветров и резкой разницы давления повышение уровня в вершинах заливов может достигать 1,5-3 м, вызывая наводнения (например, в Невской губе). Максимальная высота ветровых волн достигает 4-6 м. Хорошо выражены сгонно-нагонные колебания уровня моря, которые могут достигать 2 м. Наблюдаются также сейшеобразные колебания уровня до 1-2 м или 3-4 м.

Температура воды зимой на поверхности в открытом море составляет 1-3 °С, у берегов - ниже 0 °С; летом температура воды повышается до 18-20 °С. Вертикальное распределение температуры характеризуется ее незначительным понижением до 20-30 м, скачкообразным понижением до 60-70 м и затем некоторым повышением ко дну. Холодный промежуточный слой сохраняется круглый год.

Соленость в западной части моря 11 ‰, в центральной части - 6-8 ‰. В центральной части моря соленость плавно увеличивается от поверхности до глубины 30-50 м. Ниже, между горизонтами 60 и 80 м, располагается очень резкий слой скачка, глубже которого соленость снова несколько увеличивается ко дну. Плотностное перемешивание охватывает слой от поверхности до глубины 50-60 м за счет термической и соленостной стадий конвекции и ограничивается снизу галоклином. Одна из специфических черт гидрологической структуры Балтики - двойной скачок плотности. Временный верхний скачок образуется за счет распреснения, постоянный нижний галоклин формируется как вертикальная граница между верхними распресненными водами и глубинными солеными, поступающими в Балтику из пролива Скагеррак через Датские проливы [2].

1.2 Проблема эвтрофикации в Балтийском море и ее оценка на основе индикаторов эвтрофирования

На сегодняшний день, эвтрофикация, которая представляет собой повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления биогенных элементов под действием антропогенных или естественных факторов, является одной из ключевых проблем Балтийского моря, что связано с рядом причин: изменение климата, устойчивая стратификация вод, нарастающее антропогенное воздействие и снижение водообмена с Северным морем. Данный процесс наблюдается во всех бассейнах Балтийского моря, примерно 97% акватории Балтики подвержено различной степени эвтрофикации (Рисунок 2). Наиболее эвтрофированными районами Балтийского моря являются Гданьский, Рижский и Финский заливы. К менее подверженным или относительно «чистым районам» относится северная часть, где находится Ботнический залив.

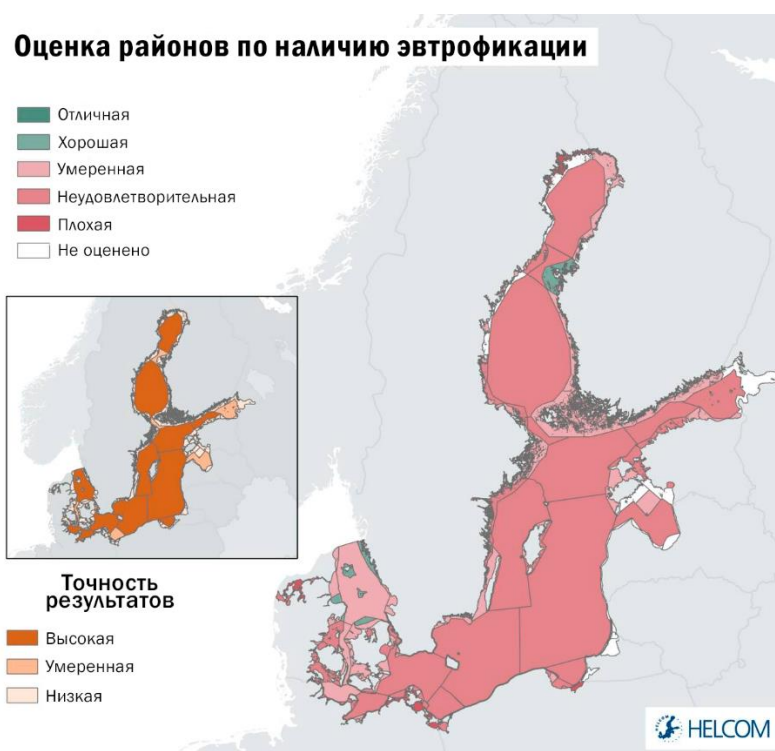


Рис.2. Иллюстрация сохраняющейся серьёзной эвтрофикационной нагрузки. [7]

Для контроля и оценки уровня биогенных веществ в водных экосистемах были разработаны индикаторы эвтрофикации. Путем мониторинга и анализа этих индикаторов можно оценить состояние водной экосистемы, выявить проблемные участки и принять соответствующие меры для предотвращения или уменьшения эвтрофирования.

Принято выделять несколько основных индикаторов:

1) Концентрация биогенных соединений в зимний период. Измерение содержания азота и фосфора в воде является одним из наиболее простых и распространенных методов оценки эвтрофирования. Измерения данных индикаторов проводятся в зимний период, поскольку в этот сезон первичная продуктивность водоемов достаточно низкая, что приводит к слабой зависимости концентрации биогенных элементов от их поглощения. Повышенная концентрация азота и фосфора вызывает развитие таких видов фитопланктона, как сине-зеленые водоросли, тем самым наблюдается снижение концентрации растворенного кислорода. На Рисунке 3 показано количество поступления биогенных элементов в тоннах в Балтийское море за 1904-2014гг.



Рис. 3. Нагрузка азота и фосфора в Балтийское море с 1904 по 2014 год. [8]

2) Концентрация растворенного кислорода в летний период. Донные сообщества являются наиболее чувствительными районами прибрежной экосистемы для эвтрофикации и гипоксии. Как следствие низкого содержания

растворенного кислорода, происходит изменение таких процессов и параметров, как: прозрачность воды; распределение и численность подводных растений; темпы роста и воспроизводства пелагических, и донных беспозвоночных; ухудшение среды, а также возникновение гипоксии, которая характеризуется как недостаток кислорода в донных водах и также является острой проблемой в Балтийском море (Рисунок 4).

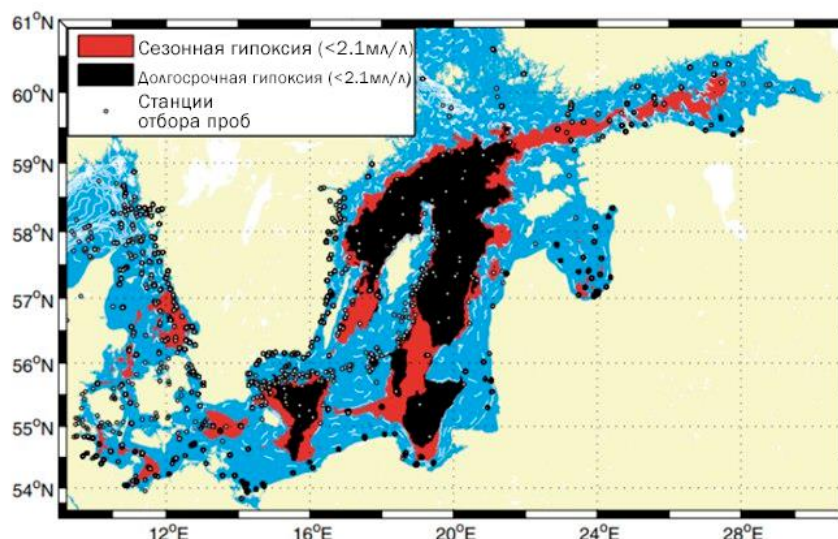


Рис. 4. Распределение гипоксии в Балтийском море в 2001-2006 гг [12].

3) 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.

4) Прозрачность воды по диску Секки. Увеличение количества планктонных организмов или взвешенных частиц может привести к ухудшению прозрачности воды. Прозрачность является очевидным индикатором эвтрофирования водоемов и позволяет сделать первичные выводы. Для измерения используется диск Секки диаметром 30 см, который опускают в воду и следят за тем, на какой глубине он становится невидимым. Измерение прозрачности проводится в летний период [18].

Все эти показатели контролируются по морским районам. Каждый показатель имеет целевой уровень, которого необходимо достичь, чтобы состояние моря можно было определить как хорошее в этом отношении. Проводя одни и те же измерения из года в год, можно также определить тенденции.

2. Исследование индикаторов эвтрофикации в отдельных подбассейнах Балтийского моря

2.1 Материалы и методы

Исследование индикаторов проводились отдельно для трех подбассейнов Балтийского моря, а именно Ботнического, Финского и Гданьского. Данные морские районы были выбраны для полноценной оценки влияния индикаторов эвтрофикации на экосистему водного объекта, поскольку Финский и Гданьский заливы относятся к наиболее эвтрофированным и страдающим от данного процесса акваториям Балтийского моря, в то время как Ботнический залив в настоящее время считается относительно чистым.

Исследование индикаторов эвтрофикации в Балтийском море проводилось на основе данных по 5 основным индикаторам, представляющих собой содержание биогенных элементов, таких как общий фосфор и общий азот, концентрация растворенного кислорода, концентрация хлорофилла-а и прозрачность воды, определяющаяся по диску Секки. Для отчетливой оценки общего трофического статуса, рассматриваемых водных регионов, данные по концентрации биогенов отбирались для зимних месяцев (декабрь-февраль) в поверхностном слое, где происходит их активное накопление в данный сезон года. Остальные показатели, как содержание растворенного кислорода, прозрачность по диску Секки и концентрация хлорофилла-а рассматривались за летние месяцы (июнь-сентябрь). Также в связи с тем, что в глубоководной зоне в теплый период формируется гипоксическая зона, данные по содержанию растворенного кислорода брались с придонного слоя.

Для сбора данных по исследуемым индикаторам использовались несколько открытых баз данных, используемых в международных мониторинговых программах (включая Хельсинкскую комиссию HELCOM): SHARK (SMHI, Швеция), ODIN (IOW, Leibniz Institute for Baltic Sea Research, Warnemunde,

Германия), NEST (Baltic Nest Institute, Stockholm University, Швеция). Используемые базы данных были выбраны поскольку:

1. SHARK охватывает период с 1960-х годов до настоящего времени, включает в себя данные по всем исследуемым индикаторам

2. ODIN располагает данными с 1950 года, в нем также регулярно регистрируются химические параметры, касающиеся состояния питательных веществ и загрязнения Балтийского моря.

3. NEST является инструментом оценки воздействия и моделирования, разработанный специально для нужд HELCOM в рамках Плана действий по Балтийскому морю.

Данные отбирались за многолетний период для каждого рассматриваемого подбассейна Балтийского моря для возможности оценить изменчивость индикаторов в климатическом масштабе и визуальной оценки состояния акваторий со временем.

1) Для Ботнического залива рассматривались данные по индикаторам в период с 1990 по 2023 год. Измерения по всем индикаторам были взяты с базы данных SHARK, отобранных с 98 станций, географическое положение которых обозначено на карте (Рисунок 5). Данные по содержанию растворенного кислорода были дополнены измерениями с базы данных ODIN с отметкой местоположения полученных данных на карте (Рисунок 6).

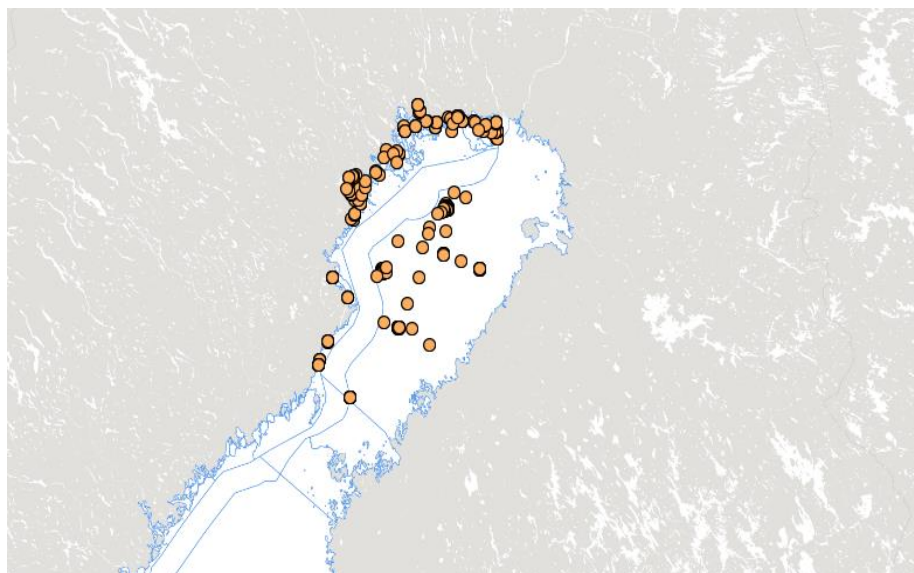


Рис. 5. Карта распределения станций с базы данных SHARK для Ботнического залива.

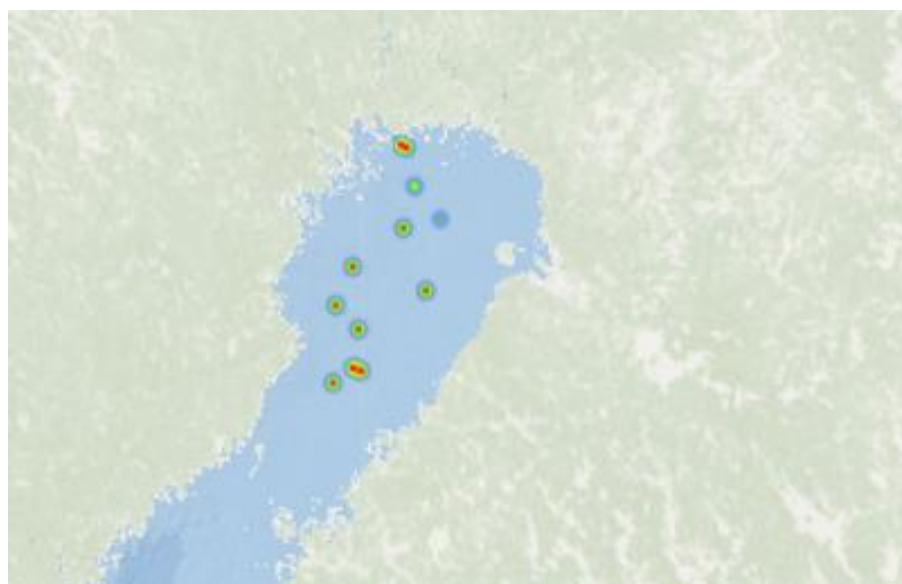


Рис. 6. Карта распределения мест измерений с базы данных ODIN для Ботнического залива.

На основе использованных баз данных SHARK и ODIN всего было получено 2981 измерение по зимним биогенным элементам с поверхностного слоя, 2665 измерений по прозрачности диска Секки за летний период, 1286 измерений по содержанию летнего растворенного кислорода с придонного слоя и 595 измерений по концентрации летнего хлорофилла-а. Однако по индикатору

прозрачности отсутствуют данные измерений за 2000-2005, 2007-2010 и 2012 год, поэтому данные годы не будут использоваться в анализе.

2) Данные измерений по всем пяти индикаторам для Финского залива в период с 1990 по 2024 год использовались с базы данных NEST, где отбор происходил с станции, разделенных на 7 зон по всей акватории (Рисунок 7)

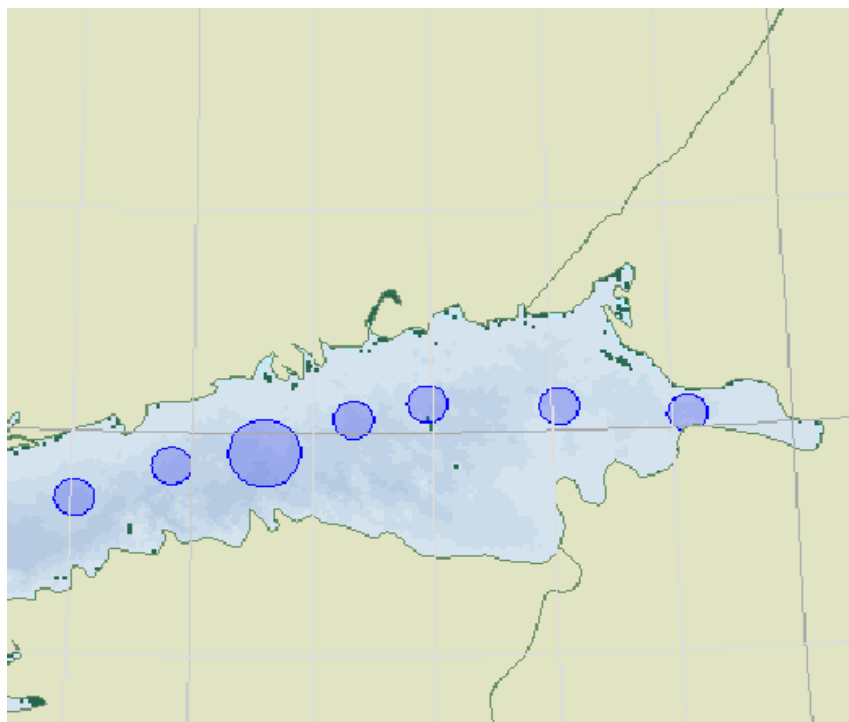


Рис.7. Карта распределения станций с базы данных NEST для Финского залива.

Было получено 1138 измерений по содержанию общего фосфора и азота с поверхностного слоя в зимний период, 1685 значений по измерениям концентрации летнего растворенного кислорода, полученных с придонного слоя, 686 измерений концентрации хлорофилла-а за летний период и 970 измерений прозрачности по диску Секки. В базе данных NEST отсутствовали измерения прозрачности за 1990, 1993-2001 и в последние годы с 2018 по 2024, анализ проводился без учета данных лет.

3) Для Гданьского залива также были отобраны все доступные данные в период с 1990 по 2024 год, на основе базы данных SHARK с 18 станций,

отмеченных на карте (Рисунок 8). Данные по содержанию растворенного кислорода и биогенным элементам были дополнены измерениями с базы данных ODIN с отметкой местоположения полученных данных на карте (Рисунок 8).

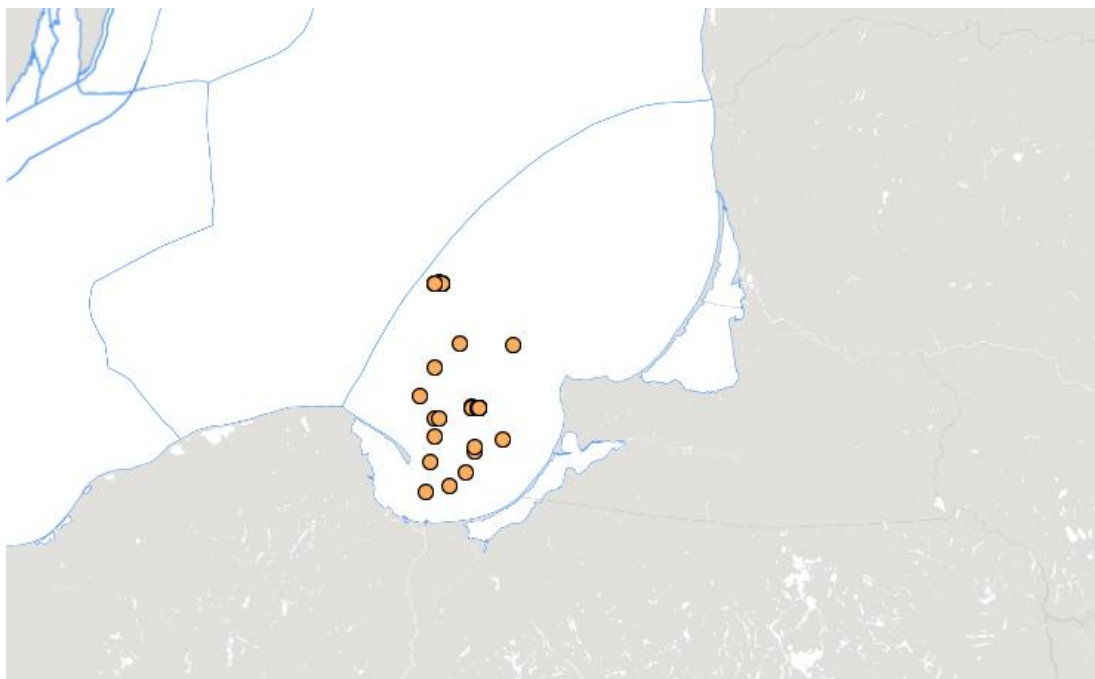


Рис.8. Карта распределения станций с базы данных SHARK для Гданьского залива.



Рис.9. Карта распределения мест измерений с базы данных ODIN для Гданьского залива.

Так, исходя из сбора данных по приведенным базам, было получено 1170 значений по содержанию биогенных элементов, 1640 измерений по концентрации растворенного кислорода, 200 измерений концентрации хлорофилла-а за 1990-1997 и 2016-2021 годы (в остальные промежутки лет информация отсутствует), 339 измерений прозрачности по диску Секки за 1990-1999 гг. В выбранном периоде с 1990 по 2024 год не учитывались 2007, 2012 и 2017 годы, по причине отсутствия данных по всем исследуемым индикаторам на базах данных за эти годы.

Количество всех полученных измерений со станций, взятых из разных баз данных и для разных подбассейнов, сведены в общую Таблицу 1.

Таблица 1 – Количество наблюдений индикаторов эвтрофикации по подбассейнам Балтийского моря.

	Общий Р, µмоль/л (зима)	Общий N, µмоль/л (зима)	Растворенн ый O ₂ , мл/л (лето)	Хлорофилл -а, µг/л (лето)	прозрачнос ть по лиску Секки, м (лето)
Ботническ ий	2981	2981	1286	595	2665
Финский	1138	1138	1685	686	970
Гданьский	1170	1170	1640	200	339

2.2 Оценка состояния экосистемы Ботнического залива

Для оценки изменчивости индикаторов, полученных за период 1990-2023, исследуемые данные по индикаторам были осреднены по рассматриваемому сезону за каждый год и приведены в Таблице 2.

Таблица 2 – Осредненные по сезонам данные индикаторов эвтрофикации в Ботническом заливе в период с 1990 по 2023 год.

Год	Общий Р, μмоль/л (зима)	Общий N, μмоль/л (зима)	Растворенн ый O ₂ , мл/л (лето)	Хлорофилл -а, μг/л (лето)	Прозрачно сть по диску Секки, м (лето)
1990	0,15	19,77	6,53	2,57	6,34
1991	0,19	19,61	6,09	1,60	7,40
1992	0,24	20,01	6,65	1,62	6,82
1993	0,18	19,84	6,53	1,18	6,52
1994	0,16	21,03	6,06	1,21	5,69
1995	0,17	19,18	6,42	1,09	5,79
1996	0,17	19,22	6,15	1,07	5,79
1997	0,16	18,74	6,08	0,88	6,54
1998	0,16	20,01	5,87	0,84	6,23
1999	0,15	20,04	6,11	1,04	5,72
2000	0,14	20,73	5,99	0,88	
2001	0,16	21,29	5,52	1,03	
2002	0,18	19,35	6,03	0,96	
2003	0,14	18,50	5,93	1,12	
2004	0,14	19,00	5,93	1,68	
2005	0,22	20,34	6,30	1,63	
2006	0,20	19,80	6,07	2,35	6,03
2007	0,20	20,88	5,66	2,48	
2008	0,19	19,79	5,95	2,93	
2009	0,22	19,96	6,16	2,15	
2010	0,26	19,31	5,84	2,07	
2011	0,22	18,94	5,70	2,50	4,37
2012	0,23	20,04	6,12	2,45	
2013	0,23	19,78	6,08	2,48	5,20

2014	0,24	20,18	6,13	2,83	4,52
2015	0,18	19,53	6,30	2,24	4,03
2016	0,18	20,04	6,07	2,38	4,69
2017	0,19	19,24	6,13	3,06	5,09
2018	0,23	19,09	5,27	2,26	4,02
2019	0,28	19,33	5,62	2,53	4,12
2020	0,30	18,20	4,90	2,53	4,76
2021	0,30	18,47	5,85	2,65	4,34
2022	0,23	21,07	5,95	2,56	4,53
2023	0,21	18,31	5,68	2,60	4,79

Для оценки состояния элементов биоразнообразия, других соответствующих факторов состояния окружающей среды и антропогенного давления на Балтийское море, ХЕЛКОМ в рамках мониторинга установил целевые значения индикаторов, поддерживающих измерение прогресса в достижении согласованных на региональном уровне целей и задач, определенных в Плане действий по Балтийскому морю (BSAP). Таким образом, состояние оценивается по отношению к научно обоснованным и общепринятым пороговым значениям, различающиеся для конкретного подбассейна Балтийского моря, которые определяют концентрацию, которая не должна быть превышена. Целевые значения индикаторов эвтрофирования, характерные для Ботнического залива приведены в Таблице 3.

Таблица 3 – Целевые значения индикаторов эвтрофикации для Ботнического залива [20].

Общий Р (зима), µмоль/л	Общий N (зима), µмоль/л	Растворенный O ₂ , мл/л	Хлорофилл- а, µг/л (лето)	Прозрачность по диску Секки, м
<0,18	<16,9	нет	<2	>5,8

Ботнический залив не имеет целевого значения по содержанию растворенного кислорода, по причине достаточного содержания кислорода в придонном слое за многолетний мониторинг, несмотря на это, контроль за содержанием кислорода в данном водном регионе безусловно ведется.

Основываясь на полученных сезонных осредненных данных по индикаторам за каждый год, рассматриваемого периода с 1990 по 2023 год и учетом установленных целевых значений по ним, были построены графики временной изменчивости индикаторов для дальнейшего анализа исследуемых показателей эвтрофикации в Ботническом заливе.

Значения содержания общего фосфора в зимние месяцы за период с 1990 по 2023 год варьировалось в диапазоне от 0,138 до 0,301 $\mu\text{моль/л}$ (Рисунок 10). По данным измерений линейный тренд положительный, рост содержания фосфора за наблюдаемый период примерно равно +0,0027 $\mu\text{моль/л}$ в год. Таким образом, наблюдается умеренная изменчивость, где превышение целевого значения наблюдается в 20 годах, в периоды с 1991–1993, с 2005–2014, а также в последние годы с 2017–2023. Данное увеличение фосфора может вызвать рост фитопланктона (хлорофилл-а) и цветение водорослей, а далее привести к снижению кислорода.

В ситуации с содержанием общего азота, который варьировался в диапазоне от 18,20 до 21,29 $\mu\text{моль/л}$ за период с 1990 по 2023 год, превышение целевого значения наблюдалось стабильно во все годы, что могло способствовать цветению воды (Рисунок 11). Однако построенный по данным линейный тренд отрицательный, наблюдается слабый спад примерно -0,021 $\mu\text{моль/л}$ в год.

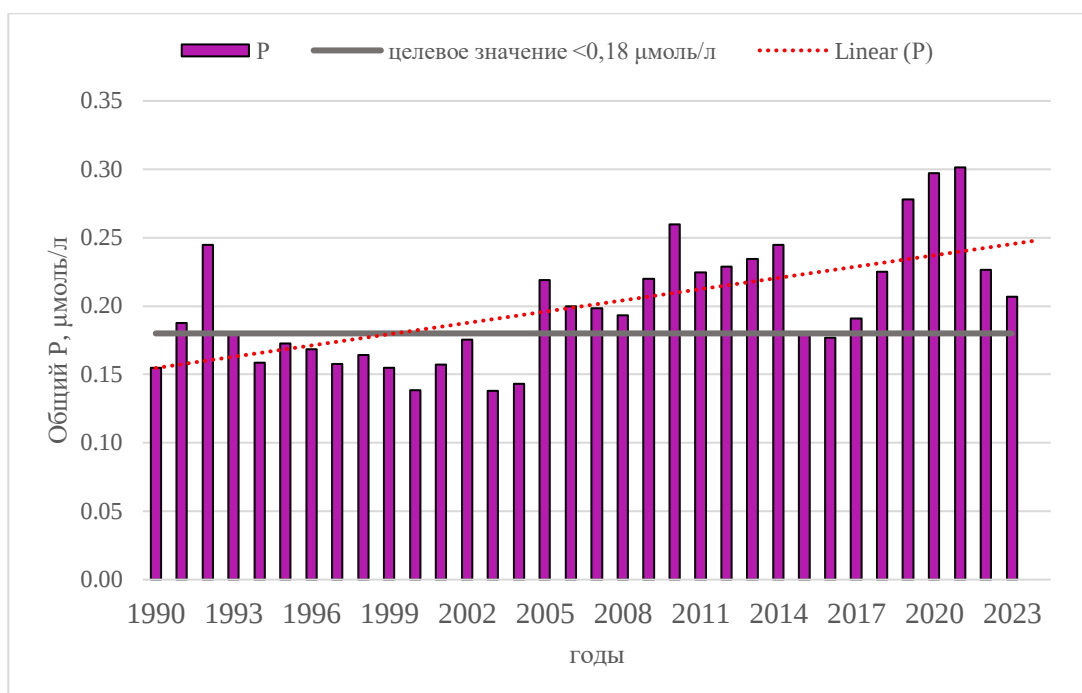


Рис.10. Изменчивость зимнего содержания общего фосфора в поверхностном слое Ботнического залива за период 1990-2023 гг.

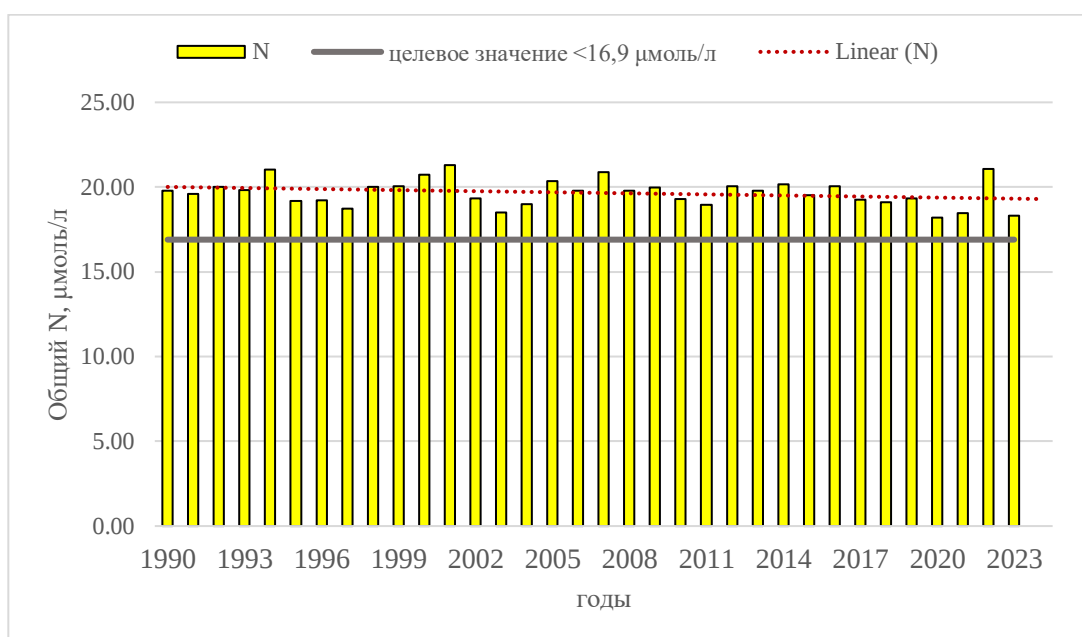


Рис.11. Изменчивость зимнего содержания общего азота в поверхностном слое Ботнического залива за период 1990-2023 гг.

Концентрация растворенного кислорода в придонном слое в рассматриваемый период варьировалась в диапазоне от 7 до 9,5 мл/л. На рисунке 12 визуально заметно снижение растворенного кислорода, на что также

отчетливо указывает линейный тренд. Спад примерно равен $-0,0275$ мл/л в год. Для данного индикатора в Ботническом заливе ХЕЛКОМ не выделял целевого значения, однако подобное снижение кислорода может привести к гипоксии, потому данная тенденция изменчивости вызывает тревогу.

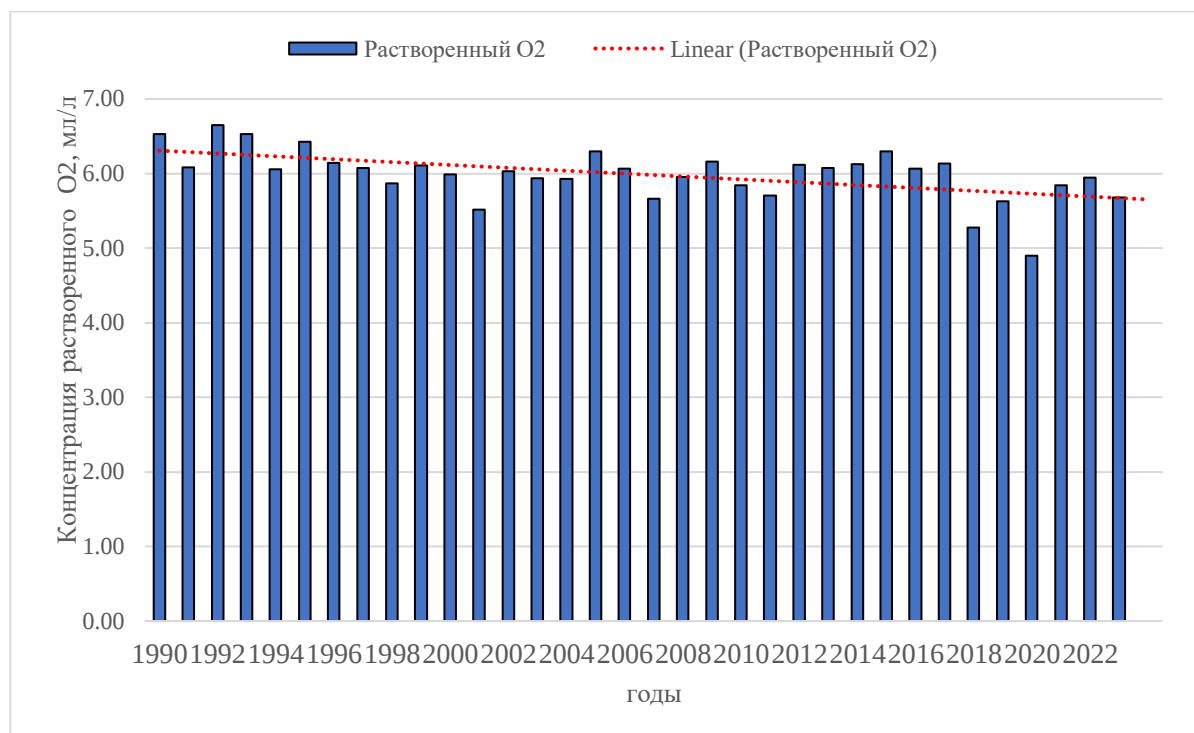


Рис.12. Изменчивость летней концентрации растворенного кислорода в придонном слое Ботнического залива за период 1990-2023 гг.

По рисунку 13, хлорофилла-а оказался наиболее варьирующим показателем, диапазон значений которого составил от 0,84 до 3,06 мкг/л, тем самым наблюдалась высокая изменчивость в период 1990-2023 гг. С учетом повышения роста концентрации хлорофилла-а, ожидаемо превышение целевого значения, которое было замечено в период с 2006 по 2023 год, но также превышение наблюдалось в 1990 году. Данные годы с превышенным значением концентрации классифицируются как мезотрофные (2-8 мкг/л). Подобный рост указывает на увеличение первичной продукции и эвтрофикацию. Также стоит отметить, что рост вероятно обусловлен ростом фосфора, выявленным ранее,

между индикаторами отмечается положительная корреляция, коэффициент которой равен 0,61.

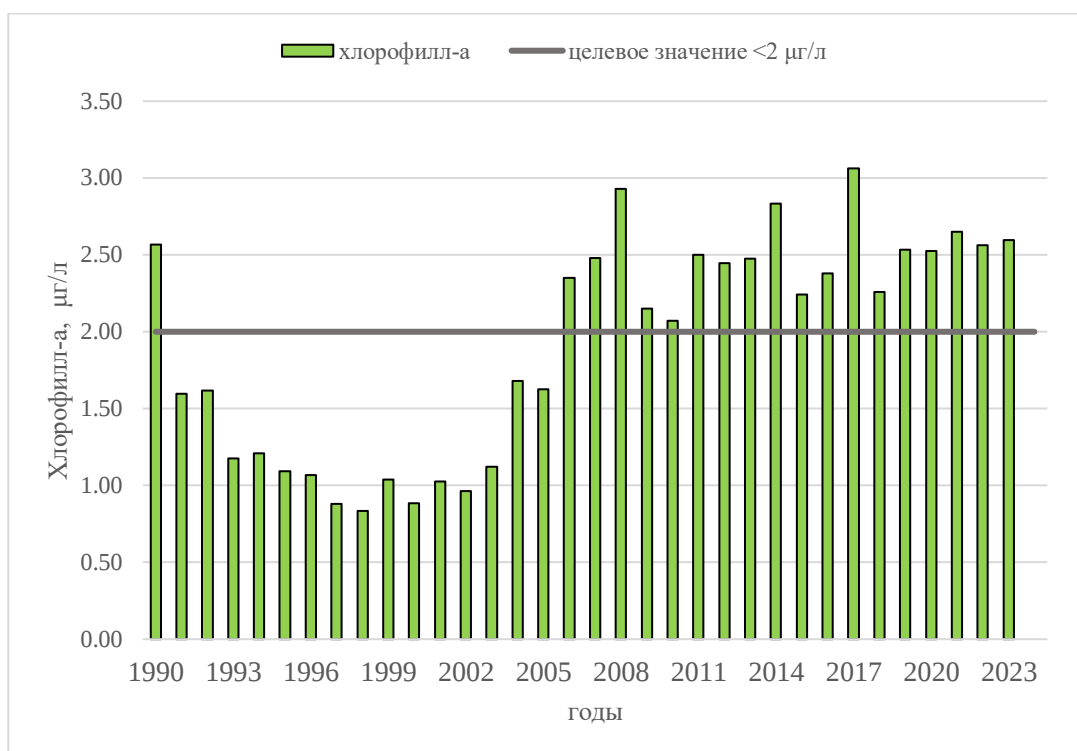


Рис.13. Изменчивость летней концентрации хлорофилла-а в Ботническом заливе за период 1990-2023 гг.

При эвтрофикации из-за увеличения фитопланктона и взвешенных частиц прозрачность по диску Секки обычно уменьшается, что как раз отражено на рисунке 14. По данным наблюдений в период с 1990-2023 гг значения прозрачности Секки варьируется в диапазоне от 4,02 до 7,40 м, что указывает на высокую изменчивость. Стоит учитывать, что данные по прозрачности получены не за все года в рассматриваемом периоде, что немного снижает достоверность оценки, однако при соотношении изменчивости данных по хлорофиллу-а, отраженных на рисунке 9, полученных данных по прозрачности достаточно, поскольку года с высоким значением хлорофилла-а показывают более низкую прозрачность. У хлорофилла-а и прозрачности отмечается значимая отрицательная корреляционная связь, коэффициент которой равен -0,65. Несоответствия целевым значениям наблюдались в периоды с 1994–1996, 1998–

1999, а затем заметное ухудшение в те времена, когда наблюдалось превышение по концентрации хлорофилла-а, а именно в 2006, 2011, и 2013–2023. Удовлетворительные значения прозрачности в период с 1990 по 1999 год связаны с высоким содержанием растворенного кислорода в те годы, между индикаторами отмечается положительная корреляционная связь с коэффициентом равным 0,55.

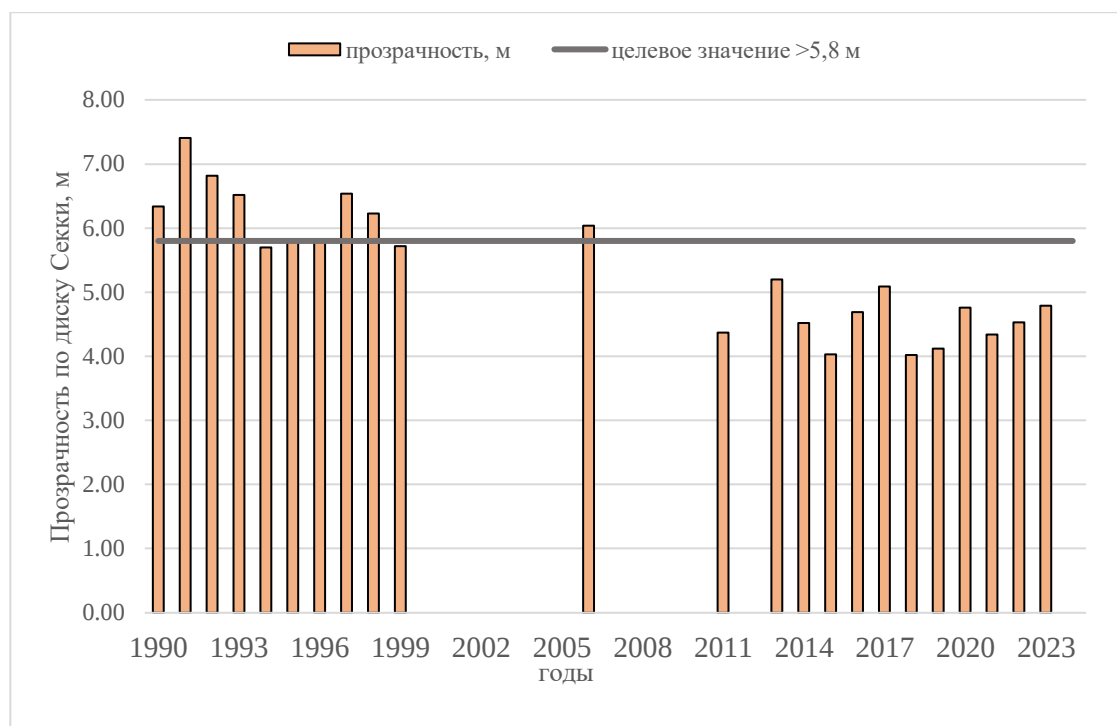


Рис. 14. Изменчивость прозрачности по диску Секки в летние месяцы в Ботническом заливе за период 1990-2023 гг.

Таким образом, состояние Ботнического залива ухудшается, что связано с усилением антропогенной нагрузки и изменениями климата в регионе. Устойчивое превышение ключевых показателей (фосфора, азота, хлорофилла, прозрачности) указывает на систематическое нарушение экологического баланса. Несмотря на то, что кислород пока не достиг критических значений, тенденции предполагают возможное развитие гипоксических условий в будущем, особенно при продолжении потепления и увеличения поступления биогенных соединений в водоем.

2.3 Оценка состояния экосистемы Финского залива

Для анализа межгодовой изменчивости исследуемых индикаторов за период 1990-2024 гг., исходные данные по каждому индикатору были усреднены по сезонам наблюдений за каждый год и представлены в Таблице 4.

Таблица 4 – Данные индикаторов эвтрофикации в Финском заливе в период с 1990 по 2024 год.

Год	Общий Р, μмоль/л (зима)	Общий N, μмоль/л (зима)	Растворен ный O ₂ , мл/л (лето)	Хлорофил л-а, μг/л (лето)	Прозрачн ость по диску Секки, м (лето)
1990	0,66	27,16	6,16	3,51	
1991	0,82	28,48	4,84	3,00	7,50
1992	0,92	30,50	6,68	5,03	6,50
1993	0,90	29,59	6,11	2,65	
1994	0,81	27,54	5,42	2,80	
1995	1,07	30,57	6,13	4,77	
1996	0,94	29,13	2,78	3,15	
1997	1,30	30,44	4,30	5,50	
1998	1,15	28,02	4,84	4,38	
1999	1,11	28,46	5,19	4,87	
2000	1,18	28,80	4,05	4,62	
2001	1,13	29,98	2,50	3,50	
2002	1,17	27,88	4,42	4,00	7,00
2003	0,95	23,60	1,15	4,03	7,00
2004	1,50	24,43	1,88	4,25	5,50
2005	1,10	28,15	2,52	5,10	5,00
2006	1,24	29,02	0,97	5,50	5,00

2007	1,13	25,59	1,20	3,80	6,00
2008	1,10	22,40	2,10	3,70	5,00
2009	1,05	29,68	1,22	3,80	7,00
2010	1,07	28,34	2,05	4,40	4,00
2011	1,31	25,66	1,23	4,82	5,50
2012	1,30	26,09	2,05	5,94	5,30
2013	1,27	27,65	1,45	3,58	5,26
2014	1,20	27,24	1,95	3,20	5,00
2015	1,20	26,30	2,38	4,43	5,00
2016	1,18	23,33	1,97	4,90	4,50
2017	1,28	25,30	0,76	5,08	4,00
2018	1,22	25,62	0,88	4,92	
2019	1,28	26,30	1,04	4,80	
2020	1,35	26,18	1,49	5,13	
2021	1,35	29,23	1,55	5,50	
2022	1,35	25,48	1,29	3,78	
2023	1,53	26,10	1,31	3,96	
2024	1,48	26,75	0,92	4,00	

Для определения уровня эвтрофирования используются общепринятые целевые значения индикаторов, оцененные на основе Плана действия HELCOM по Балтийскому морю. Выявленные целевые значения определяют «хороший экологический статус» и различны для каждого суббассейна Балтийского моря. Установленные целевые значения исследуемых индикаторов, характерных для Финского залива приведены в Таблице 5.

Таблица 5 – Целевые значения индикаторов эвтрофирования для Финского залива [20].

Общий Р (зима), μмоль/л	Общий N(зима), μмоль/л	Растворен ный О ₂ , мл/л	Хлорофил л-а, μг/л (лето)	Прозрачно сть по дису Секки, м
<0,56	<22,15	>2,17	<4,37	>5,42

На основе усредненных значений каждого индикатора по сезону за каждый год построены графики, по которым визуально наблюдаются устойчивые тренды, а также отмечено целевое значение для последующей оценки состояния Финского залива (Рисунки 15-19).

В Финском заливе в течение всего рассматриваемого периода 1990-2024 гг. наблюдается устойчивое повышение содержания общего фосфора (0,015 μмоль/л в год), значения которого изменялись в диапазоне от 0,65 до 1,05 μмоль/л, что значительно превышали целевое значение во все рассматриваемые годы (Рисунок 15).

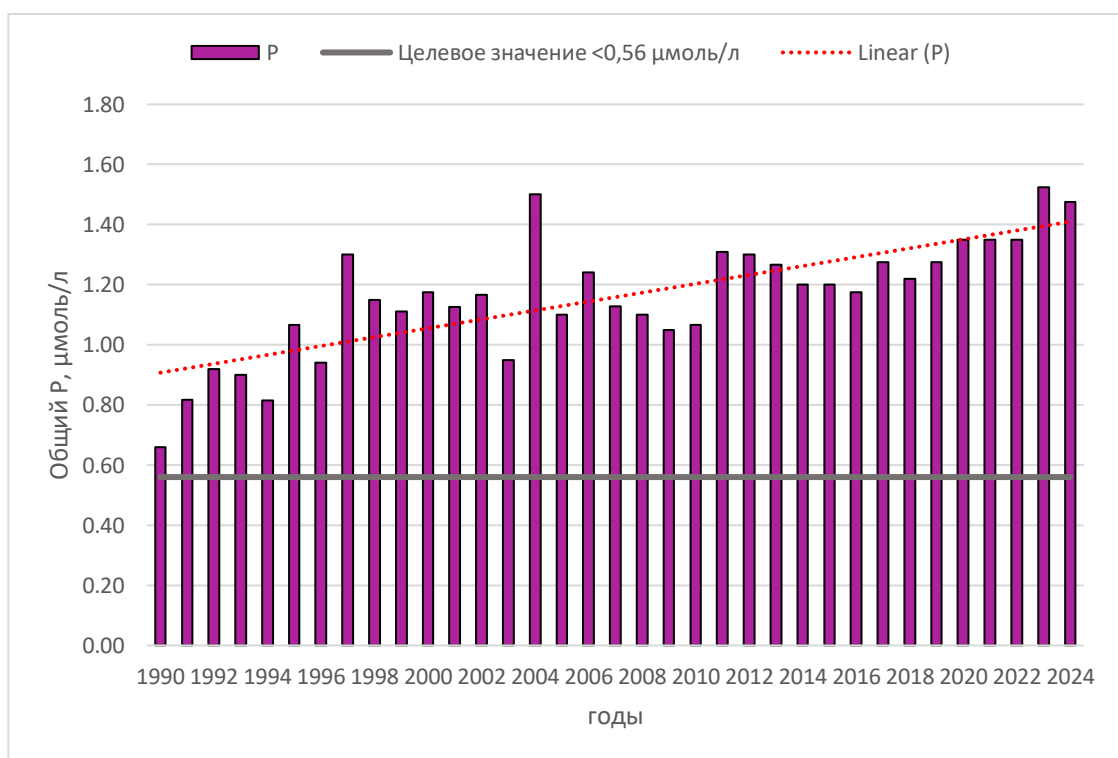


Рис. 15. Изменчивость зимнего содержания общего фосфора в поверхностном слое Финского залива за период 1990-2024 гг.

Концентрация общего азота также превышала целевое значение во все годы с 1990 по 2024, тем самым выделялся стойкий избыток соединений азота, значения которого варьировались от 22 до 31 $\mu\text{моль/л}$ (Рисунок 16). Однако в сравнении с концентрацией общего фосфора по данному показателю наблюдается отрицательный тренд, представляющий собой незначительное снижение на 0,1012 $\mu\text{моль/л}$ в год. В последние годы наблюдается приближение к целевому значению, однако превышение все еще сохраняется.

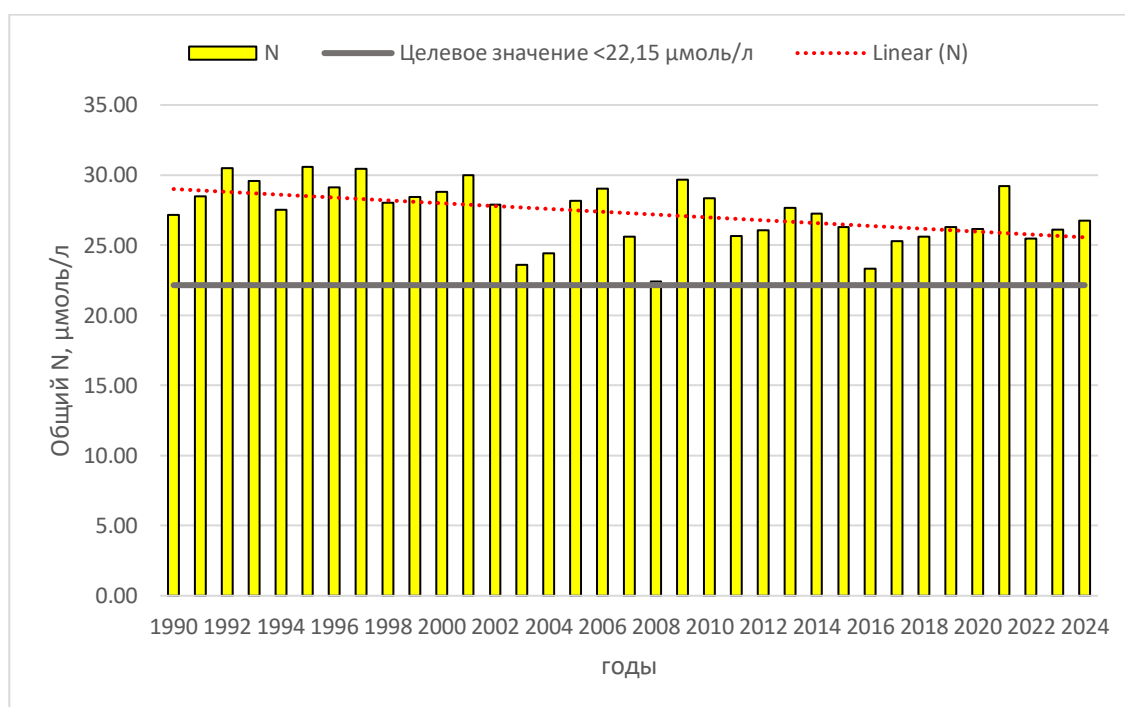


Рис.16. Изменчивость зимнего содержания общего азота в поверхностном слое Финского залива за период 1990-2024 гг.

Значительный дефицит отмечается в содержании растворенного кислорода в 20 годах: 2003–2004, 2006–2014, 2016–2024, где значения не доходят до целевого показателя (Рисунок 17). Изменчивость варьируется от 0,76 до 6,68 мл/л. Данная тенденция является признаком ухудшения условий для водной фауны. Четко наблюдается стремительный отрицательный тренд, кислород снижается высокими темпами примерно по 0,15 мл/л в год. Снижение концентрации растворенного кислорода связано с повышением содержания общего фосфора, коэффициент корреляции между которыми составляет -0,65,

отражающий отрицательную корреляционную связь. Ухудшение кислородного режима в нижних слоях способствует вероятному проявлению гипоксии, особенно в тёплые годы.

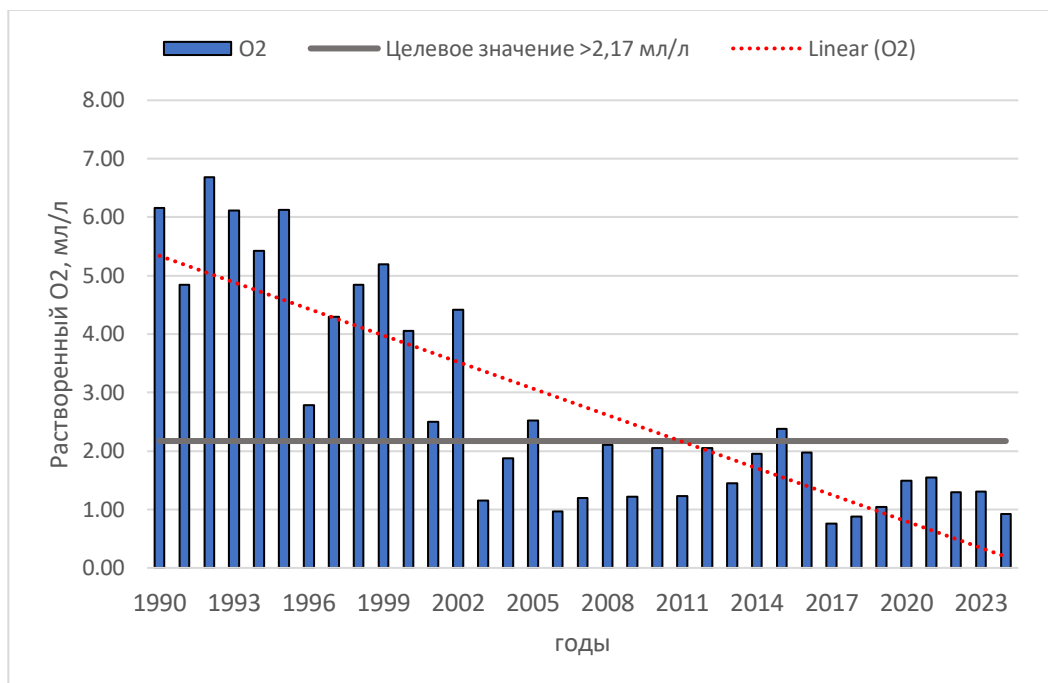


Рис.17. Изменчивость летней концентрации растворенного кислорода в придонном слое Финского залива за период 1990-2024 гг.

Изменчивость концентрации хлорофилла-а колеблется от 2,5 до 5,5 $\mu\text{г/л}$. Отмечается умеренный рост, что подтверждается положительным линейным трендом, скорость роста составляет примерно 0,025 $\mu\text{г/л}$ (Рисунок 18). Превышение целевого значения отмечается во все рассматриваемые годы, но также присутствуют года со значениями близкими к целевому. Таким образом, во все годы воды классифицировалась, как мезотрофные. Подобные колебания в межгодовой изменчивости указывают на регулярные "цветения воды". Рост значения хлорофилла-а обусловлен и подтверждается ростом содержания общего фосфора, корреляционная связь между данными индикаторами положительная, коэффициент корреляции составляет 0,47.

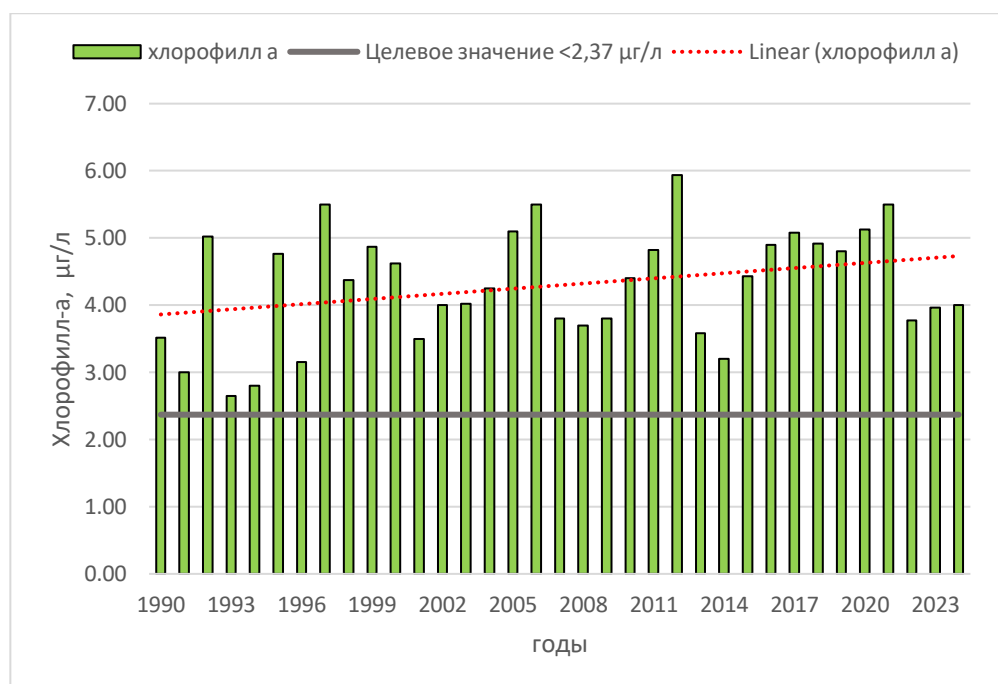


Рис.18. Изменчивость летней концентрации хлорофилла-а в Финском заливе за период 1990-2024 гг.

По последнему исследуемому индикатору эвтрофикации имеются пробелы в период с 1993 по 2001 год, а также за последние годы с 2019 по 2024, по причине отсутствия данных. Вследствие неполной информации за исследуемый период, при оценке многолетней изменчивости прозрачности тренд не строился. По имеющимся данным, значение прозрачности по диску Секки колеблется от 4 до 8 метров, прозрачность ниже целевого значения отмечалась в 2005, 2006, 2008, 2010, 2012–2017, что изображено на рисунке 19. Сильное снижение и ухудшение прозрачности наблюдается после 2010 года, что связано с ростом концентрации хлорофилла-а и повышением содержания общего фосфора. Отмечается отрицательная корреляционная связь между показателем прозрачности вод и концентрацией хлорофилла-а, коэффициент между которыми равен -0,35.

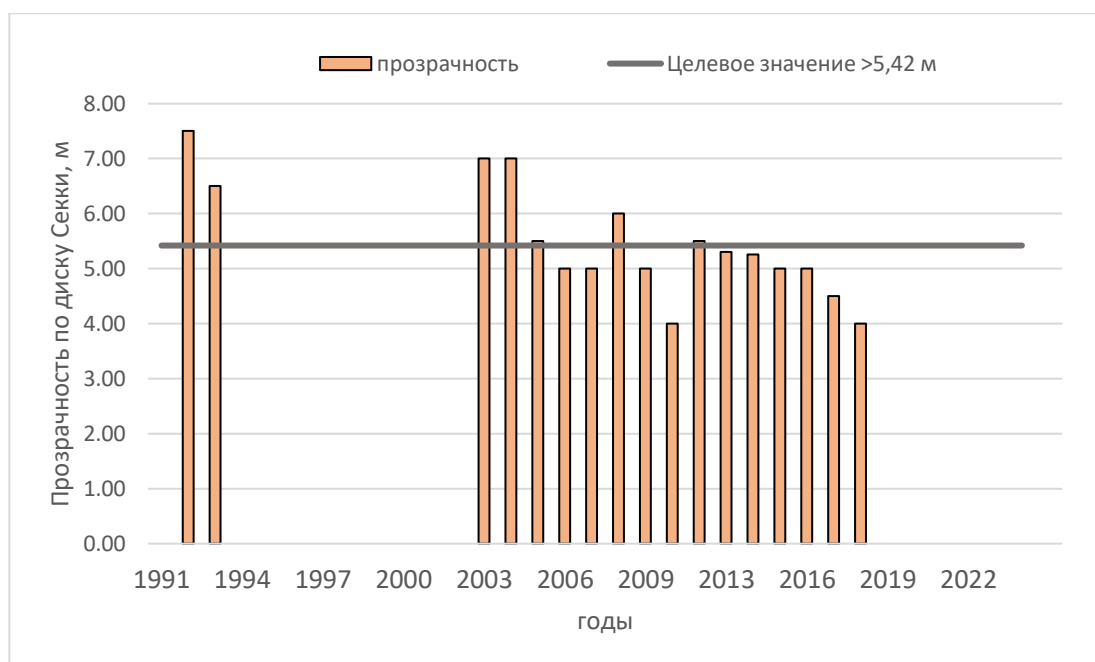


Рис.19. Изменчивость прозрачности по диску Секки в Финском заливе в летние месяцы за период 1990-2024 гг.

Анализируя все данные, Финский залив все больше подвергается процессу эвтрофикации, на что указывает превышение целевых значений среди всех основных индикаторов и с каждым годом тенденция указывает на ухудшение состояния данного подбассейна. Низкое содержание растворенного кислорода в придонных водах указывает на процесс гипоксии и появлению заморов, что отрицательно сказывается на состоянии экосистемы Финского залива. Несмотря на небольшое снижение содержания общего азота, остальные индикаторы указывают на характерное усиление процесса эвтрофикации в Финском заливе, линейные тренды также подтверждают, что данная проблема носит долговременный характер.

2.4 Оценка состояния экосистемы Гданьского залива

С целью последующего анализа динамики изменений, значения индикаторов, полученные с баз данных за период с 1990 по 2024 год были

усреднены по соответствующему сезону каждого года для каждого индикатора эвтрофикации и сведены в общую Таблицу 6.

Таблица 6 – Данные индикаторов эвтрофикации в Финском заливе в период с 1990 по 2024 год.

Год	Общий Р, μмоль/л (зима)	Общий N, μмоль/л (зима)	Растворен ный O ₂ , мл/л (лето)	Хлорофил л-а, μг/л (лето)	Прозрачн ость по диску Секки, м (лето)
1990	1,20	21,41	4,60	3,30	8,20
1991	0,70	21,50	3,25	3,30	8,00
1992	0,98	24,76	5,52	3,18	7,40
1993	0,90	23,10	4,05	3,10	7,35
1994	0,96	23,54	4,50	2,18	7,10
1995	0,80	26,70	4,80	2,10	7,50
1996	1,02	25,92	5,70	2,10	9,00
1997	0,90	23,37	4,50	2,55	3,93
1998	1,08	23,82	5,30		6,75
1999	1,18	24,80	5,27		5,63
2000	1,34	21,59	4,71		
2001	1,22	22,70	4,68		
2002	0,92	22,14	5,41		
2003	1,04	19,90	4,90		
2004	1,04	20,74	4,65		
2005	1,28	23,09	4,85		
2006	1,63	21,76	4,35		
2008	1,79	23,00	4,52		
2009	1,57	24,48	4,08		
2010	1,37	21,58	4,64		

2011	1,28	22,50	5,21		
2013	1,34	22,80	4,69		
2014	1,57	21,38	4,33		
2015	1,33	21,74	4,90		
2016	2,11	23,01	4,41	4,98	
2018	1,75	22,17	3,90	5,20	
2019	1,35	22,22	4,70	3,00	
2020	1,53	20,87	4,35	4,10	
2021	1,70	22,13	4,47	6,00	
2022	1,28	21,38	5,11		
2023	1,44	20,27	3,28		
2024	1,34	19,40	5,21		

Для Гданьского залива есть характерные данному региону установленные целевые значения, выявленные на основе Плана действия HELCOM по Балтийскому морю, по которым оценивается экологическое состояние акватории. Целевые значения исследуемых индикаторов, используемые для оценки уровня эвтрофикации Гданьского залива приведены в Таблице 7.

Таблица 7 – Целевые значения индикаторов эвтрофирования для Гданьского залива [20].

Общий Р (зима), µмоль/л	Общий N (зима), µмоль/л	Растворенный О ₂ , мл/л	Хлорофилл- а, µг/л (лето)	Прозрачность по диску Секки, м
<0,6	<18,8	нет	<2,2	>6,5

По содержанию растворенного кислорода в придонном слое не установлено конкретное целевое значение для данного региона Балтийского моря, вместо этого для оценки экологического состояния Гданьского залива используется индикатор «кислородный долг», который измеряет дефицит кислорода ниже галоклина. Целевое значение для этого показателя составляет 8,66 µг/л, где превышение данного значения указывает на неблагоприятное состояние

экосистемы исследуемого водного региона. Таким образом, использование показателя кислородного долга позволяет оценить состояние кислородного режима в этой акватории.

Анализируя полученные данные по индикаторам эвтрофикации, полноценная оценка межгодовой изменчивости в рассматриваемый период проводилась по индикаторам содержания биогенных элементов и концентрации растворенного кислорода в придонном слое, поскольку за выбранный период 1990-2023 отсутствует часть данных по концентрации хлорофилла-а и прозрачности по диску Секки в некоторые годы, в особенности после 1999 года, таким образом графики изменчивости по этим показателям не строились и не рассматривались в оценке состояния экосистемы Гданьского залива.

По содержанию общего фосфора в Гданьском заливе в период 1990-2024 гг. наблюдается устойчивое повышение ($0,019 \mu\text{моль/л}$ в год), значения которого изменялись в диапазоне от $0,7$ до $2,11 \mu\text{моль/л}$, что значительно превышали целевое значение во все рассматриваемые годы (Рисунок 20). С 2005 года отмечался рост содержания общего фосфора, который после 2016 года начал снижаться, но все еще имел превышение по отношению к целевому значению.

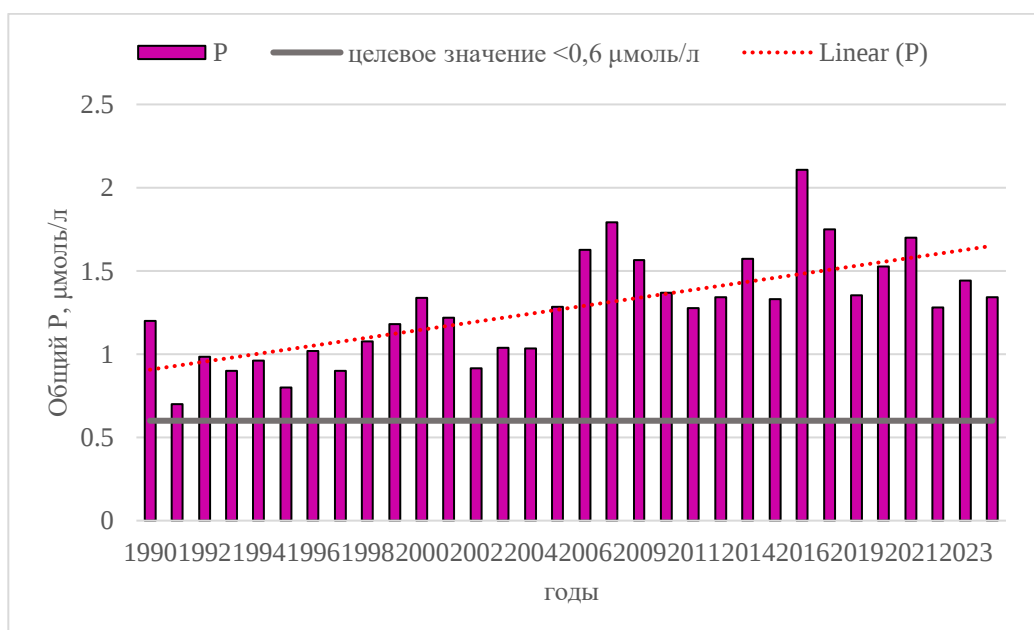


Рис.20. Изменчивость зимнего содержания общего фосфора в поверхностном слое Гданьского залива за период 1990-2024 гг.

Содержание общего азота также превышало целевое значение во все годы с 1990 по 2024, значения которого варьировались от 19,40 до 26,7 $\mu\text{моль/л}$ (Рисунок 21). В отличие от динамики содержания общего фосфора по данному показателю отмечается отрицательный тренд, представляющий собой незначительное снижение примерно на 0,1 $\mu\text{моль/л}$ в год. В последние годы, начиная с 2010 года наблюдается благоприятная тенденция приближения к целевому значению, однако небольшое превышение все еще сохраняется в 2024 году.

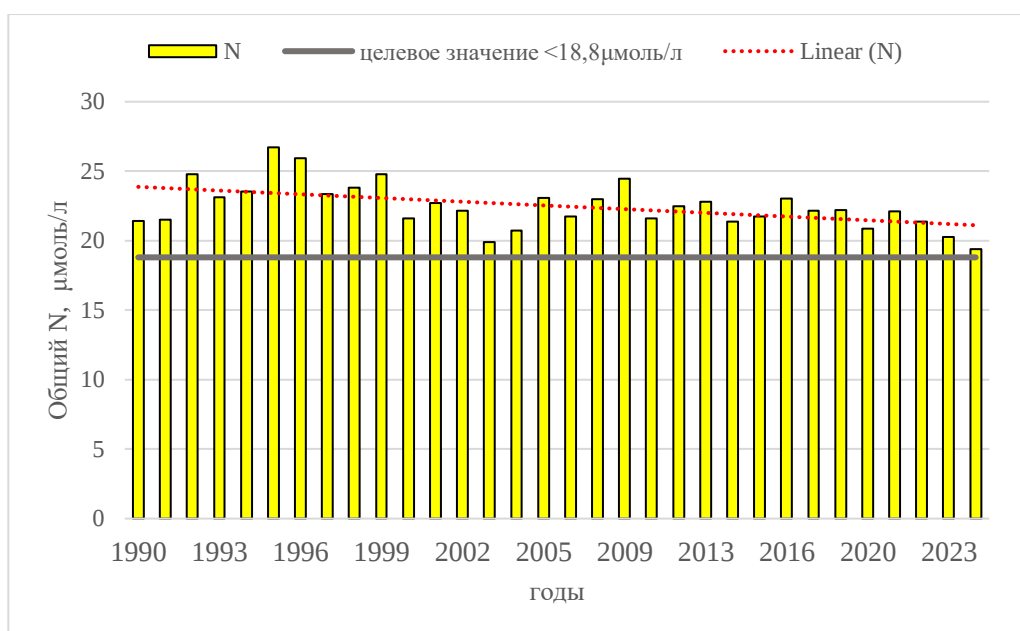


Рис.21. Изменчивость зимнего содержания общего азота в поверхностном слое Гданьского залива за период 1990-2024 гг.

Концентрация растворенного кислорода в придонном слое в рассматриваемый период варьировалась в диапазоне от 3,25 до 5,7 мл/л и отмечалась умеренная изменчивость, по тренду наблюдается незначительный спад около 0,035 мл/л (Рисунок 22). Поскольку для данного индикатора в Гданьском заливе ХЕЛКОМ не выделял целевого значения, оценка проводилась на основе кислородного долга, целевое значение которого не превышено и концентрация растворенного кислорода в придонном слое находилась на оптимальном уровне для летнего периода, также не были замечены значения

ниже 2 мл/л, что указывало бы на проявление гипоксии и дальнейших заморозов. Однако в 1991 и 2023 годах замечены низкие показатели содержания растворенного кислорода по отношению к значениям остальных лет. Снижение кислорода взаимосвязано с повышением содержания общего фосфора, корреляционный коэффициент между данными показателями составляет -0,57.

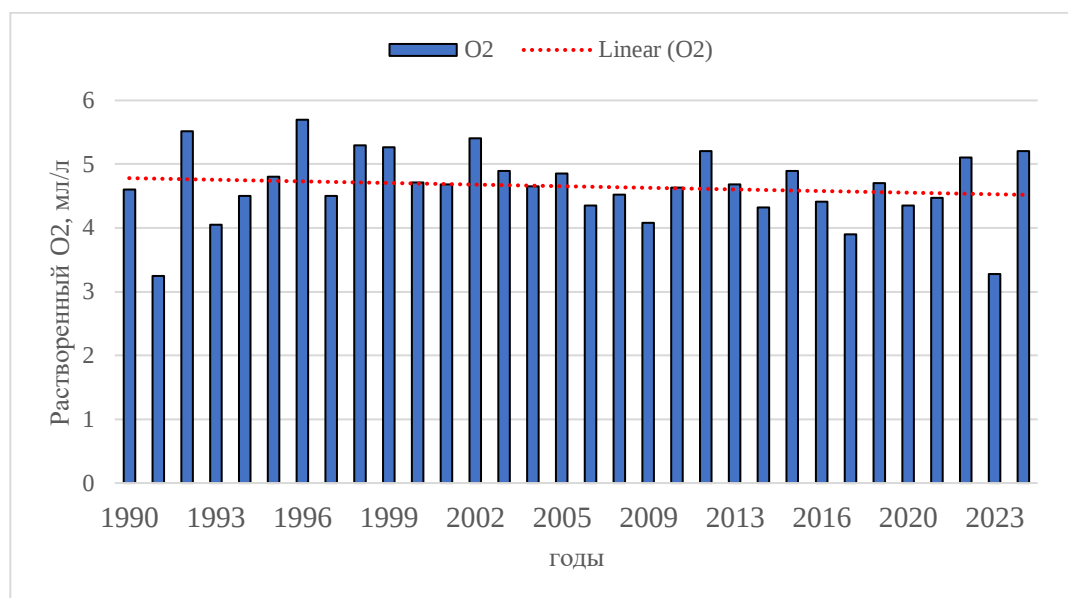


Рис.22. Изменчивость летней концентрации растворенного кислорода в придонном слое Гданьского залива за период 1990-2024 гг.

По имеющимся некоторым данным концентрации хлорофилла-а в 1990-1997 гг. отмечаются значения близкие к целевому значению, где в 1994-1996 годах превышение не наблюдалось и воды были близки к олиготрофным. По данным, полученным в период с 2016 по 2021 наблюдается превышение, что говорит о вероятном росте с каждым годом, однако для точной оценки изменчивости показателя хлорофилла-а данных не хватает. Повышение концентрации хлорофилла-а за рассмотренные периоды разных десятилетий связано с увеличением содержания общего фосфора, что вызывает рост хлорофилла-а.

Значения прозрачности по диску Секки имеются за первое десятилетие рассматриваемого периода, где с 1990 по 1999 год наблюдается понижение

прозрачности, тем самым ухудшение по отношению к целевому значению, однако данные по дальнейшим изменениям с 2000 по 2024 год отсутствуют.

Исходя из рассмотренных изменчивостей индикаторов содержания биогенных элементов и концентрации растворенного кислорода, Гданьский залив находится в устойчивом эвтрофном состоянии. Превышение целевых значений по общему фосфору и азоту стимулирует продуктивность, что приводит к росту хлорофилла-а, снижению прозрачности и снижению концентрации растворенного кислорода в придонном слое, который также был отмечен в анализе по изменчивости в рассмотренный период 1990-2024 гг. Для улучшения состояния залива требуется контроль за сбросами биогенных веществ и снижение антропогенной нагрузки.

3. Сравнительная характеристика уровня загрязненности подбассейнов Балтийского моря по индикаторам

По итогам всех оценок состояния экосистем Ботнического, Финского и Гданьского залива на основе расчетов, стоит провести сравнительный анализ уровня загрязненности подбассейнов Балтийского моря по индикаторам, чтобы подвести итог и выявить степень эвтрофикации по районам исследования.

В рассмотренные периоды содержание общего фосфора растет во всех заливах, что можно увидеть на рисунке 23. Самый высокий уровень и рост содержания данного индикатора наблюдается в Гданьском заливе, в котором данный индикатор имеет значительное влияние на экосистему. Умеренное повышение в отношении остальных подбассейнов имеет Финский залив. В Ботническом заливе наблюдались года, в которых содержание общего фосфора соответствовало целевому значению, потому тенденция роста данного индикатора в данном подбассейне минимальная.

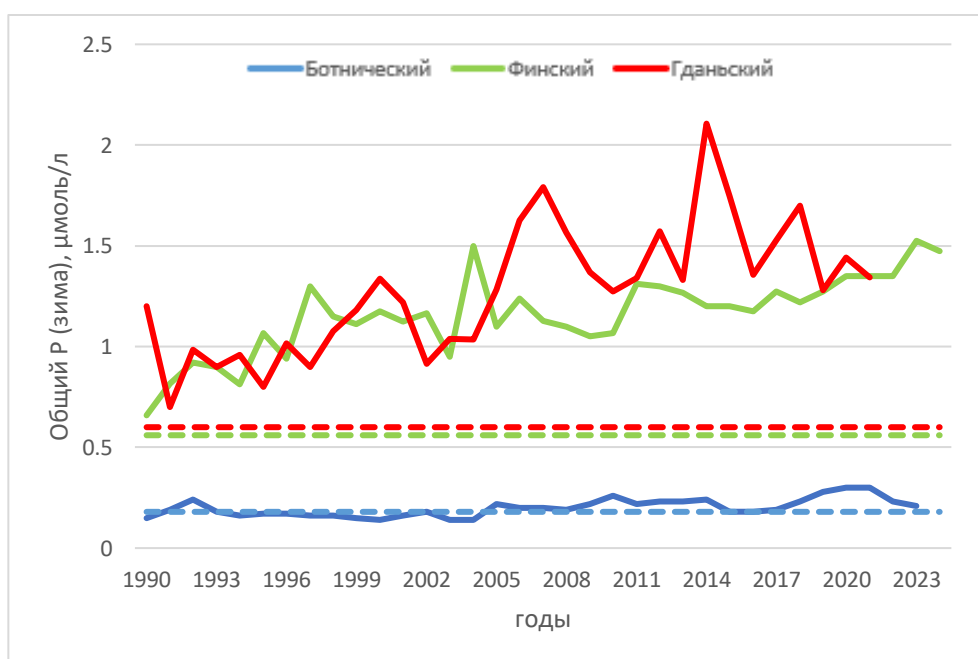


Рис. 23. Изменчивость содержания общего фосфора во всех заливах с 1990 по 2023 год (пунктир — целевое значение)

Содержание общего азота во всех подбассейнах превышает целевые значения, во временной изменчивости наблюдается снижение, однако все равно отмечается высокое содержание данного индикатора (Рисунок 24). Финский залив выделяется наибольшими значениями общего азота в сравнении с остальными подбассейнами. Минимальные концентрации и медленное снижение по тренду, равное 0,021 $\mu\text{моль/л}$ в год отмечаются в Ботническом заливе.

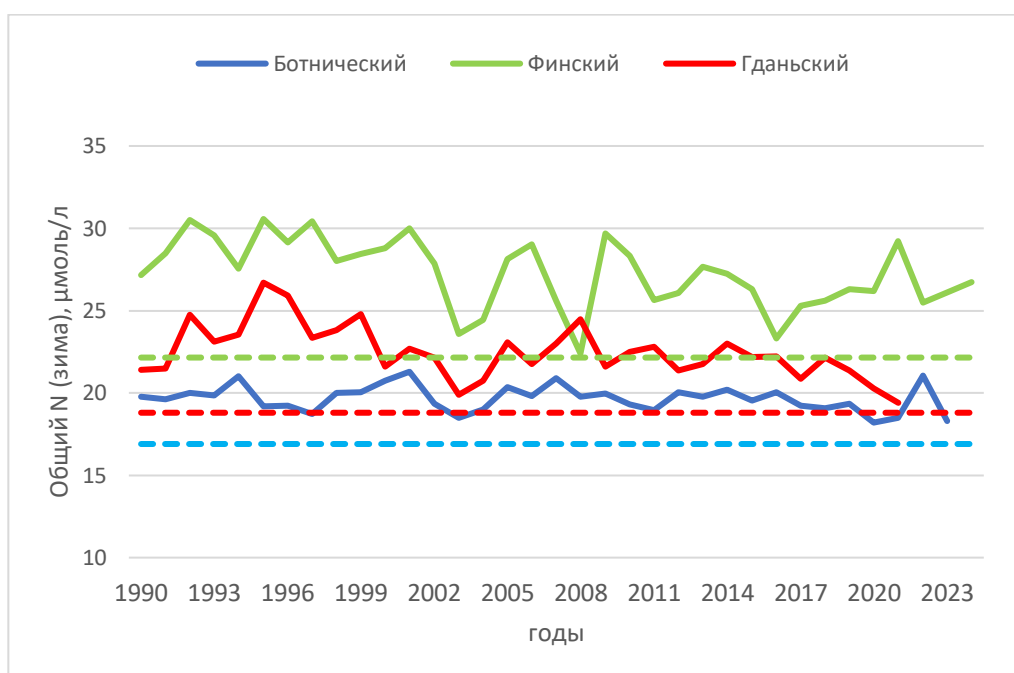


Рис.24. Изменчивость содержания общего азота во всех заливах с 1990 по 2023 год (пунктир – целевое значение)

В таблице 8 приведена международная классификация трофности по отношению биогенных элементов. На основе которой рассмотрим, к какой характеристике вод относятся отношения полученных данных по биогенам за период с 1990 по 2023, а также сравним соответствие отношения установленных целевых значений ХЕЛКОМ с международной классификацией характера вод.

Таблица 8 – Классификация вод по отношению содержания общего азота к общему фосфору по Алекину (1985) [19]

Характеристика вод	Нобщ:Робщ
Олиготрофные	30-40
Мезотрофные	25-30
Эвтрофные	15-25
Гипертрофные	12-15

Поскольку в Ботническом заливе наблюдаются довольно низкие концентрации биогенных элементов, что уже определяет его воды как олиготрофные, рассматриваться в сравнении с другими заливами данный подбассейн Балтийского моря не будет. Отношение установленных целевых значений ХЕЛКОМ по Финскому заливу равно 39,5, по Гданьскому заливу данное отношение целевых значений равно 31,3, что соответствует олиготрофному типу вод.

На рисунке 25 отмечены отношения целевых значений, а также значения отношения общN/общP по полученным данным, которые уменьшаются в течении рассматриваемого периода 1990-2023 гг. Гданьскому заливу в 1990 году соответствовали эвтрофные воды, далее до 1997 года наблюдалась мезотрофная характеристика вод, а далее с 1998 года воды характеризовались как эвтрофные, что указывает на ухудшение экологического состояния. Ситуация по биогенным элементам также ухудшилась и для Финского залива, в котором до 1996 года воды характеризовались, как олиготрофные, с 1997 по 2003 и в 2009 мезотрофные, а с 2004 по 2023 (кроме 2009) наблюдается эвтрофная характеристика.

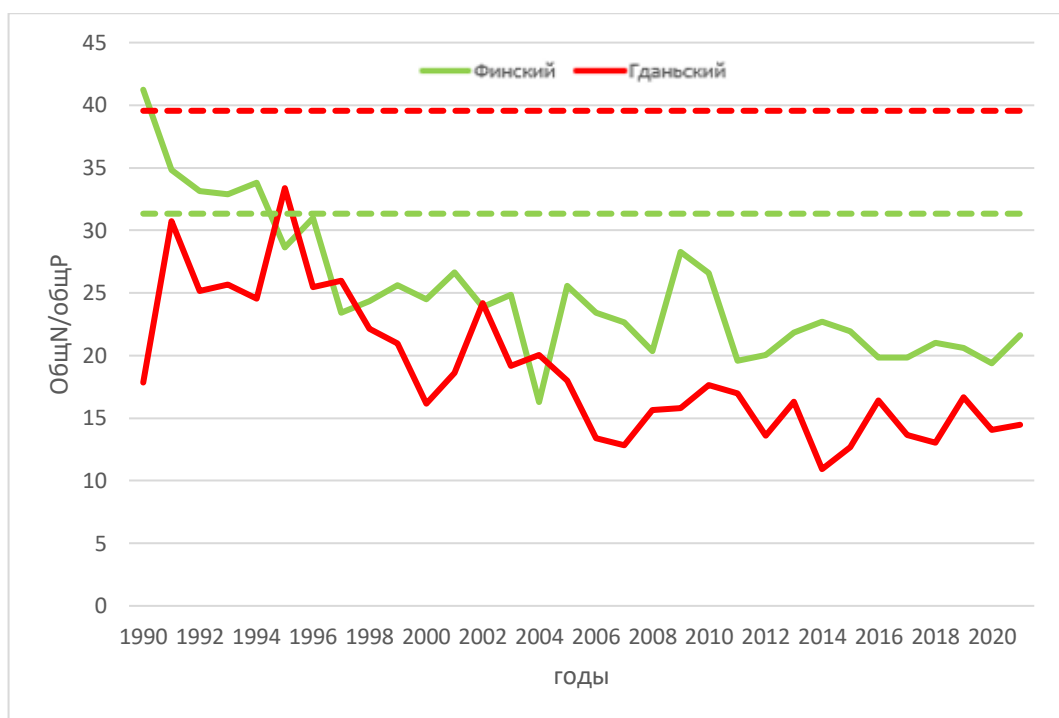


Рис. 25. Изменчивость общN/общP в Финском и Гданьском заливах с 1990 по 2023 год (пунктир - общN/общP по целевым значениям).

На рисунке 26 по концентрации растворенного кислорода выделяется также Финский залив, в котором наблюдается значительный дефицит, указывающий на гипоксические условия в придонном слое и образовавшийся вследствие стремительного снижения за рассматриваемый период 1990-2024 гг. Начиная с 2002 года содержание растворенного кислорода было ниже установленного целевого значения. Ботнический залив находится в наилучшем состоянии по количеству содержания растворенного кислорода, тем не менее в нем отмечается снижение по тренду, на что стоит обратить внимание. В Гданьском заливе наблюдается промежуточное состояние, но также, как и в Ботническом заливе, отмечается незначительный спад и в двух годах (1991 и 2023) наблюдались низкие концентрации растворенного кислорода относительно общей картины изменчивости в период 1990-2024 гг. Тенденция снижения концентрации растворенного кислорода обусловлена ростом содержания общего фосфора во всех трех заливах.

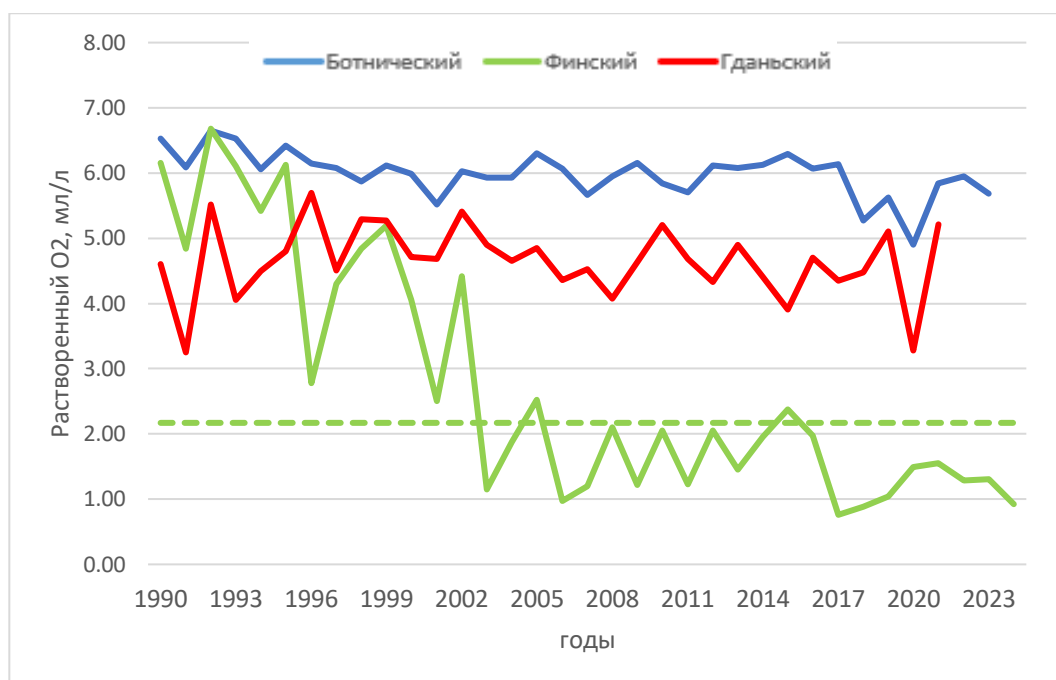


Рис.26. Изменчивость содержания растворенного кислорода во всех заливах с 1990 по 2023 год (пунктир – целевое значение)

В соответствии с таблицей 9 можно отметить, что воды Ботнического залива классифицируются, как чистые и соответствуют II классу качества, Финский залив по концентрации с 2002 года считается грязным и соответствует V классу качества. Воды Гданьского колеблются между загрязненными и умеренно-загрязненными, что соответствует III и IV классу качества.

Таблица 9 – Классификация загрязненности вод по растворенному кислороду в летний период, с единицей измерения мл/л [19]

Уровень загрязненности воды и класс качества	Растворенный кислород, мл/л
	лето
Очень чистые, I	6,3
Чистые, II	5,6-4,9
Умеренно загрязненные, III	4,9-4,2

Загрязненные, IV	3,5-2,8
Грязные, V	2,1-1,4
Очень грязные	0

Во всех заливах присутствует рост хлорофилла-а, на который соответственно влияет рост содержания общего фосфора. По данному индикатору снова лидирующую позицию занимает Финский залив, в котором наблюдается активный рост, а также превышение концентрации хлорофилла-а относительно целевого значения за весь период с 1990 по 2024 год (Рисунок 27). В Ботническом заливе с 1991 по 2005 год наблюдалась концентрация, не превышающая целевое значение, а начиная с 2006 года концентрация уже значительно увеличилась в ходе ее стремительного роста.

По Таблицам 10 и 11 можно отметить, что при соответствии концентраций заливов целевым значениям хлорофилла-а, воды по всем подбассейнам будут относиться к мезотрофным. В Ботническом заливе также наблюдались олиготрофные воды с 1991 по 2005 год.

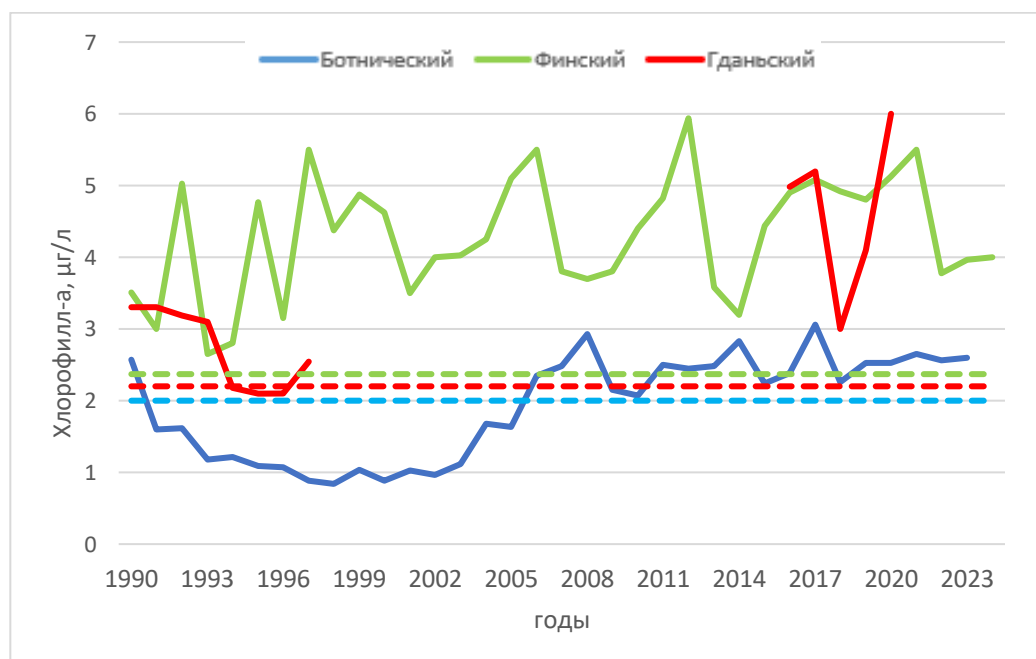


Рис.27. Изменчивость концентрации хлорофилла-а во всех заливах с 1990 по 2023 год (пунктир – целевое значение)

Таблица 10 – Классификации трофности природных вод по концентрации хлорофилла-а, $\mu\text{г/л}$ [19].

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	
Meybeck (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

Таблица 11 – Целевые значения концентрации хлорофилл-а ($\mu\text{г/л}$) по рассматриваемым подбассейнам Балтийского моря [20]

Целевое значение хлорофилл-а, $\mu\text{г/л}$		
Ботнический	Финский	Гданьский
<2	<2,37	<2,2

Значения прозрачности по диску Секки, несмотря на отсутствие данных в некоторые годы, показывают ее снижение в межгодовой изменчивости рассматриваемых подбассейнах Балтийского моря. С 1990 по 2005 год в Ботническом и Финском заливе отмечались хорошие показатели прозрачности, тоже самое наблюдалось в Гданьском заливе с 1991 по 1996 год. Далее вследствие повышенных значений и роста хлорофилла-а наблюдалось снижение показателя прозрачности, значения которого не соответствовали целевому значению.

По Таблице 12 целевое значение прозрачности по Гданьскому и Финскому заливам относится по 2 классификациям к мезотрофному типу и олиготрофному в остальных. Целевое значение прозрачности в Ботническом заливе

характеризуется как олиготрофный тип. Целевые значения подбассейнов по прозрачности приведены в Таблице 13.

Таблица 12 – Классификация трофности водоемов по прозрачности в м [19]

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-Sellers, 1984	> 6	3–6	< 3
Романенко, 1985	6–12	3–6	0,3–0,8

Таблица 13 – Целевые значения прозрачности (м) различные по рассматриваемым подбассейнам Балтийского моря [20]

Целевое значение прозрачности, м		
Ботнический	Финский	Гданьский
>5,8	>5,42	>6,5

Оценивая характеристику загрязненности по исследуемым индикаторам в подбассейнах Балтийского моря, наиболее благополучным из всех является Ботнический залив, в котором наблюдаются низкие уровни биогенов и хлорофилла-а, а также достаточное содержание растворенного кислорода в отличие от остальных заливов. Финский залив оказался наиболее загрязненным, на что указывает превышение целевым значениям за весь период с 1990 по 2024 год.

Таким образом, на основе анализа было выявлено, что Финский и Гданьский заливы нуждаются в приоритетном экологическом внимании.

Заключение

В условиях изменения климата, усилением антропогенной нагрузки, эвтрофикация наблюдаемая в водах Балтийского моря является важной проблемой с точки зрения экологического состояния, при котором концентрация питательных веществ будет находиться на безопасном уровне без негативных последствий, таких как цветение воды, снижение уровня растворенного кислорода, гипоксии.

В рамках набора мер и действий изложенных в программе План действий по Балтийскому морю были определены целевые значения для ключевых индикаторов эвтрофикации, основанные на исторических и модельных данных. Установленные целевые значения по индикаторам являются международно-признанным ориентиром и используются для анализа текущей ситуации, а также планирования по снижению эвтрофикации в будущем.

При оценке экологического состояния подбассейнов Балтийского моря на основе исследования индикаторов эвтрофикации, было выявлено, что значения по ним, в общей сложности, только растут, что видно по графикам и анализу их межгодовой изменчивости.

Был проведен анализ соответствия значений индикаторов эвтрофикации целевым значениям. В Ботническом заливе наблюдается устойчивое превышение ключевых показателей (фосфора, азота, хлорофилла, прозрачности) и только содержание растворенного кислорода пока не достигло критических значений. Финский залив характеризуется превышением целевых значений среди всех основных индикаторов и с каждым годом тенденция указывает на ухудшение состояния данного подбассейна. В Гданьском заливе отмечается превышение целевых значений по общему фосфору и азоту.

Тем самым, наблюдается невыполнение целей ХЕЛКОМ, направленных на улучшение экологического состояния Балтийского моря.

На основе расчетов проводился общий сравнительный анализ уровня загрязненности подбассейнов Балтийского моря по индикаторам, чтобы выявить

степень эвтрофикации по районам исследования. По итогам данного анализа, в добавок к которому было проведено соответствие целевых значений индикаторов в отношении к признанным классификациям загрязненности, наиболее благополучным из всех оказался Ботнический залив, в котором наблюдаются низкие уровни биогенов и хлорофилла-а, а также достаточное содержание растворенного кислорода в отличие от остальных заливов. Финский залив оказался наиболее загрязненным и страдающим по всем показателям индикаторов эвтрофикации. Неблагоприятная ситуация также обстоит в Гданьском заливе, но является более устойчивой по временной изменчивости, в отличие от Финского, эвтрофикация в котором носит долговременный характер.

По итогам сравнительного анализа и всех оценок состояния экосистем Ботнического, Финского и Гданьского заливов все рассмотренные подбассейны демонстрируют признаки эвтрофикации и наличие данной проблемы в той или иной степени опасности, что подтверждает необходимость в дальнейшем мониторинге и принятию мер по уменьшению уровня загрязненности в Балтийском море, в частности в Финском заливе, в котором по сравнению с остальными акваториями усиливается процесс эвтрофикации по всем основным индикаторам, которые превышают установленные целевые значения.

Можно сделать вывод, что на данный момент достижение всех целевых показателей по индикаторам эвтрофирования маловероятны, так как в ходе анализа наблюдается их повышение по многолетней изменчивости. Также, опубликованные отчеты ХЕЛКОМ свидетельствуют о том, что в общей картине мониторинга Балтийского моря, цели ПДБМ в настоящее время не соблюдаются.

Для улучшения экологического состояния районов Балтийского моря и выполнения целей требуется расширение программы мониторинга, которая будет включать в себя биоиндикаторы и спутниковые наблюдения, введение локальных мер по природоохранному регулированию сбросов и более точная адаптация целевых значений к прибрежным зонам.

Список использованной литературы

1. Общая характеристика Балтийского моря: [электронный ресурс] // Единая Государственная система информации об обстановке в мировом океане. [электронный ресурс]. URL: http://esimo.oceanography.ru/esp2/index/index/esp_id/1/section_id/7/menu_id/4583 (Дата обращения: 18.10.2024)
2. Физико-географическая характеристика балтийского региона : [электронный ресурс]. URL: http://geolike.ru/page/gl_7441.htm (Дата обращения: 18.10.2024)
3. Гечайте Индре. Колебания циркуляции атмосферы как фактор формирования сильных зимних похолоданий в восточной части балтийского регион /Диссертация. РГГМУ – СПб, 2016 .
4. Терзиева Ф.С., Рожкова В.А., Смирнова А.И. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 3. Балтийское море Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Т. 3, вып. 1 – СПб.: Гидрометеоиздат, 1992.– 447 с.
5. Кабелкайте. Ю.А. Экологические проблемы и международное сотрудничество в регионе Балтийского моря. Журнал "География ". Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова : [электронный ресурс] – СПб, 2016. URL: <http://geo.1september.ru/article.php?ID=200303202> (Дата обращения: 29.10.2024)
6. Эвтрофикация и меры борьбы с ней: [электронный ресурс]. URL: http://allformgsu.ru/publ/ehkologija/ehvtrofikacija_i_mery_borby_s_neju/23-1-0-137 (Дата обращения: 29.10.2024)
7. HELCOM (2023): State of the Baltic Sea. Third HELCOM holistic assessment 2016-2021.
8. HELCOM (2018): HELCOM Thematic assessment of eutrophication 2011-2016.

9. Еремина Т.Р. Балтийское море в настоящем и будущем – климатические изменения и антропогенное воздействие. – СПб: Изд-во «Лема», 2016. 34-51 с.
10. Scott W. Nixon. Coastal Marine eutrophication: a definition social causes and future concerns. - 1995. 3-10 с.
11. Borysiak. Изучение фиксации азота в Балтийском море. - 1981. 27 с.
12. Литина, Е.Н. Динамика гипоксических зон в Балтийском море на рубеже XX и XXI веков / Литина Е.Н., Захарчук Е.А. – Водные ресурсы 47(3), 2020. – Р.322-329.
13. Россолимо Л. Л. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. – М.: Наука, 1977. 120 с
14. Сиренко Л. А., Гавриленко М.Я. «Цветение» воды и эвтрофирование. Киев: Наук. думка, 1978. 230 с.
15. ГОСТ 17.1.1.01-77 Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения.
16. Штина Э. А., Кондакова Л. В., Маркова Г. И. Биоиндикация качества воды с использованием водорослей (альгоиндикация) // Экология родного края. Киров: Вятка, 1996. С. 297–302.
17. Кучкина М. А. Особенности процессов эвтрофирования в водоемах-охладителях АЭС: автореф. дис. канд. биол. наук. – М., 2004. 25 с.
18. Jacob Carstensen, Jesper H. Andersen, Karsten Dromph, Vivi Fleming-Lehtinen, Stefan Simis, Bo Gustafsson, Alf Norkko, Hagen Radtke, Ditte L.J. Petersen and Thomas Uhrenholdt. Approaches and methods for eutrophication target setting in the Baltic Sea region: [электронный ресурс] – Helcom, 2013. – 134 с. URL: <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/10/BSEP133.pdf> (Дата обращения: 30.10.2024)
19. Неверова-Дзиопак, Е. В., Цветкова Л.И. Оценка трофического состояния поверхностных вод / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-

строительный университет. – СПб: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. – 176 с.

20. Helcom Indicators: [электронный ресурс] // HELCOM. URL: <https://indicators.helcom.fi/> (Дата обращения: 8.11.2024)

21. Ершова, А. А., Коробченкова К. Д., Агранова Ю. С. Оценка состояния Финского залива по индикаторам эвтрофирования Хелком / Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2018. – № 51. – 137-149 с. (Дата обращения: 23.11.2024)

22. Шатрова, О. В. Анализ изменчивости параметров эвтрофирования в Финском заливе по данным натурных наблюдений / О. В. Шатрова, Т. Р. Еремина, Е. К. Ланге // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2016. – № 44. – С. 129-140.

23. План действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю // Helsinki Commission URL: https://helcom.fi/BSAP/en_GB/intro (дата обращения 27.05.2025).

24. Data Assimilation System // Stockholm university URL: <https://nest.su.se/das/> (дата обращения 1.06.2025).

25. IOWDB the Oceanographic Database of IOW// Leibniz Institute for Baltic Sea Research Warnemünde. URL: <https://odin2.io-warnemuende.de/> (дата обращения 30.05.2025).

26. Shark Data Hosting // Swedish Meteorological and Hydrological Institute URL: <https://sharkweb.smhi.se/> (дата обращения 31.05.2025).

27. HELCOM 2021 HELCOM Baltic Sea Action Plan– 2021update.