



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)

«Прогностические оценки состояния экосистемы Балтийского моря»

Исполнитель: Зуева Екатерина Игоревна

Руководитель: к. г. н., Волощук Екатерина Васильевна

«К защите допускаю»

И.О. Заведующего кафедрой _____

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«12» 06 2025г.

г. Санкт-Петербург
2025

Содержание:

Введение.....	3
Глава 1. Характеристика Балтийского моря.....	6
1.1. Физико-географическое описание исследуемого района.....	6
1.2. Гидрометеорологические особенности.....	8
1.3. Гидрологический режим.....	8
1.4. Гидрохимический и гидробиологический режимы.....	12
Глава 2. Долгосрочное моделирование состояния компонентов экосистемы Балтийского моря.....	19
2.1. Система поддержки принятия решения Nest.....	19
2.2. Прогностическая модель эвтрофикации Балтийского моря BALTSEM21.....	19
2.3. Материалы и методы.....	29
Глава 3. Прогностическая оценка гидрохимических и гидрофизических компонентов состояния экосистемы бассейнов Балтийского моря при различных климатических сценариях.....	31
3.1 Прогностическая оценка состояния экосистемы Ботнического залива.....	31
3.2. Прогностическая оценка состояния экосистемы Финского залива.....	40
3.3. Сравнительный анализ компонентов экосистемы Ботнического и Финского заливов при различных климатических сценариях.....	48
Заключение.....	53
Список литературы:.....	55

Введение

Химический и биологический состав воды Балтийского моря определяется взаимодействием трех основных факторов: речным стоком впадающих в море рек; периодическими затоками в Балтийское море североморских соленых вод; биохимическими процессами продуцирования (в процессе фотосинтеза), деструкции органического вещества и биологического круговорота веществ. Например: Гданьский бассейн в отличие от других бассейнов Центральной Балтики испытывает большое влияние рек, в частности, Вислы – второй по величине стока в Балтийское море реки, находящейся под сильным антропогенным воздействием.

Главные экологические проблемы Балтики связаны с изменением климата и активной деятельностью человека: производство и потребление энергии, промышленность, лесное хозяйство, сельское хозяйство, рыболовство, туризм, транспорт, сточные воды и т.д. [15].

В последние десятилетия климат Балтийского региона существенно меняется. За период с 1982 по 2012 годы температура воды в Балтийском море повысилась на 2°C, а в летние месяцы — на 3–5°C. За 1993–2017 годы Балтика прогрелась на 1,1°C, тогда как для Северного и Норвежского морей этот показатель составил лишь 0,84°C. Оценки скорости потепления свидетельствуют о высокой климатической изменчивости региона, что напрямую влияет на структуру и функционирование морских экосистем [20].

Избыточное поступление в акваторию азота и фосфора в результате смыва с удобряемых полей, с коммунальными стоками городов и отходами некоторых предприятий. Поскольку водообмен Балтики не очень активен, то концентрация азота, фосфора и других отходов в воде становится очень высокой. Из-за биогенных элементов в море органические вещества не полностью перерабатываются, а из-за недостатка кислорода они начинают разлагаться, выделяя губительный для морских обитателей сероводород. На дне Готландской, Гданьской, Борнхольмской впадин уже существуют мертвые сероводородные зоны.

Истощение запасов растворенного кислорода оказывает губительное воздействие на гидробионтов. При его концентрации около 2 мг/л рыбы начинают мигрировать в районы с большим содержанием кислорода. При концентрациях менее 2 мг/л страдает донная фауна - многие чувствительные к недостатку кислорода виды погибают [12]. При больших затоках североморских вод происходит вентиляция придонного слоя всего Балтийского моря, а при малой величине затока во впадинах у дна создаются анаэробные условия, вплоть до образования сероводорода [13]. В южной Балтике из-за близости к Датским проливам в период стагнации даже слабые затоки североморских вод могут увеличивать придонное содержание кислорода; другое дело, что такое увеличение бывает кратковременным [14].

Для анализа будущих изменений разработаны различные сценарии климатической изменчивости, в том числе сценарии RCP (Representative Concentration Pathways), которые используются для расчёта и прогноза состояния морских экосистем. Согласно этим сценариям, потепление и сопутствующие изменения гидрохимических характеристик могут существенно трансформировать биологическую продуктивность, стратификацию водной толщи, кислородный режим и биогеохимические циклы Балтийского моря.

Цель данной работы — дать прогностическую оценку компонентов состояния экосистем подбассейнов Балтийского моря на основе современных климатических сценариев.

Для достижения этой цели в работе ставятся следующие задачи:

- 1) Проанализировать современные гидрохимические и гидрофизические характеристики Балтийского моря и их динамику под влиянием природных и антропогенных факторов;
- 2) Оценить влияние различных сценариев климатических изменений (RCP) на ключевые гидрохимические параметры и биологические процессы;

- 3) Провести моделирование вертикальных профилей температуры, солёности, кислорода и биогенных элементов на основе современных климатических сценариев;
- 4) Охарактеризовать последствия выявленных изменений для биоразнообразия и устойчивости экосистем Балтийского моря.

Таким образом, Балтийское море представляет собой сложную и уязвимую экосистему, требующую активной защиты и устойчивого управления для сохранения ее уникальных природных ресурсов.

Глава 1. Характеристика Балтийского моря

1.1. Физико-географическое описание исследуемого района

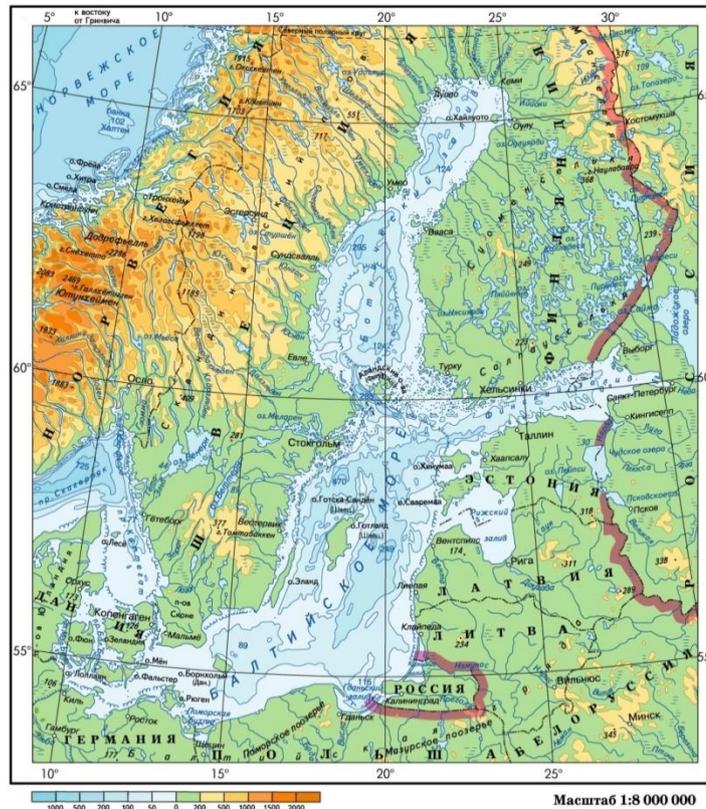


Рисунок 1 – Физическая карта Балтийского моря [1].

Балтийское море - внутриматериковое море Атлантического океана между Скандинавским полуостровом и материковым побережьем северо-западной части Европы [2]. Расположено между параллелями $65^{\circ}56'$ и $54^{\circ}46'$ с. ш. и меридианами $9^{\circ}57'$ и $30^{\circ}00'$ [4]. С юго-запада на северо-восток вытянулось, где наибольшая длина равна 1360 км. А самая наибольшая ширина, равная 650 км, находится на 60° с. ш. между Стокгольмом и Санкт-Петербургом [2]. Почти со всех сторон Балтийское море окружено сушей, только на юго-западе соединяется с Северным морем Датскими проливами и проливами Каттегат и Скагеррак [4]. Площадь составляет 419 тыс. км², объём 21,5 тыс. км³. Наибольшая глубина 470 м, средняя глубина — 51 м [3].

Балтийское море глубоко вдаётся в материк Евразия. Сильно изрезанная береговая линия образует многочисленные заливы и бухты. Наиболее крупными заливами являются Ботнический, Финский, Рижский, Куршский,

Щецинский и Гданьский [2].

Около 250 крупных и малых рек впадает в Балтийское море. Крупнейшими реками являются Висла, Одер, Неман, Даугава, Нева. Наибольшее количество воды вливает за год Нева — в среднем $83,5 \text{ км}^3$, Висла — $30,4 \text{ км}^3$, Неман — $20,8 \text{ км}^3$, Даугава — $19,7 \text{ км}^3$ и некоторые другие реки. По средним многолетним данным за период 1961 – 1970 гг. реки ежегодно приносят в море примерно 433 км^3 , что соответствует 2,1% от общего объема моря [4].

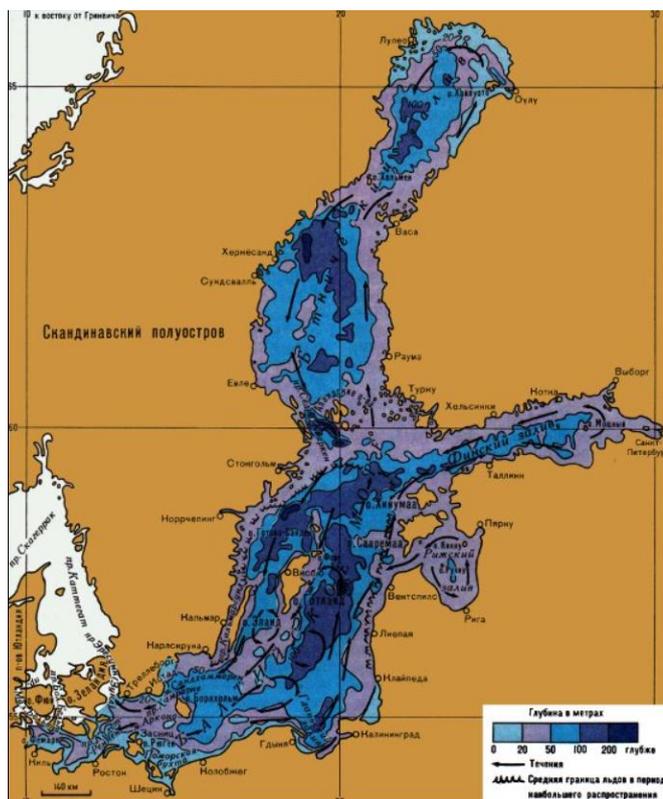


Рисунок 2 – Рельеф дна Балтийского моря [3].

Балтийское море представляет собой мелководное море, полностью расположенное в пределах шельфа, где глубины до 200 метров занимают 99,8% его площади. Наиболее мелководными являются Финский, Ботнический и Рижский заливы, где дно характеризуется выровненным аккумулятивным рельефом с хорошо развитыми рыхлыми отложениями. В то же время большая часть дна моря имеет сильно расчленённый рельеф, с котловинами, разделёнными возвышенностями и островами. На западе расположены Борнхольмская впадина (глубина 105 м) и Арконская впадина (53 м). В

центральной части находятся Готландская впадина (до 249 м) и Гданьская впадина (116 м). Наиболее глубокая впадина — Ландсортская, простирающаяся к северу от острова Готланд, достигает глубины до 470 м [2].

1.2. Гидрометеорологические особенности

Балтийское море характеризуется умеренным морским климатом с элементами континентальности. Сезонные изменения климата определяются взаимодействием различных барических центров, таких как Исландский минимум и Азорский максимум на западе, а также Сибирский максимум на востоке.

Осенне-зимние условия: циклоническая активность достигает своего пика, когда циклоны приносят облачную и дождливую погоду, сопровождающуюся сильными западными и юго-западными ветрами. Средняя температура воздуха в феврале колеблется от $-1,1$ °С на юге до -10 °С на севере. В редких случаях холодный арктический воздух может снижать температуру до -35 °С. Летние условия: преобладают западные ветры, которые приносят прохладную и влажную погоду с Атлантического океана. В июле температура воздуха составляет $14-15$ °С в Ботническом заливе и $16-18$ °С в других частях моря. Иногда теплый средиземноморский воздух вызывает кратковременные повышения температуры до $22-24$ °С.

Годовое количество осадков варьируется от 400 мм на севере до 800 мм на юге. Наибольшее количество дней с туманами (до 59 дней в году) наблюдается на юге и в центральной части моря, тогда как на севере Ботнического залива таких дней всего 22 [2].

1.3. Гидрологический режим

На рисунке 3 представлена средняя температура воды на поверхности Балтийского моря, на котором можно заметить, что в январе температура колеблется от 0 до 4 °С, а в августе от 11 до 17 °С.

Радиационный прогрев поверхности Балтийского моря варьируется в течение года и зависит от местоположения, что приводит к сезонным

различиям в температуре воды. Зимой температура воды у берегов ниже, чем в открытых частях моря, при этом западный берег теплее восточного из-за охлаждающего влияния Европейского континента. Например, в феврале температура воды у Вентспилса составляет 0,7 °С, в открытом море — около 2 °С, а у западного берега — 1 °С.

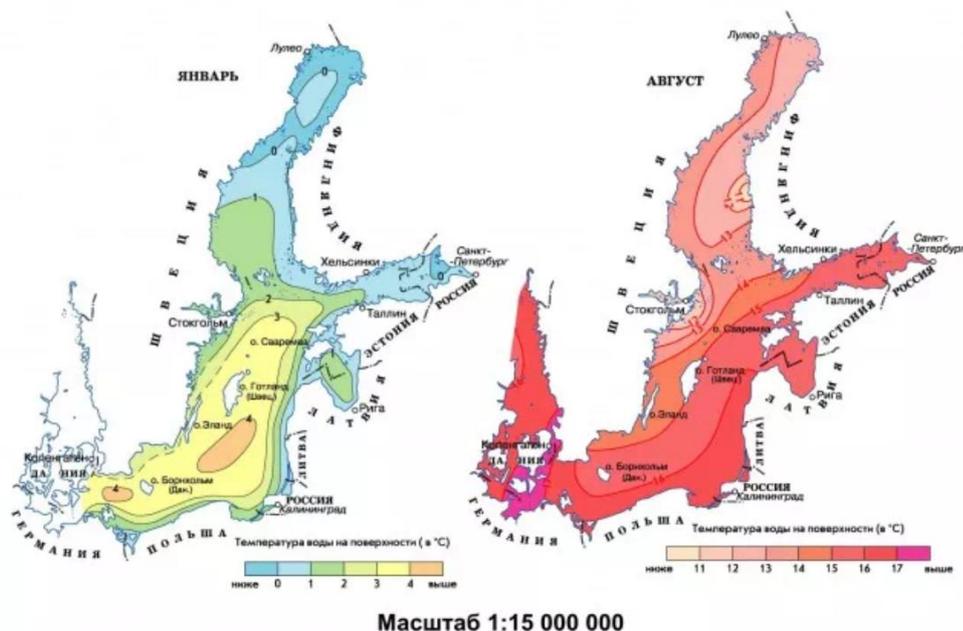


Рисунок 3 – Температура воды на поверхности Балтийского моря [1].

Летом температура поверхностных вод достигает максимума, но распределение температуры неравномерно. В центральных и южных районах моря наблюдается понижение температуры у западных берегов из-за преобладания западных ветров, которые сгоняют теплые поверхностные слои и способствуют подъему холодных глубинных вод. Также вдоль шведских берегов проходит холодное течение из Ботнического залива.

Сезонные изменения температуры воды затрагивают только верхние 50—60 метров. В холодный сезон температура остается почти одинаковой от поверхности до глубины 50—60 метров, а ниже она немного ниже и остается стабильной до дна. В теплый сезон температура на поверхности повышается благодаря радиационному прогреву, который проникает на глубину 20—30 метров. Далее происходит резкое снижение температуры до горизонтов 60—70

метров, после чего она снова немного повышается к дну (рис. 4). Холодный промежуточный слой сохраняется летом, когда термоклин становится более выраженным по сравнению с весной [12].

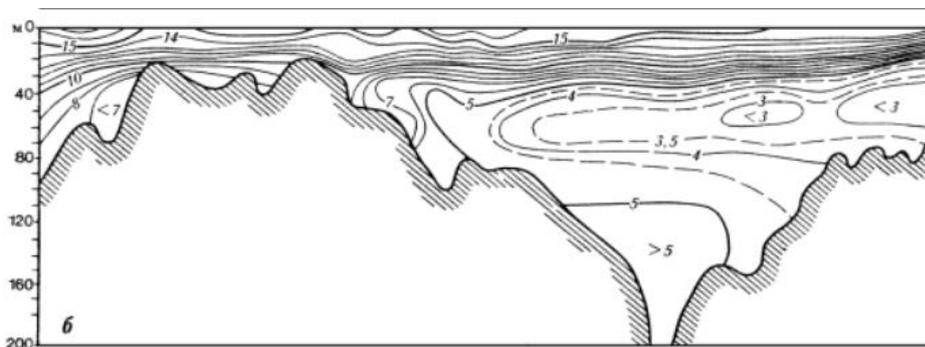


Рисунок 4 – Распределение температуры воды в Балтийском море летом на разрезе датские проливы – Финский залив [7].

Пресный сток в Балтийском море распределяется неравномерно. В Ботнический залив поступает 181 км³ пресной воды в год, в Финский залив — 110 км³, в Рижский залив — 37 км³, а в центральную часть Балтийского моря — 112 км³. Общее количество пресной воды от атмосферных осадков составляет 172 км³ в год, что соответствует уровню испарения. Водообмен с Северным морем составляет в среднем 1660 км³ в год. Более пресные воды с поверхностным стоком уходят из Балтийского моря в Северное море, тогда как соленая вода из Северного моря поступает через проливы. Сильные западные ветры способствуют увеличению притока воды, тогда как восточные ветры усиливают сток воды из Балтики через Датские проливы [2].

Таблица 1 – Водный баланс Балтийского моря [4].

Составляющие баланса	По Броммусу		По Федосову, Зайцеву
	км ³	%	км ³
Осадки	172	15,4	210
Речной сток	472	42,3	440
Приток из Северного моря	472	42,3	465
Испарение	172	15,4	185
Сток в Северное море	944	84,6	930

Водный баланс Балтийского моря пока еще изучен недостаточно точно, поэтому данные о нем разноречивы. В качестве примера в таблице приведены сведения о водном балансе моря по Брогмусу (1952) и М. В. Федосову и Г. Н. Зайцеву (1960). З. Микульский (1975) [4].

В Ботническом заливе и соседних мелководных районах наблюдается плотностный скачок, который проявляется только в верхнем слое воды на глубине 20—30 метров. Этот скачок формируется весной из-за распреснения, вызванного речным стоком, а летом — благодаря прогреву поверхностного слоя моря. Важно отметить, что в этих частях моря не образуется постоянный нижний слой скачка плотности, так как сюда не проникают глубинные соленые воды, и круглогодичного расслоения вод не существует [3].

Поверхностные течения формируются в северной части моря в результате слияния вод, выходящих из Ботнического и Финского заливов. Общий поток направлен вдоль Скандинавских берегов на юго-запад. Огибая с двух сторон о. Борнхольм, он направляется через Датские проливы в Северное море. У южного берега течение направлено на восток. Возле Гданьского залива оно поворачивает на север и движется вдоль восточного берега до о. Хнума. Здесь оно разветвляется на три потока. Один из них идет через Ирбенский пролив в Рижский залив, где вместе с водами Даугавы создает круговое течение, направленное против часовой стрелки. Другой поток входит в Финский залив и вдоль его южного берега распространяется почти до устья Невы, затем поворачивает на северо-запад и, двигаясь вдоль северного берега, вместе с речными водами выходит из залива. Третий поток идет на север и через проливы Аландских шхер проникает в Ботнический залив. Здесь течение вдоль Финских берегов поднимается на север, огибает северное побережье залива и вдоль побережья Швеции спускается на юг. В центральной части залива отмечается замкнутое круговое течение против часовой стрелки.

Балтийском море довольно низка и составляет примерно 3—4 см/с, хотя иногда она может увеличиваться до 10—15 см/с. Схема течений в этом регионе

нестабильна и часто нарушается под воздействием ветра. Наиболее интенсивные ветровые течения наблюдаются осенью и зимой, и во время сильных штормов их скорость может достигать 100—150 см/с.

Глубинная циркуляция в Балтийском море определяется поступлением вод через Датские проливы. Входное течение обычно проходит до горизонтов 10—15 м, после чего более плотная вода опускается в нижележащие слои и медленно переносится глубинным течением сначала на восток, а затем на север. При сильных западных ветрах вода из Каттегата втекает в Балтийское море практически по всему сечению проливов. Напротив, восточные ветры усиливают выходное течение, которое распространяется до горизонтов 20 м, оставляя входное течение только у дна [7].

1.4. Гидрохимический и гидробиологический режимы

Соленость поверхностных вод Балтийского моря уменьшается с запада на восток, что связано с преобладанием речного стока в восточной части моря. В северных и центральных районах бассейна наблюдается снижение солености с востока на запад, поскольку циклоническая циркуляция переносит соленые воды с юга на северо-восток вдоль восточного берега более эффективно, чем вдоль западного. Уменьшение солености поверхностного слоя фиксируется с юга на север в заливах.

В Балтийском море наблюдается значительное увеличение солености от поверхности к дну. Изменения солености с глубиной происходят схожим образом по всему морю, за исключением Ботнического залива. В юго-западных и частично центральных районах соленость плавно увеличивается от поверхности до горизонтов 30–50 метров, после чего на глубинах 60–80 метров располагается резкий слой скачка (галоклин), ниже которого соленость снова немного увеличивается к дну. В центральной и северо-восточной частях моря соленость медленно возрастает от поверхности до горизонтов 70–80 метров, где также находится галоклин на глубинах 80–100 метров, после которого соленость слегка повышается до дна. В Ботническом заливе увеличение солености от поверхности до дна составляет всего 1–2‰ [1].

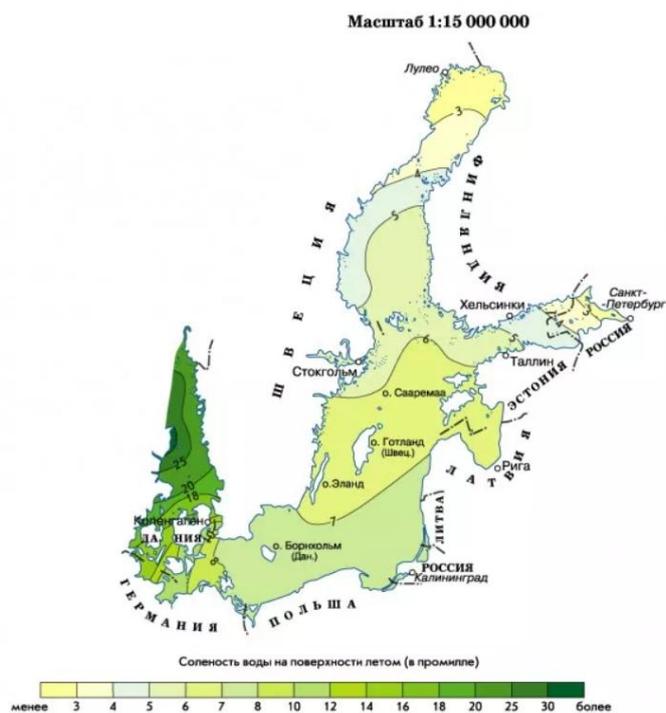


Рисунок 5 – Соленость воды на поверхности Балтийского моря.

Повышение содержания углекислого газа в атмосфере вызывает существенные изменения химических и биологических характеристик. Также на данные характеристики влияют повышение (понижение) температуры воздуха и воды, снижение кислорода и pH, обессоливание поверхностных слоев. Влияние глобального потепления распространяется и на наземные экосистемы, затрагивая озера, реки и прибрежные зоны, где смешиваются морская и пресная вода. Водные потоки обеспечивают тесную взаимосвязь между различными экосистемами, а масштабные изменения давления и циркуляции воды влияют на них одновременно [5].

В Балтийском море распределение и изменчивость кислорода существенно отличаются от открытого океана и большинства других морей. Это связано с наличием двух основных слоев – верхнего распресненного и глубинного осолоненного, которые разделяет главный галоклин. Известно, что содержание растворенного кислорода определяется затрудненным вертикальным обменом из-за устойчивой стратификации вод ([8]- [10]). В глубинных водах потребление кислорода превышает его поступление из поверхностных слоев, что приводит к постепенному ухудшению кислородного

режима. Когда уровень растворенного кислорода почти исчерпан, бактерии начинают использовать другие вещества для дыхания. В первую очередь используют кислород нитратов, превращая его в атмосферный азот (денитрификация), а затем, по исчерпанию нитратов, переходят к использованию кислорода сульфатов (сульфатредукция). Высвобождающийся кислород используется бактериями для разложения органического вещества [11].

Количество растворенного кислорода в Балтийском море подвержено значительным колебаниям и сезонным изменениям, характерным для морей умеренного пояса. Наибольшее содержание кислорода наблюдается в верхнем слое (0—20 м) весной, что связано с активной фотосинтетической деятельностью фитопланктона в условиях низкой температуры воды.

Летом, с повышением температуры, растворимость кислорода и его содержание уменьшается, также из-за ослабления фотосинтетической активности. В этот период распределение кислорода в поверхностном слое 0-20 м. остается довольно равномерным. Осенью и зимой количество кислорода увеличивается благодаря понижению температуры воды и приближается к весенним значениям, хотя не достигает их из-за отсутствия фотосинтеза в холодное время года.

В верхних слоях Балтийского моря наблюдается сравнительно низкое содержание фосфатов, так как эти соединения активно потребляются и возвращаются из глубин медленно и нерегулярно. Повышенные уровни фосфатов фиксируются в приустьевых зонах, куда они выносятся реками. Содержание соединений азота, таких как нитраты и нитриты, изменяется по пространству и сезонам в зависимости от районов и времени интенсивного роста фитопланктона. Весной и летом уровень этих биогенов снижен, тогда как осенью и зимой он повышается. Химический состав балтийских вод также отличается высоким содержанием силикатов, что обусловлено выносом значительных количеств кремниевых соединений материковым стоком [7].

В глубинном слое Балтийского моря межгодовая изменчивость содержания фосфатов, определяется частотой и мощностью затоков североморских вод [12]. В случае слабого затока происходит снижение концентрации фосфатов в слое его распространения (активном глубинном слое), при этом может наблюдаться некоторое повышение концентраций в вышележащих слоях вследствие «вытеснения» старых вод кверху. Мощные затоки обновляют воду глубоководных впадин, при этом процесс замещения проходит несколько стадий. Вначале происходит быстрое снижение концентраций, вызванное не столько смешением с новыми обедненными фосфатами водами, сколько сменой анаэробных условий на аэробные, в которых происходит сорбция и соосаждение фосфатов. За этим следует стадия аэробной аккумуляции фосфатов, обусловленная деструкцией органического вещества. Вновь возникшие анаэробные условия приводят к быстрому росту содержания фосфатов в воде вследствие их десорбции с взвешенных веществ и с поверхности донных отложений. В южной части моря режим фосфатов в глубинном слое неустойчив, даже в то время, когда в центральной и северной частях максимально развиты процессы стагнации. Причина неустойчивости определяется физико-географическими условиями – сравнительным мелководьем и близостью к источнику аэрированных вод североморского происхождения [14].

В весенний период наблюдается значительная дифференциация доминирующих таксонов по районам, хотя некоторые виды динофлагеллят имеют повсеместное распространение. В Северной и Центральной частях моря они доминируют наряду с другими видами этого отдела. В остальном исследуемые районы отличались главным образом составом доминирующих видов диатомовых. Летом происходит перестройка структуры доминирующих комплексов фитопланктона, выражающаяся в преобладании сине-зеленых и динофитовых водорослей на большей части акватории. В Южной части Балтики среди доминирующих таксонов в основном представлены криптомонады [5].

В ходе исследования было выявлено 34-36 доминирующих видов фитопланктона, из которых некоторые виды сохраняли статус доминантов круглогодично. Наибольшее количество доминирующих видов было обнаружено среди сине-зеленых, диатомовых и динофитовых водорослей. Доминирование других видов проявлялось с четкой сезонной приуроченностью. В июне–августе активно вегетировали сине-зеленые водоросли, тогда как криптомонады появлялись в фитопланктоне и продолжали вегетацию осенью.

Различия в структуре доминирующих комплексов фитопланктона открытой и прибрежной частей Балтийского моря касаются, прежде всего, устойчивости отдельных видов к колебаниям солености. Исследования показали, что зеленые водоросли менее адаптированы к солоноватоводным условиям по сравнению с сине-зелеными водорослями и могут образовывать цветения только при низкой солености [5].

Видовой состав фитопланктона в Балтийском море зависит от местных питательных веществ и солености, изменяясь постепенно с юго-запада на северо-восток. Первичная продукция характеризуется значительной сезонной и межгодовой изменчивостью. Интенсивное весеннее цветение начинается в марте в западной части Балтики, тогда как в Ботническом заливе оно наблюдается лишь в мае-июне. В южной и западной частях моря весеннее цветение преимущественно представлено диатомовыми водорослями, в то время как в центральной и северной частях доминируют динофлагелляты. Для диатомовых водорослей весной и летом наблюдались тенденции к понижению, тогда как динофлагелляты в Балтике обычно увеличивались, но уменьшались в Каттегате. Хлорофилла, прокси-индикатор для общей биомассы фитопланктона, также увеличился в самой Балтике. [8]

Сезонные изменения в составе планктона на Балтике ясно выражены. В феврале начинают развиваться жгутиковые, почти одновременно с ними развиваются арктические диатомовые, которые, истощив запасы биогенных элементов, отмирают. После отмирания диатомовых развиваются бактерии,

затем инфузории, которые, могут служить пищей планктонных ракообразных. Зоопланктон начинает заметно развиваться в апреле, но максимального весеннего развития достигает в мае [6].

Распределение биомассы зоопланктона в пространственном отношении дано для слоя 0-10 м. Как показывает это распределение, величины биомассы резко колеблются в заливах, бухтах и открытых частях моря. Заливы и бухты отличаются сравнительно большой биомассой, открытая часть моря более бедна. В Рижском заливе биомасса значительна вследствие повышенной продуктивности планктонных ракообразных и в центральной части залива в августе она доходила до 1357 мг/м^3 (рис. 9).

В пределах Рижского залива наиболее продуктивными местами являются устья Даугавы, а также прибрежные участки, где развитию планктеров благоприятствует температура (район Колка-Рухну). Однако и в центральной части залива, биомасса зоопланктона примерно в шесть раз больше, чем в открытом море. Рижский залив является основным местом промысла салаки и кильки младших возрастов, что вполне совпадает с большой биомассой зоопланктона в заливе.

Пространственное распределение биомассы в различные сезоны года не оставалось постоянным. [6]

Весной в Рижском заливе наибольшая биомасса наблюдалась в прибрежной зоне. Летом более богата центральная часть залива, в особенности район к юго-востоку от острова Рухну, где обычно в это время, наблюдаются наибольшие скопления салаки. Осенью, после летнего откорма рыб, в центральной части залива биомасса меньше, чем в прибрежной зоне.

Открытая часть моря значительно беднее заливов. И здесь выделяются места более богатые и более бедные. К бедным относятся районы Вентспилса, Лиепаи, Клайпеды. К богатым планктоном местам относятся также и банки. Места, бедные планктоном, наблюдались над котловинами: Готландской котловиной и в районе Гданьской впадины. Биомасса зоопланктона распределяется неравномерно по всей акватории Балтийского моря, что

обусловлено, с одной стороны, топографией моря, с другой – ветрами и течениями. [6]

Глава 2. Долгосрочное моделирование состояния компонентов экосистемы Балтийского моря

2.1. Система поддержки принятия решения Nest

Nest – это система поддержки принятия решений для управления Балтийским морем, которая разрабатывается с 2007 года и поддерживается институтом the Baltic Nest Institute (BNI), который является частью Stockholm University Baltic Sea Centre [16, 17].

Данная программа содержит базы данных и различные модели для прогнозирования будущих состояний Балтийского моря. Александр Соколов разработал и создал все интерфейсы программы. Олег Савчук вместе с Fredrik Wulff разработали физико-биогеохимическую морскую модель SANBALTS, которая вычисляет и визуализирует эффекты того, как изменения в нагрузках питательных веществ (азота и фосфора) влияют на условия во всех основных подсистемах Балтийского моря [17]. Подобно предыдущей модели, BALTSEM моделирует физику и биогеохимию Балтийского моря, но с гораздо более высоким пространственным и вертикальным разрешением, также в ней можно изучить последствия изменений климата в сценариях будущего. Ключевыми разработчиками данной модели является Bo Gustafson, Олег Савчук и Bärbel Müller-Karulis. Carl-Magnus Mörth вместе с Christoph Humborg инициировали и разработали модель водосборного бассейна Catchment Simulation (CSIM), которая описывает зависимость стока питательных веществ из водосборного бассейна Балтики в море от характеристик дренажных бассейнов, таких как землепользование, сельское хозяйство, население и т.д. Chris Harvey, Olle Hjerne и Sture Hansson разработали модель пищевой сети Балтийского моря, которая может быть использована для оценки воздействия различных вариантов управления рыболовством, а также воздействия эвтрофикации и тюленей на треску, сельдь и шпроты. Ing-Marie Gren разработала модель минимизации затрат, для достижения конкретного улучшения качества воды в любом из семи основных подсистем Балтийского моря.

В настоящее время морские базы данных являются общим продуктом многих исследовательских организаций по всему Балтийскому морю [17]. Fred Wulff создал базы данных о содержании питательных веществ в морской и речной среде, поддерживаются Miguel Rodrigues Medina. Александр Соколов также разработал удаленный доступ к региональным базам данных и моделям атмосферного осаждения биогенных веществ EMEP (Jerzy Bartnicki) и DENM (Kaj Hansen Mantzius). Christoph Humborg выступил инициатором создания базы данных о водосборных бассейнах, разработанной и поддерживаемой Erik Smedberg.

Чрезмерное поступление питательных веществ, таких как азот (N) и фосфор (P), в морскую или пресную среду приводит к эвтрофикации, при котором естественный баланс между накоплением и разложением веществ нарушается. Полузамкнутое Балтийское море с солоноватой водой во многих отношениях особенно чувствительно к эвтрофикации из-за его медленного водообмена и природными барьерами.

За последние десятилетия многие страны приняли меры по снижению общей нагрузки азота и фосфора, однако все еще превышают допустимый уровень для снижения эвтрофикации. Значительная часть общего количества питательных веществ, переносимых водой и атмосферой, поступает в море из различных источников, таких как сельское хозяйство, где законодательство не столь эффективно, как в случае точечных источников, например промышленных предприятий. Существуют также значительные временные задержки между контролирующими мерами, принимаемыми в водосборном бассейне, и заметным снижением поступления питательных веществ в море. Длительное время нахождения питательных веществ в морских бассейнах может привести к загрязнению других регионов. Открытые прибрежные зоны подвергаются влиянию не только поступающих веществ с суши, но и из открытого океана, который является связующим звеном с другими бассейнами. К другим факторам относят климатические изменения, появление новых инвазивных видов и воздействие токсичных веществ.

Для эффективного взаимодействия учёных и управленцев необходимо разработать единый язык общения и согласовать понимание масштабов, проблем и причин. Такой целостный подход должен учитывать не только характеристики моря, но и особенности прилегающего водосборного бассейна. Важным элементом также является понимание поведения человека и его влияния на морскую среду. В качестве инструмента обобщения текущих представлений о Балтийском регионе и улучшения управления, особенно в вопросах эвтрофикации и рыболовства, была создана система поддержки принятия решений Nest.

2.2. Прогностическая модель эвтрофикации Балтийского моря BALTSEM

В системе Nest есть долгосрочная модель эвтрофикации BALTSEM (BAltic sea Long-Term large-Scale Eutrophication Model), которая позволяет получать прогностические оценки гидрохимических и гидрофизических показателей.

Модель делит Балтийское море на 13 взаимосвязанных морских бассейнов (рис. 6), каждый из которых предполагается горизонтально однородным, но описывается с высоким разрешением по вертикали [18]. Транспорт переменных состояния как внутри бассейнов, так и между ними моделируется гидродинамическим модулем, а перемещение питательных веществ между переменными экосистемы описываются биогеохимическим модулем.

Подробно описал гидродинамический модуль Gustafsson (2003). Модуль описывает динамику обмена воды между 13 модельными бассейнами Балтийского моря, регулируемую через узкие проходы и сужения, с учётом воздействия ветра, изменений уровня моря и разницы плотностей воды и контролируется трением и динамическим сжатием потока из-за эффектов Бернулли и Короли [18]. Вертикальная стратификация моделируется с помощью переменного числа слоев, которые формируются за счет притока вод с разной плотностью, при этом общее число слоев поддерживается ниже заданного максимума за счет слияния. Вертикальное перемешивание

учитывается через смешанный слой и параметризацию глубоководного перемешивания, при которой коэффициент вертикальной диффузии варьируется в зависимости от стратификации и смешивающего ветра.

Модель морского льда следует модели арктического морского льда, предложенной Björk (1992; 1997), с динамикой, адаптированной к Балтийскому морю. Нагрев, остужение и испарение на поверхности моря рассчитываются с использованием общих формул. Впадения глубоких вод описываются подмоделью смешивания плотных гравитационных течений по Stigebrandt (1987).

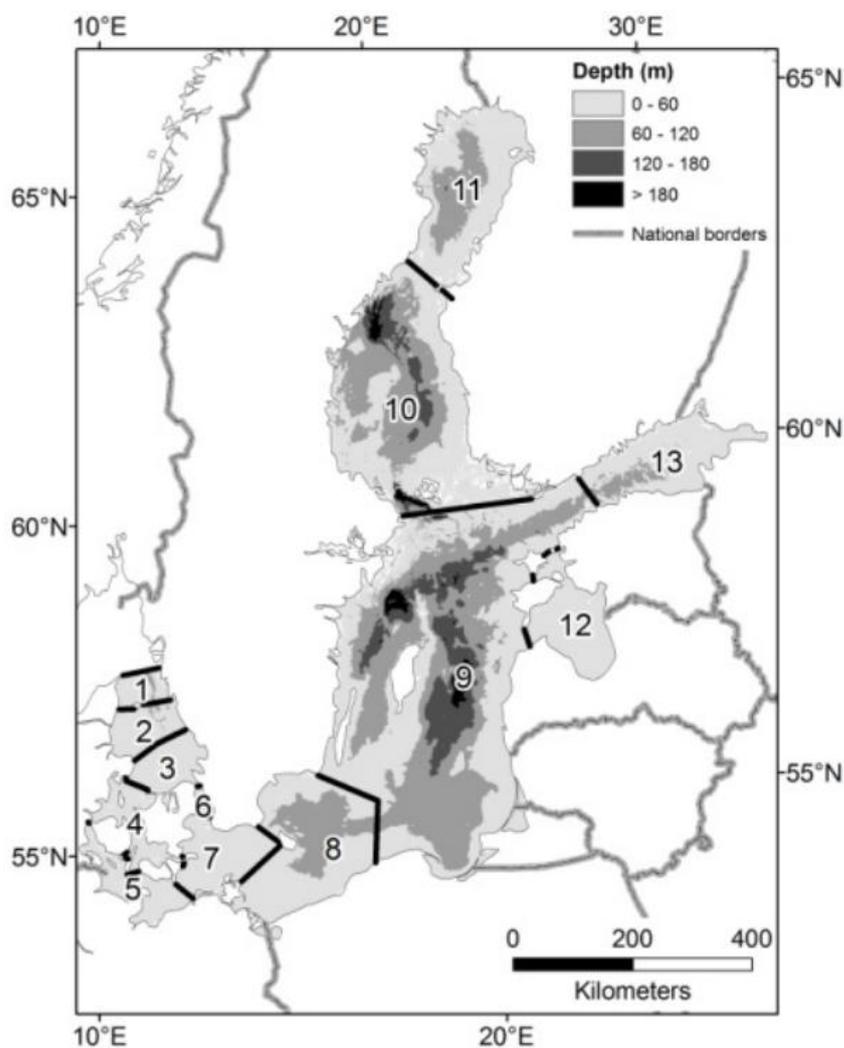


Рисунок 6 – Балтийское море, разделенное на тринадцать бассейнов в модели BALTSEM. 1 – Северный Каттегат (Northern Kattegat NK), 2 – Центральный Каттегат (Central Kattegat СК), 3 – Южный Каттегат (Southern Kattegat SK), 4 - Залив Самсё (Samsø Belt SB), 5 - Залив Фемарн (Fehmarn Belt FB), 6 – Эресунн

(Öresund OS), 7 – Бассейн Аркона (Arkona basin AR), 8 – Бассейн Борнхольм (Bornholm basin BN), 9 – Готландское море (Gotland Sea GS), 10 – Ботническое море (Bothnian Sea BS), 11 – Ботнический залив (Bothnian Bay BB), 12 – Рижский залив (Gulf of Riga GR), 13 – Финский залив (Gulf of Finland GF); Каттегат (КТ) включает НК, СК и SK, Датские проливы – SB, FB и OS, Балтийское море – AR, BN и GS.

Биогеохимический модуль описывает внутреннюю динамику питательных веществ и взаимодействия в связанных пелагической (водной) и бентонической (донной) системах (рис. 7).

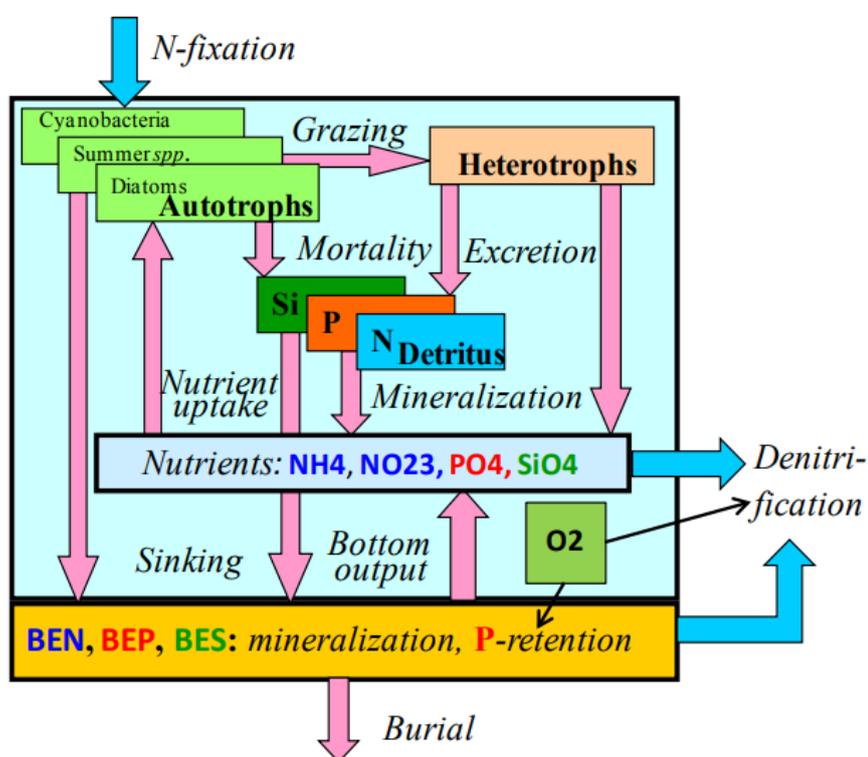


Рисунок 7 - Обобщенная схема основных биогеохимических потоков между статусными переменными

Пелагическая система включает несколько групп фитопланктона (диатомовые водоросли, цианобактерии и летние виды), гетеротрофами, а также компоненты органического и неорганического вещества, растворенного кислорода и питательных веществ, которые регулируются внутренней динамикой за счет потребления биогенов фитопланктоном, поедание и экскреции биогенов зоопланктоном, смертности, оседании детрита.

Сероводород рассматривается как отрицательный кислород: $1 \text{ мл H}_2\text{S л}^{-1} = -2 \text{ мл O}_2 \text{ л}^{-1}$. Бентоническая система моделирует процессы в донных осадках и растительности, включая обмен питательными веществами между осадками и водной колонкой, биотурбацию, минерализацию, азотфиксацию, денитрификацию, в зависимости окислительно-восстановительных условий в глубинных слоях и рост донных растений.

Основные особенности взаимосвязи процессов транспорта и трансформации подробно рассмотрены в работе [18].

На рисунке 8 слева представлена карта Балтийского моря, которая разбита на 13 районов, а справа представлена панель для выбора сценариев, а также отображение результатов.

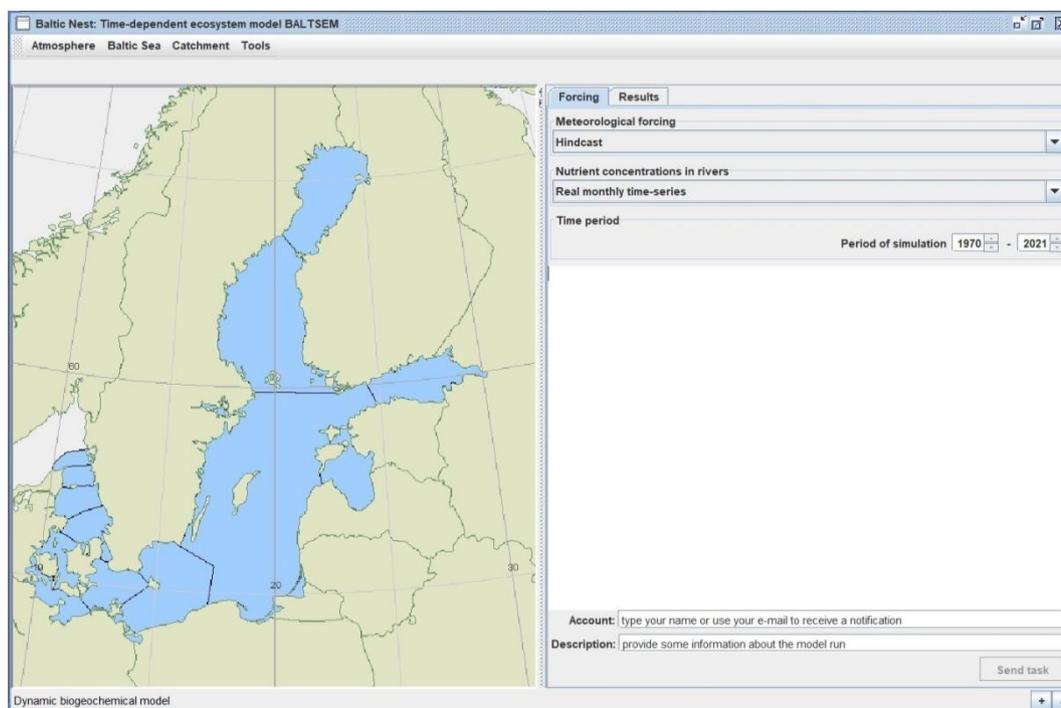


Рисунок 8 – Интерфейс программы Nest модели BALTSEM во вкладке Forcing.

Для запуска модели нужно выбрать два параметра метеорологическую циркуляцию и сценарий климатического воздействия, а также концентрацию биогенных элементов в реках.

Meteorological forcing - Метеорологические сценарии (воздействия).

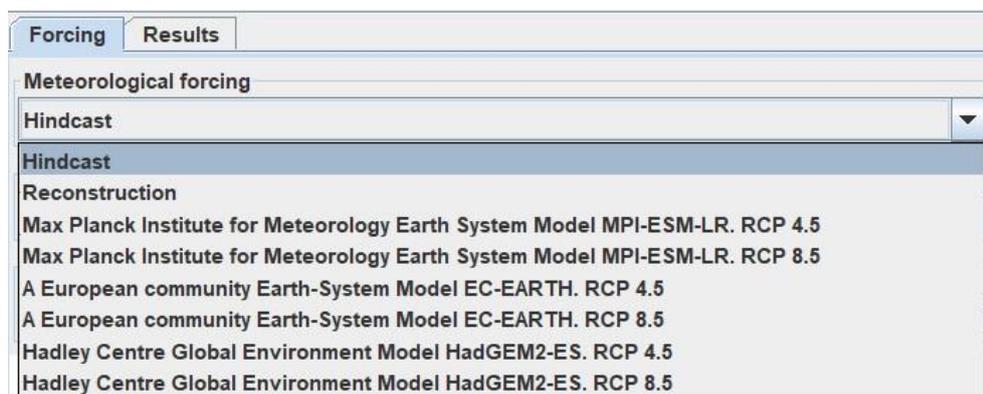


Рисунок 9 – Метеорологические сценарии.

Model MPI-ESM-LR (Max Planck Institute for Meteorology Earth System - Low Resolution) представляет собой комплексную модель климатической системы Земли, разработанную Институтом метеорологии Макса Планка (Гамбург, Германия). Данная модель предназначена для оценки климатических изменений в глобальном масштабе и активно использовалась в рамках международных проектов CMIP5 и IPCC.

Модель сочетает в себе атмосферный модуль ECHAM6 и океанический модуль MPIOM, которые тесно связаны через интерфейсную систему OASIS. Атмосферный компонент ECHAM6 базируется на общем циркуляционном уравнении и учитывает ключевые климатические процессы, включая перенос влаги, облакообразование и радиационный баланс [21], [22]. Океанический модуль MPIOM построен на 3D-гидродинамике с учетом морской циркуляции, температуры, солёности и потоков энергии [23].

MPI-ESM-LR представляет собой конфигурацию низкого пространственного разрешения ($\sim 1.9^\circ \times 1.9^\circ$ по широте и долготе в атмосфере и $\sim 1.5^\circ \times 1.5^\circ$ в океане), что делает её подходящей для моделирования глобальных климатических трендов на длительные временные горизонты [21], [19]. Модель также включает биогеохимический модуль HAMOCC, учитывающий круговорот углерода, продуктивность фитопланктона и pH океана.

MPI-ESM-LR широко применяется для оценки сценариев изменения климата, анализа круговорота углерода, мониторинга океанических процессов и изучения атмосферо-океанических взаимодействий [19], [24].

Сценарии RCP (Representative Concentration Pathways) — это стандартизированные траектории изменения концентрации парниковых газов и радиационного форсинга, используемые в климатическом моделировании. Они были разработаны в рамках подготовки к Пятому оценочному докладу IPCC.

RCP 4.5 представляет собой сценарий стабилизации: выбросы парниковых газов продолжают расти до середины XXI века, после чего стабилизируются без перехода к нулевым выбросам [25]. Конечное значение радиационного форсинга к 2100 году составляет 4.5 Вт/м² [26]. Это «умеренный» сценарий, при котором предполагается активная климатическое воздействие, внедрение технологий улавливания углерода и устойчивое развитие.

RCP 8.5, напротив, представляет собой сценарий высоких выбросов — "business-as-usual". Он предполагает рост выбросов CO₂ в течение всего столетия, активное использование ископаемого топлива и минимальные меры по сокращению выбросов [29]. К 2100 году радиационный форсинг достигает 8.5 Вт/м² [27], [29]. Между сценариями наблюдается существенная разница в прогнозах температуры, осадков, уровня моря и кислотности океанов. Так, по RCP 8.5 потепление может превысить +4 °C к концу века, тогда как по RCP 4.5 оно ограничивается +1.8–2.6 °C [27], [28].

RCP-сценарии активно применяются в региональных и глобальных климатических моделях, включая модель MPI-ESM-LR, и служат основой для оценки уязвимости экосистем, водных ресурсов, сельского хозяйства и здоровья населения [28].

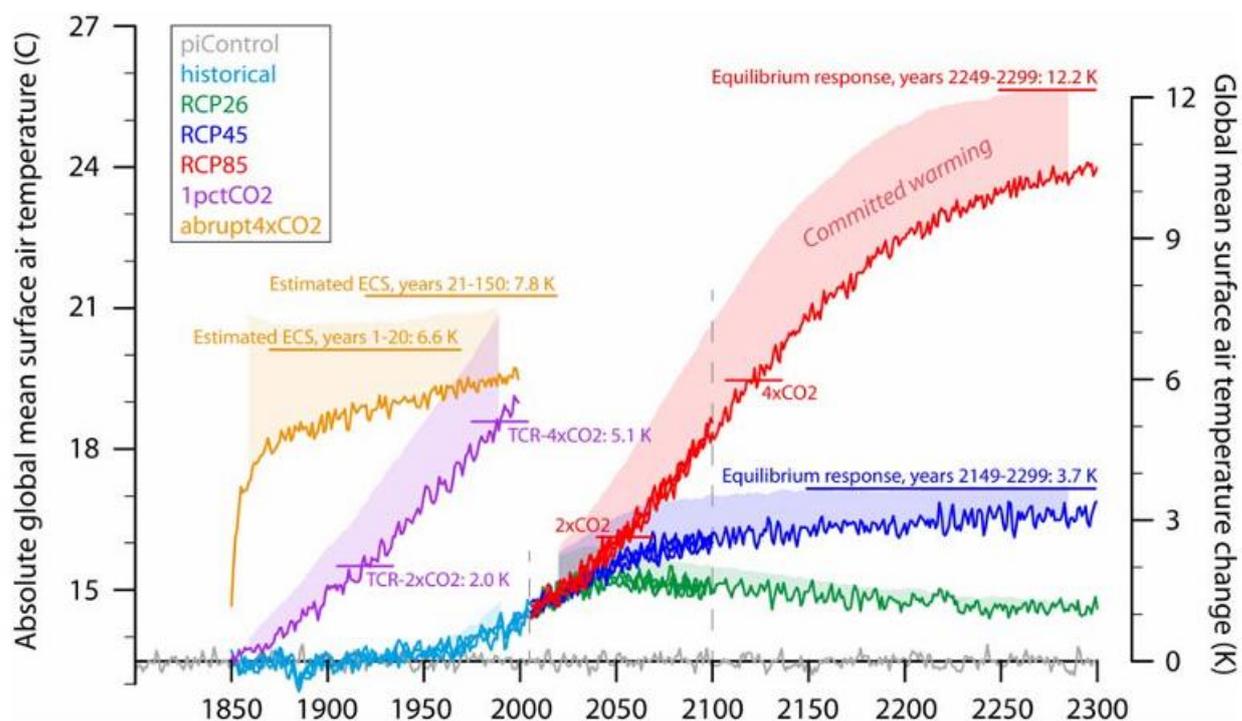


Рисунок 10 – Обзор расчетов, выполненных с помощью MPI-ESM-LR. Показана среднегодовая глобальная температура приземного воздуха. Показаны три варианта реализации для исторического эксперимента и для прогнозов RCP до 2100 года.

[19]

Nutrient concentration in river - Концентрации питательных веществ в реках

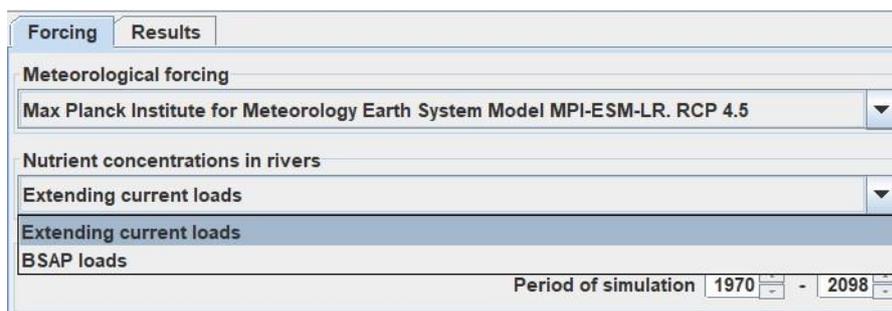


Рисунок 11 – Концентрации питательных веществ в реках.

Программный комплекс предназначен для оценки и моделирования нагрузки различных характеристик на Балтийское море с учетом как речного, так и атмосферного переноса [30]. Одной из ключевых функций NEST является возможность анализа будущих сценариев изменения нагрузки через модели **Extending Current Loads** и **BSAP Loads**, каждая из которых отражает

различный подход к управлению и прогнозированию антропогенного воздействия на морскую среду.

Модель **Extending Current Loads** представляет собой сценарий, при котором текущие уровни антропогенной нагрузки, которые зафиксированы в референтном периоде, как правило 1997–2003 гг., и сохраняются в будущем без введения дополнительных мер по снижению выбросов. Это своего рода инерционный сценарий, демонстрирующий возможные последствия отсутствия политики по сокращению эвтрофицирующих веществ [30], [31].

Такой подход важен для понимания, как сложатся экологические условия Балтийского моря, если хозяйственная деятельность государств региона останется на прежнем уровне. Модель позволяет определить, какие водосборные бассейны продолжают оказывать наибольшее давление, а также выявить регионы с высоким риском нарушений экологических нормативов.

В противоположность первому сценарию, модель **BSAP Loads** (Baltic Sea Action Plan Loads) основана на целевых значениях загрузки питательными веществами, установленных в рамках **Балтийского плана действий (BSAP)**, согласованного странами-участницами HELCOM [31], [32]. Этот сценарий предполагает реализацию мероприятий по снижению антропогенных выбросов с целью достижения «хорошего экологического состояния» морской среды в долгосрочной перспективе.

Модель BSAP Loads оценивает влияние выполнения обязательств по снижению поступления азота и фосфора в прибрежные и открытые части моря. В частности, она позволяет сравнить ожидаемые результаты при полной реализации мер с текущим уровнем загрязнения и тем самым определить дефицит в выполнении целей BSAP [33].

В Nest можно визуализировать некоторые результаты, кликнув на исследуемый регион на карте и затем выбрав пелагические или бентические переменные или потоки (рис. 12).

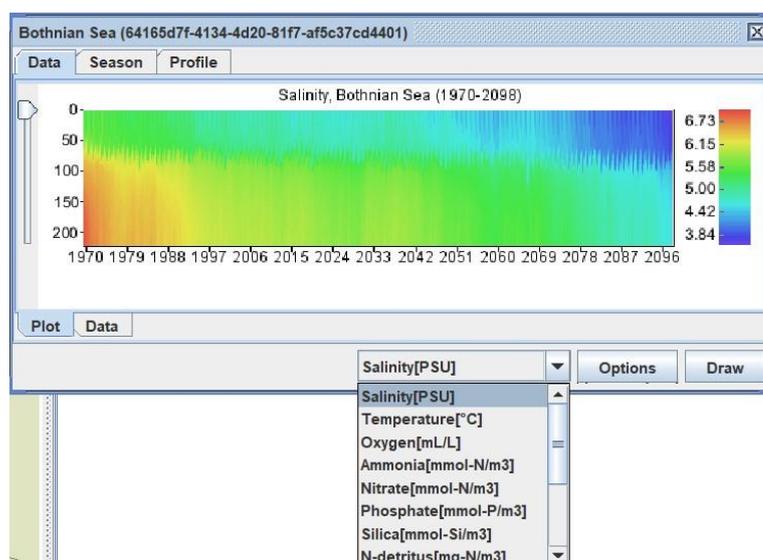


Рисунок 12 – Визуализация данных и список характеристик.

Вкладка «Data»-«Plot» показывает контурный график выбранной переменной для всего временного и глубинного интервала.

Вкладка «Profile» отображает статистику симуляции в виде таблицы слева и в виде графика справа, агрегированная по определённым глубинам и минимальным и максимальным значениям, 25%, 50% и 75% квартилей. Красная линия показывает среднее значение, зелёная - медиану (50%) (рис.13).

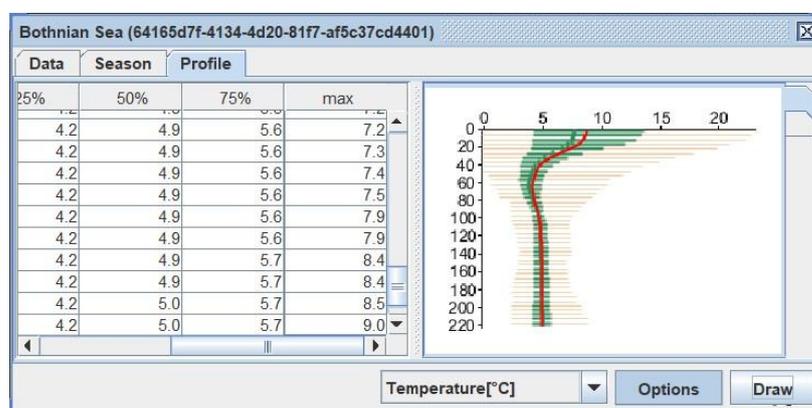


Рисунок 13 - Вкладка «Data»-«Profile»

2.3. Материалы и методы

Прогностические оценки состояния экосистем Балтийского моря были выполнены с помощью модели BALTSEM. Метеорологическая модель использовалась Max Planck Institute for Meteorology Earth System Model MPI-ESM-LR., были взяты наиболее распространённые климатические сценарии

RCP 4.5 и RCP 8.5. Нагрузки на реки задавались при увеличении текущих нагрузок.

В данной работе рассматривались Ботнический и Финский заливы. Были получены прогностические оценки изменения таких гидрохимических и гидрофизических характеристик, как соленость (PSU), температура ($^{\circ}\text{C}$), растворенный кислород (мл/л), азот (ммольN/м^3) и фосфаты (ммольP/м^3), за два климатических периода 1990-2020 и 2021-2050 года. Ассимиляция данных с 1990 по 2006 год, а до 2050 прогностическая оценка

Глава 3. Прогностическая оценка гидрохимических и гидрофизических компонентов состояния экосистемы бассейнов Балтийского моря при различных климатических сценариях

На модели BALTSEM были проведены расчеты по воспроизведению будущих состояний гидрохимических и физических характеристик. Одними из наиболее важных показателей, которые будут рассмотрены являются соленость (PSU), температура ($^{\circ}\text{C}$), растворенный кислород (мл/л), азот (ммольN/м^3), фосфаты (ммольP/м^3) и аммоний (ммольN/м^3). С помощью программы Nest были построены графики, отображающие вертикальное распределение исследуемых характеристик, где по оси X отложена глубина, по оси Y — годы, а цветовая шкала отражает значения рассматриваемой характеристики. А также вертикальные профили характеристик, где отображены минимальные и максимальные значения (желтая линия), 25%, 50% и 75% квартилей (зеленая). Красная линия показывает среднее значение, зеленая - медиану (50%)

3.1 Прогностическая оценка состояния экосистемы Ботнического залива

Рассматривая рисунок 14 видно, что температура на поверхности имеет максимальные значения, затем с глубиной уменьшается до 80 горизонта, достигая минимальных значений, после возрастает. Термоклин находится примерно в слое 20-30 метров. Сравнивая два климатических периода по сценарию RCP 4.5, можно заметить, что значения в среднем увеличились на $0,46^{\circ}\text{C}$. Максимальные изменения наблюдаются в поверхностном слое, где температура увеличилась на $0,74^{\circ}\text{C}$, а минимальные – на глубине 82 метров и равно $0,33^{\circ}\text{C}$. По сценарию RCP 8.5 значения в среднем увеличились на $0,52^{\circ}\text{C}$. На горизонте 17 метров наблюдались максимальные изменения, равные $0,71^{\circ}\text{C}$, а минимальные – на глубине 82 метров равно $0,35^{\circ}\text{C}$. Заметные отличия можно заметить на рисунках 14.б и 14.г, так как если сравнивать значения, рассчитанные для второго климатического периода, в среднем увеличились на $0,12^{\circ}\text{C}$, как по первому на $0,06^{\circ}\text{C}$. При сравнении с предыдущим периодом, можно отметить общее прогревание вод. В фотическом слое (0 – 40 м) температура повышается в среднем с $5,08^{\circ}\text{C}$ до $5,7^{\circ}\text{C}$ при RCP 4.5, а при RCP

8.5. - с 5,19 °С до 6,02 °С, в глубинном слое по первому сценарию - с 3,29 °С до 3,7 °С, по второму - с 3,28 °С до 3,77 °С, в придонном слое (80-112 м) при RCP 8.5, а при RCP 4.5. - с 3,14 °С до 3,39 °С.

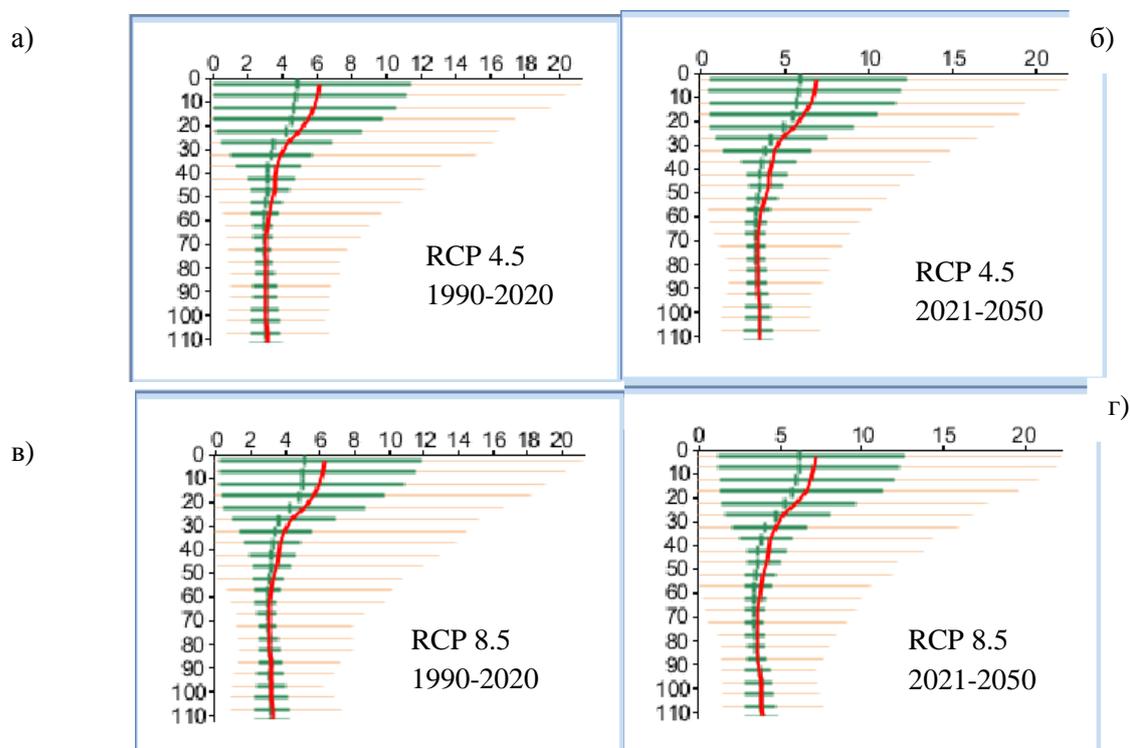


Рисунок 14 – Вертикальные профили температур в Ботническом заливе при сценарии: а) RCP 4.5 за 1990-2020 г., б) RCP 4.5 за 2021-2050 г., в) RCP 8.5 за 1990-2020 г., г) RCP 8.5 за 2021-2050 г. Минимальные и максимальные значения (желтая линия), среднее (красная), 25%, 50% (медиана) и 75% квантилей (зеленые).

По рисунку 15.а и 15.б можно заметить, что диапазон значений по первому сценарию RCP 4.5 варьируется от -0,14°С до 19,51 °С, а по второму сценарию RCP 8.5 на рисунках 15.в и 15.г - от -0,14°С до 20,4°С. На поверхности (0-20 м) летом температура достигает максимальных значений, а зимой – минимальных. С глубиной быстро падает, уже на 40–60 м преобладают низкие значения. На глубине 80–100 м температура воды практически не превышает 2°С. Годовой цикл хорошо выражен: тёплый слой

б)

г)

б)

г)

Рисунок 15 – Распределение температуры в Ботническом

Рисунок 16 – Распределение солёности в Ботническом

формируется летом, осенью и зимой температура выравнивается по всей толще воды. Сезонная динамика сохраняется при двух сценариях, но виден общий тренд к повышению температуры.

Рассматривая рисунок 16, видно, что диапазон значений солёности по первому сценарию варьируются от 2,59 до 3,98 PSU за 1990-2020 г., а за 2021-2050 г. – от 2,42 до 3,61 PSU. На поверхности солёность минимальна и с глубиной увеличивается, достигая максимальных значений. Годовые колебания выражены слабо, солёность стабильна по годам. Сравнивая два периода по сценарию RCP 4.5, видно, что структура профиля сохраняется, поверхностные воды менее солёные, глубинные — более солёные. Наблюдается тенденция к ^{а)} большему ^{б)} значению солёности на все ^{а)} глубинах. ^{в)}

По второму сценарию за первый климатический период диапазон значений солёности от 2,49 и до 3,98 PSU, а за второй - от 2,43 и до 3,59 PSU. Аналогично первому сценарию, минимальные значения сосредоточены на поверхности, а максимальные – в придонном слое. Также наблюдается тенденция к снижению солёности, только на поверхности разница между сценариями максимальна и составляет 0,036 PSU за 1990-2020 г., на глубине 92 метрах разница минимальна – 0,028 PSU, следовательно, значения по RCP 8.5 намного ниже. За период 2021-2050 г. на поверхности разница равна -0,002 PSU, в придонном слое разница минимальна и равна 0,0001 PSU

На рисунке 17 видно, что соленость с глубиной увеличивается: 4.а) с 2,93 до 3,59 PSU, 4.б) с 2,72 до 3,324 PSU, 4.в) с 2,89 до 3,56 PSU, 4.г) с 2,71 до 3,323 PSU. Следовательно, по сценарию RCP 8.5, будет наблюдаться большее опреснение, чем по первому сценарию.

Если отдельно рассматривать сценарий RCP 4.5, можно отметить, что соленость уменьшится в среднем на 0,25 PSU. Максимальные изменения наблюдаются на 92 метрах и составляют 0,28 PSU, минимальные – в поверхностном слое (2,5 м) 0,21 PSU. Рассматривая другой сценарий видно, что соленость также в среднем уменьшится на 0,23 PSU. На 77 метрах наблюдаются максимальные изменения, которые составляют 0,27 PSU. А минимальные изменения, также как и по первому сценарию произойдут на 2,5 метрах и будут равны 0,18 PSU.

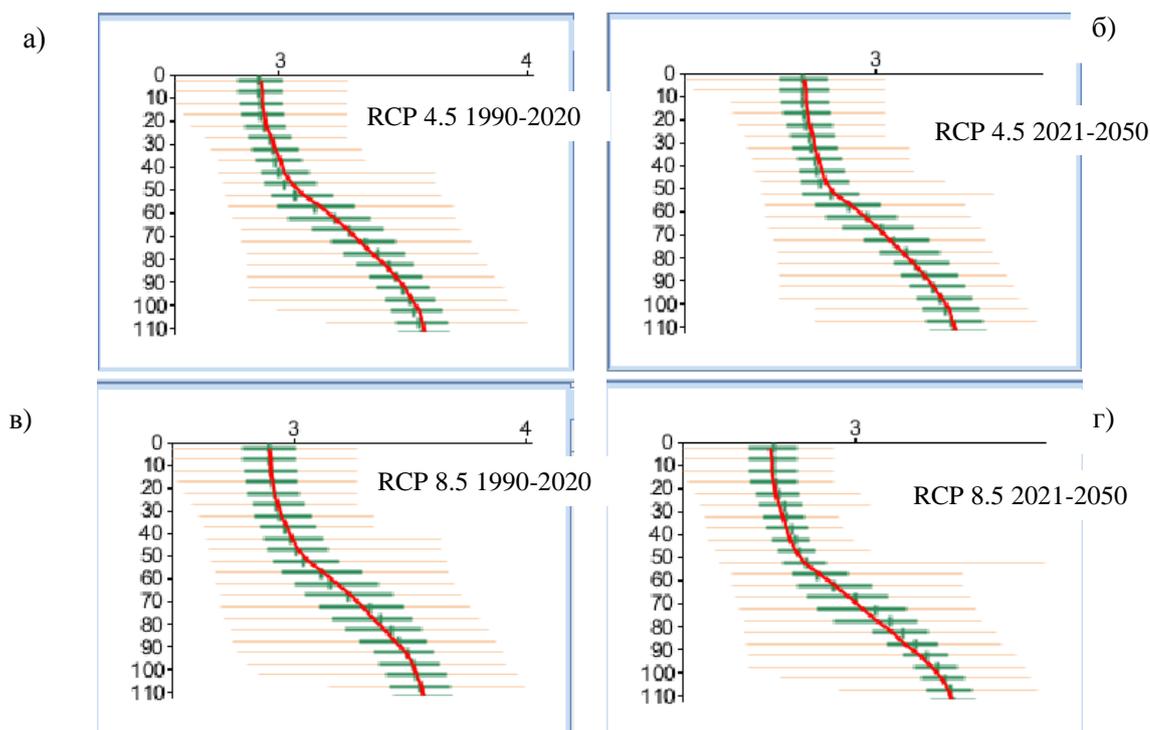


Рисунок 17 – Вертикальные профили солености в Ботническом заливе при сценарии: а) RCP 4.5 за 1990-2020 г., б) RCP 4.5 за 2021-2050 г., в) RCP 8.5 за 1990-2020 г., г) RCP 8.5 за 2021-2050 г. Минимальные и максимальные значения (желтая линия), среднее (красная), 25%, 50% (медиана) и 75% квантилей (зеленые).

По рисунку 18 можно сделать вывод, что кислород на поверхности имеет минимальные значения, затем увеличивается до 42 метров, достигая максимального значения, после чего уменьшается при двух сценариях и за каждый климатический период. По RCP 4.5 кислород в среднем уменьшится на 0,046 мл/л, как по сценарию RCP 8.5 – 0,061 мл/л, следовательно, при втором сценарии кислород уменьшится больше на 0,015 мл/л.

Максимальное изменение по первому сценарию наблюдаются на 12 метрах, равное 0,1 мл/л, а по второму на 17 метрах – 0,14 мл/л. Минимальное изменение по RCP 4.5 наблюдается на 57 метрах и составляет 0,02 мл/л, по RCP 8.5 на 82 метрах - 0,004 мл/л.

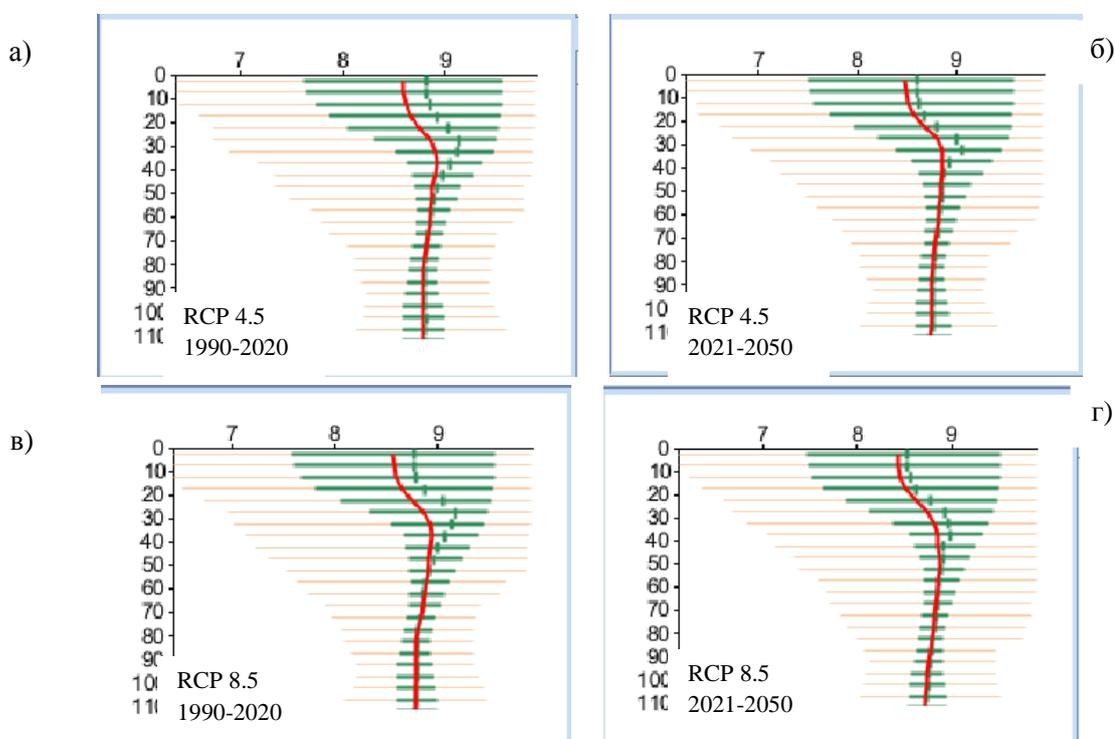


Рисунок 18 – Вертикальные профили растворенного кислорода в Ботническом заливе при сценарии: а) RCP 4.5 за 1990-2020 г., б) RCP 4.5 за 2021-2050 г., в) RCP 8.5 за 1990-2020 г., г) RCP 8.5 за 2021-2050 г. Минимальные и максимальные значения (желтая линия), среднее (красная), 25%, 50% (медиана) и 75% квантилей (зеленые).

Рассматривая распределение растворенного кислорода по рисунку 19, можно отметить, что есть сезонная динамика, летом кислород на поверхности достигает своего максимума, а зимой – минимума. Также зимой происходит

выравнивание по всей толще. Поверхностные воды (0–20 м) характеризуются максимальными значениями, особенно весной и летом. С глубиной концентрация кислорода постепенно снижается, достигая минимальных значений на глубине 80–100 м. Диапазон значений варьируется от 6,5 до 9,87 мг/л при первом сценарии, а по второму – от 6,35 до 9,8 мг/л.

Рисунок 19 – Распределение растворенного кислорода в

Рисунок 20 – Распределение азота в Ботническом заливе: а)

Интервал значений нитратов по RCP 4.5 составляет от 5,57 до 10,05 ммольN/м³, а при RCP 8.5 - от 5,59 до 9,26 ммольN/м³ (рис. 20). В поверхностных слоях (0–40 м) концентрация нитратов максимальна, затем нитраты уменьшаются с глубиной, достигая минимальных значений. Сезонные колебания выражены слабо, но в отдельные годы на глубине наблюдаются всплески.

По RCP 4.5 в среднем прогнозируется увеличение нитратов на 0,26 ммольN/м³, как по RCP 8.5 – 0,04 ммольN/м³. Также важно отметить, что по первому сценарию увеличение происходит по всей глубине, а по второму – от 0 до 33 метров будет уменьшение концентрации нитратов, а только после увеличение.

а)

в)

а)

в)

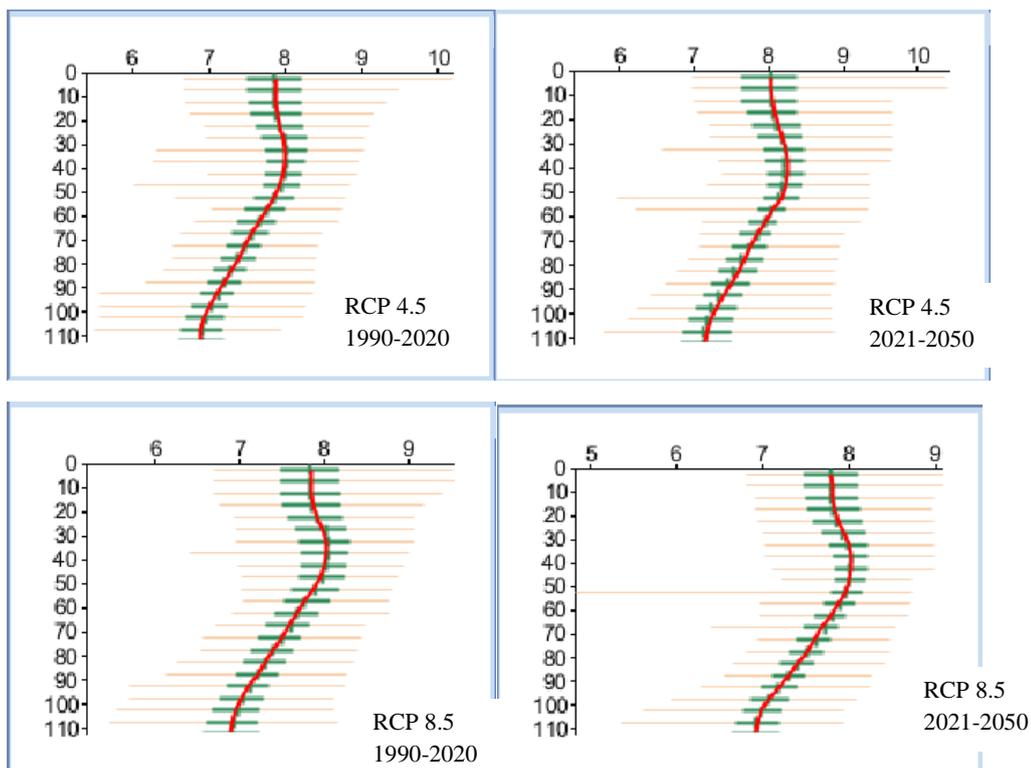


Рисунок 21– Вертикальные профили нитратов в Ботническом заливе при сценарии: а) RCP 4.5 за 1990-2020 г., б) RCP 4.5 за 2021-2050 г., в) RCP 8.5 за 1990-2020 г., г) RCP 8.5 за 2021-2050 г. Минимальные и максимальные значения (желтая линия), среднее (красная), 25%, 50% (медиана) и 75% квантилей (зеленые).

По рисунку 21 можно отметить, что форма вертикального профиля сохраняется, при различных сценариях и климатических периодах. При сценарии RCP 4.5 за 1990-2020 гг. максимальные значения колеблются около 8 мкмольN/м^3 в диапазоне глубин от 25 до 50 м. В верхнем слое (0–20 м) наблюдается незначительное снижение концентрации из-за биологического потребления нитратов фитопланктоном. Минимальные значения сосредоточены в придонном слое и варьируются около 7 ммольN/м^3 . Наиболее значительное изменение наблюдается в сценарии RCP 4.5 за 2021–2050 гг., по всей глубине происходит заметное повышение концентраций нитратов. Максимальные значения превышают 8 ммольN/м^3 даже у поверхности, что указывает на возможное усиление эвтрофикации.

При сценарии RCP 8.5 за первый климатический период наблюдаются немного низкие значения нитратов в поверхностном слое, чем при RCP 4.5 за

тот же период. Также наблюдается небольшое увеличение значений нитратов на глубинах от 37 до 112 м, в сравнение с первым сценарием. В последующем периоде при том же сценарии, концентрация нитратов на глубинах до 35 м уменьшается, а в последующих слоях становится более насыщенным по сравнению с предыдущим периодом.

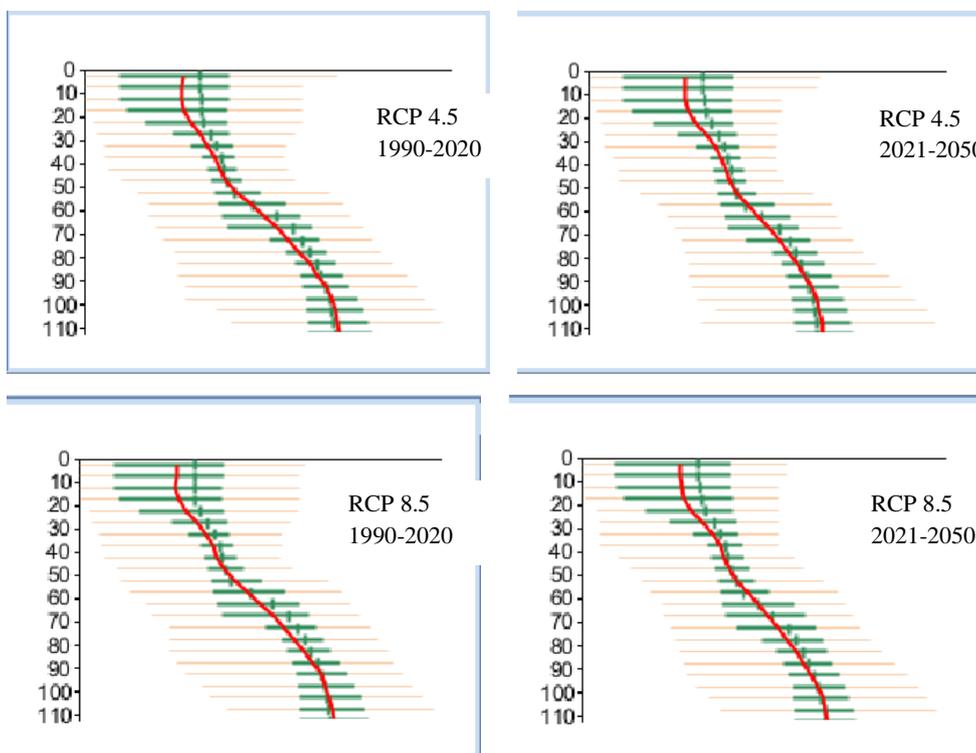


Рисунок 22 – Вертикальные профили фосфатов в Ботническом заливе при сценарии: а) RCP 4.5 за 1990-2020 г., б) RCP 4.5 за 2021-2050 г., в) RCP 8.5 за 1990-2020 г., г) RCP 8.5 за 2021-2050 г. Минимальные и максимальные значения (желтая линия), среднее (красная), 25%, 50% (медиана) и 75% квантилей (зеленые).

По рисунку 22 можно сделать вывод, что концентрации фосфатов постепенно увеличиваются с глубиной примерно от $0,05 \text{ ммольР/м}^3$ у поверхности до $0,13 \text{ ммольР/м}^3$ у дна по двум сценариям. Такой градиент типичен для стратифицированных морских вод, где разложение органического вещества приводит к накоплению фосфатов в придонных слоях, а поверхностные воды остаются обеднёнными из-за биологического потребления.

Если сравнивать два периода при RCP 4.5, то можно заметить, умеренное повышение концентраций от 0 до 50 м, а затем умеренное снижение, а при RCP 8.5 обратная ситуация. Максимальные повышения наблюдаются в слое от 35-45 м и составляет $0,003 \text{ ммольP/м}^3$ по RCP 4.5, а по RCP 8.5 в том же слое – $0,001 \text{ ммольP/м}^3$. Минимальные понижения происходят в придонном слое (от 80-112 м) и равны по первому и второму сценарию $0,01 \text{ ммольP/м}^3$.

Таким образом, во всех сценариях прослеживается рост концентраций фосфатов в слое от 0 до 50 м в период 2021–2050 гг. по сравнению с 1990–2020 гг. Это указывает на усиление процессов эвтрофикации в поверхностном слое, потенциальное повышение кислорода у дна.

Значения фосфатов по сценарию RCP 4.5 находятся в пределах от $0,183$ до $0,008 \text{ ммольP/м}^3$, а по сценарию RCP 8.5 – от $0,177$ до $0,008 \text{ ммольP/м}^3$ (рис. 23). Минимальные значения фосфатов наблюдаются в поверхностных слоях (0–20 м), максимальные — на глубине 80–112 м. Четко выражена сезонная динамика, когда летом происходит активное потребление фитопланктоном, концентрация фосфатов в фотическом слое падает, а зимой наоборот она растет.

Рисунок 23 – Распределение
фосфатов в Ботническом

3.2. Прогностическая оценка состояния экосистемы Финского залива

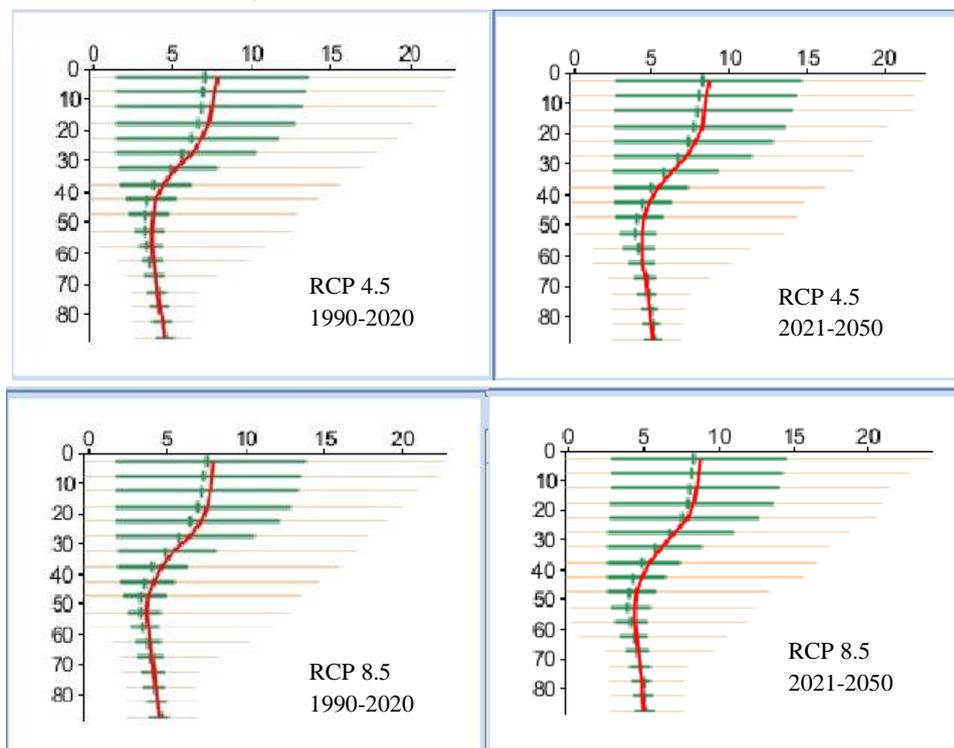


Рисунок 24 – Вертикальные профили температуры в Финском заливе при сценарии: а) RCP 4.5 за 1990-2020 г., б) RCP 4.5 за 2021-2050 г., в) RCP 8.5 за 1990-2020 г., г) RCP 8.5 за 2021-2050 г., где красная линия среднее значение. Минимальные и максимальные значения (желтая линия), среднее (красная), 25%, 50% (медиана) и 75% квантилей (зеленые).

Анализ рисунка 24 показывает, что температурный профиль водной толщи характеризуется максимальными значениями на поверхности, с последующим снижением температуры с глубиной до примерно 62 м в первом сценарии (RCP 4.5) и до 52–57 м во втором (RCP 8.5), где наблюдаются минимальные значения. Далее температура вновь незначительно возрастает. Термоклин располагается приблизительно в слое от 20 до 30 м. При сравнении двух климатических периодов в рамках сценария RCP 4.5 отмечается общее увеличение температуры в среднем на $0,78^{\circ}\text{C}$. Наиболее существенные изменения происходят в верхнем слое (0–33 м), где температура возросла на $0,93^{\circ}\text{C}$, тогда как в придонном слое наблюдается минимальное повышение – на $0,55^{\circ}\text{C}$. Для сценария RCP 8.5 среднее повышение температуры составило $0,67^{\circ}\text{C}$. Максимальный прирост зафиксирован на поверхности — $0,84^{\circ}\text{C}$, в то

время как в придонном слое (77–87 м) температура увеличилась лишь на 0,49 °С. В целом, при сравнении двух сценариев, рассчитанные средние значения температуры воды для первого климатического периода выше на 0,722 °С и на 0,022 °С — для второго периода.

В фотическом слое (0–30 м) при RCP 4.5 средняя температура выросла с 6,44 °С до 8,25 °С, а при RCP 8.5 — с 7,53 °С до 8,3 °С. В глубинных слоях также отмечаются изменения: при RCP 4.5 температура увеличилась с 3,79 °С до 4,9 °С, тогда как при RCP 8.5 наблюдается увеличение с 4,27 °С до 4,91 °С. В придонном слое (77–87 м) температура повысилась с 3,75 °С до 5,0 °С по сценарию RCP 4.5 и с 4,46 °С до 4,99 °С — по сценарию RCP 8.5.

Согласно рисунку 25, температурные значения при RCP 4.5 варьируются от –0,29 °С до 20,7 °С, а при RCP 8.5 — от –0,27 °С до 21,3 °С. В летний период поверхностные слои (0–20 м) прогреваются до максимальных значений, в то время как зимой фиксируются минимальные температуры. По мере увеличения глубины температура быстро снижается: уже на 40–60 м преобладают низкие значения. Годовой температурный цикл чётко выражен — летом формируется тёплый поверхностный слой, а в осенне-зимний период температура выравнивается по всей водной толще. Несмотря на сохранение сезонной динамики при обоих сценариях, прослеживается устойчивый тренд к общему потеплению.

Таким образом, анализ демонстрирует явную тенденцию к потеплению вод Финского залива во всех рассмотренных сценариях, при этом наиболее сильные изменения происходят при сценарии RCP 8.5. Подобное потепление может значительно повлиять на экосистему залива, включая процессы продуктивности, кислородного обмена и циркуляции воды.

б)

г)

б)

г)

Рисунок 25 –
Распределение

Рисунок 26 –
Распределение

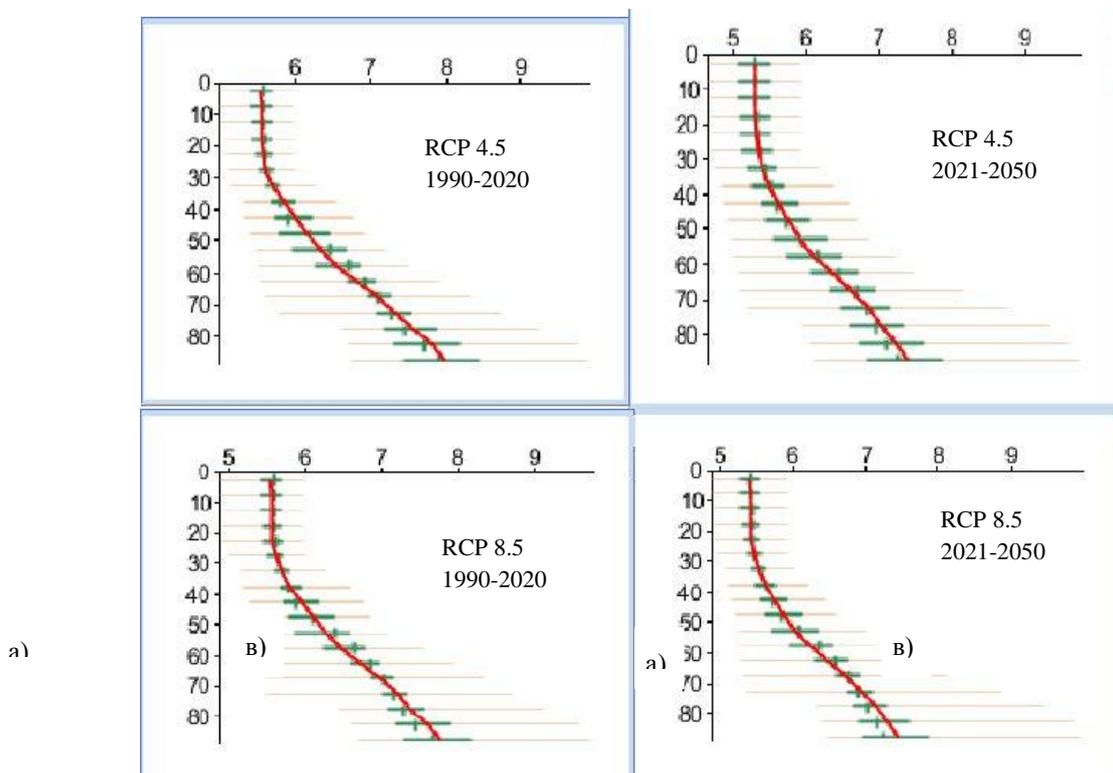


Рисунок 27 – Вертикальные профили солёности в Финском заливе при сценарии: а) RCP 4.5 за 1990-2020 г., б) RCP 4.5 за 2021-2050 г., в) RCP 8.5 за 1990-2020 г., г) RCP 8.5 за 2021-2050 г., где красная линия среднее значение. Минимальные и максимальные значения (желтая линия), среднее (красная), 25%, 50% (медиана) и 75% квантилей (зеленые).

На рисунке 26 показано, что солёность увеличивается с глубиной во всех сценариях. В частности, по сценарию RCP 4.5: а) значения изменяются от 5,06 до 9,45 PSU, по сценарию б) — от 4,67 до 9,73 PSU. Для сценария RCP 8.5: в) солёность варьирует от 4,92 до 9,61 PSU, а в случае г) — от 4,93 до 9,79 PSU. Это указывает на то, что в условиях сценария RCP 4.5 ожидается более выраженное опреснение по сравнению со сценарием RCP 8.5, особенно в верхних слоях.

Рассматривая рисунок 27, можно отметить, что средние значения солёности по сценарию RCP 4.5 в период 1990–2020 гг. находятся в пределах от 5,56 до 7,99 PSU, а в период 2021–2050 гг. – от 5,28 до 7,39 PSU. Солёность на поверхности остаётся минимальной, а с увеличением глубины достигает максимальных значений. Годовая динамика выражена слабо, солёность остаётся относительно стабильной по годам. При этом структура вертикального профиля сохраняется, поверхностные воды менее солёные, глубинные – более солёные. В то же время наблюдается общее снижение солёности на всех уровнях в среднем на 0,4 PSU. Наибольшие изменения фиксируются в придонном слое 0,59 PSU, наименьшие – в верхнем слое 0,29 PSU. По сценарию RCP 8.5 диапазон значений солёности составляет от 5,57 до 7,78 PSU за 1990–2020 гг. и от 5,40 до 7,46 PSU за 2021–2050 гг. Вертикальное распределение аналогично предыдущему сценарию. В целом также отмечается снижение солёности, но в меньшей степени — в среднем на 0,23 PSU.

Сравнивая оба сценария за период 1990–2020 гг., можно отметить, что солёность по RCP 8.5 была ниже в среднем на 0,06 PSU по сравнению с RCP 4.5. Однако в период 2021–2050 гг. ситуация меняется, средняя солёность по сценарию RCP 8.5 оказывается выше на 0,11 PSU, чем по RCP 4.5. Это указывает на то, что в первый период более сильное опреснение прогнозируется по сценарию RCP 8.5, тогда как во втором периоде больший эффект опреснения ожидается по сценарию RCP 4.5.

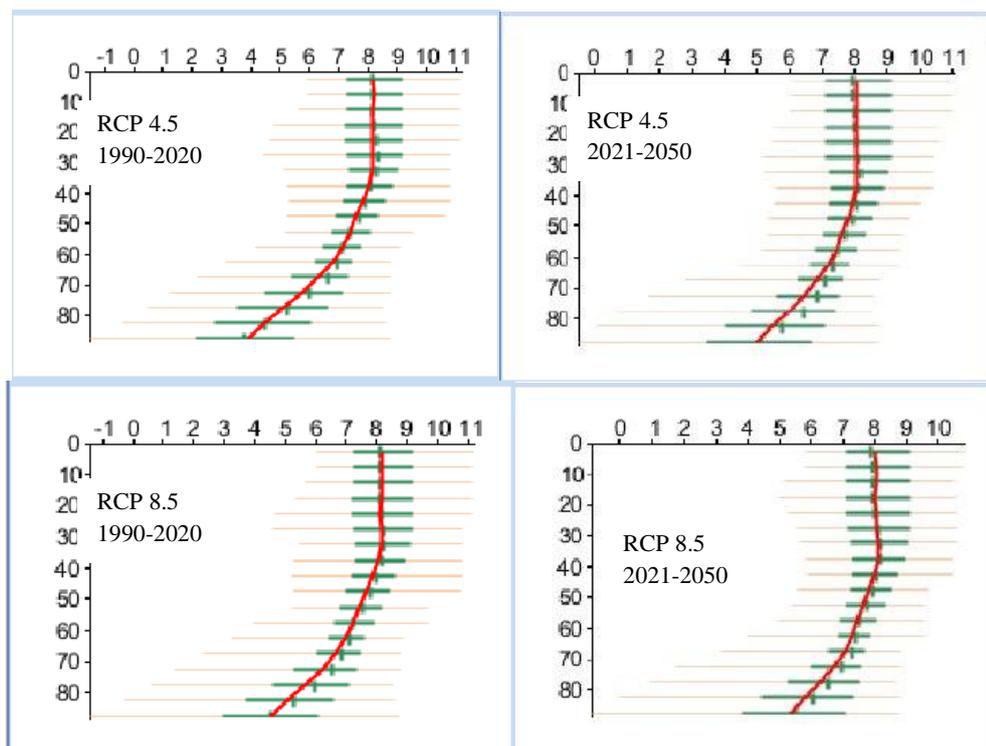


Рисунок 3.15 28 – Вертикальные профили растворенного кислорода в Финском заливе при сценарии: а) RCP 4.5 за 1990-2020 г., б) RCP 4.5 за 2021-2050 г., в) RCP 8.5 за 1990-2020 г., г) RCP 8.5 за 2021-2050 г., где красная линия среднее значение. Минимальные и максимальные значения (желтая линия), среднее (красная), 25%, 50% (медиана) и 75% кватилей (зеленые).

Анализ рисунка 28 показывает, что во всех периодах и для обоих сценариев концентрация растворённого кислорода в Финском заливе изменяется по схожему профилю: в верхнем слое (0–40 м) фиксируются максимальные значения, которые с увеличением глубины снижаются до минимумов.

По сценарию RCP 4.5 средний прирост кислорода составляет 0,27 мл/л, тогда как по сценарию RCP 8.5 — 0,2 мл/л. Таким образом, при RCP 4.5 наблюдается большее увеличение — на 0,07 мл/л.

Наибольшие изменения по обоим сценариям отмечаются в придонном слое: 1,13 мл/л для RCP 4.5 и 0,87 мл/л для RCP 8.5. Минимальные изменения зафиксированы на глубине 37 м (↑ 0,04 мл/л) по сценарию RCP 4.5 и на глубине 32 м (↓ 0,01 мл/л) по RCP 8.5. Также важно отметить, что при сравнении двух

сценариев концентрация кислорода в верхнем слое (0–32 м) снижается с глубиной, а затем начинает увеличиваться.

Рисунок 29 демонстрирует сезонные колебания содержания кислорода. Летом его концентрация на поверхности достигает максимума, тогда как зимой наблюдаются минимальные значения и вертикальное выравнивание по всей водной толще. Поверхностные воды (0–20 м) характеризуются особенно высокими концентрациями весной и летом. С глубиной содержание кислорода постепенно снижается, достигая минимума на глубинах 80–87 м.

Диапазон концентраций по сценарию RCP 4.5 составляет от –0,8 до 10,21 мл/л, а по RCP 8.5 — от –0,82 до 10,22 мл/л. Это свидетельствует о наличии сероводородных и гипоксических зон в придонных слоях. Однако, согласно прогнозам, сероводородная зона с 2034 года не будет наблюдаться.

Рисунок 29 – Распределение растворенного кислорода в

Рисунок 30 – Распределение нитратов в Финском заливе:

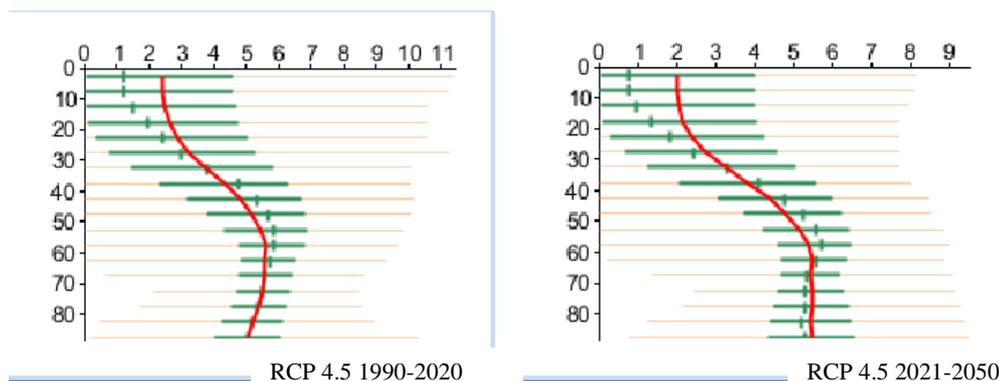
Интервал значений нитратов по RCP 4.5 и RCP 8.5 составляет от 0,01 до 10,7 ммольN/м³ (рис. 30). Во всех вариантах моделирования наблюдается устойчивая вертикальная стратификация нитратов. Поверхностные слои (0–20 м) характеризуются сравнительно низкими и средними концентрациями, не превышающими 5 мг/л. С увеличением глубины содержание нитратов возрастает, достигая максимальных значений (до ≈8 мг/л) в придонных слоях (60–87 м), что обусловлено накоплением продуктов разложения органического вещества при ограниченном вертикальном перемешивании, также в отдельные годы наблюдаются всплески.

Сезонная динамика хорошо выражена, весной и летом в верхних слоях фиксируются пониженные значения, которые вероятно связаны с активным потреблением фитопланктоном. В зимний период концентрации становятся более равномерными по глубине.

По RCP 4.5 в среднем прогнозируется по всей толще уменьшение нитратов на $0,27 \text{ ммольN/м}^3$, как по RCP 8.5 – $0,46 \text{ ммольN/м}^3$. Также важно отметить, что по первому сценарию уменьшение происходит до 75 метров, а в придонном слое происходит увеличение концентрации нитратов. При втором сценарии концентрация нитратов с глубиной будет уменьшатся до 80 метров, а затем будет возрастать.

По рисунку 31 можно отметить, что форма вертикального профиля нитратов сохраняется при различных сценариях и климатических периодах. При сценарии RCP 4.5 в период 1990–2020 годов максимальные средние концентрации достигают примерно $5,6 \text{ ммольN/м}^3$ на глубинах от 57 до 62 метров. Минимальные значения сосредоточены в поверхностном слое и составляют около $2,4 \text{ ммольN/м}^3$. По сравнению с последующим климатическим периодом, в верхнем слое (0–20 м) наблюдается значительное снижение концентрации нитратов на $0,46 \text{ ммольN/м}^3$, что связано с биологическим потреблением фитопланктоном.

При сценарии RCP 4.5 в первом климатическом периоде концентрации нитратов по всей толще воды значительно ниже, чем при RCP 8.5. При этом в интервале глубин от 77 до 87 метров наблюдается небольшое повышение значений нитратов при двух сценариях.



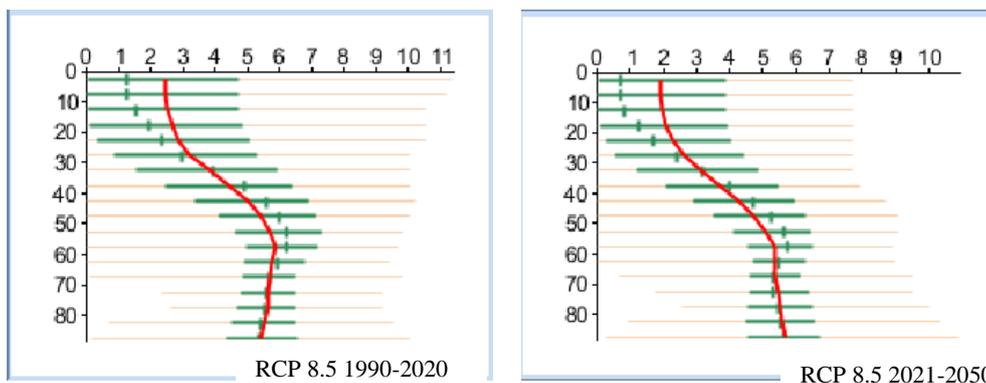
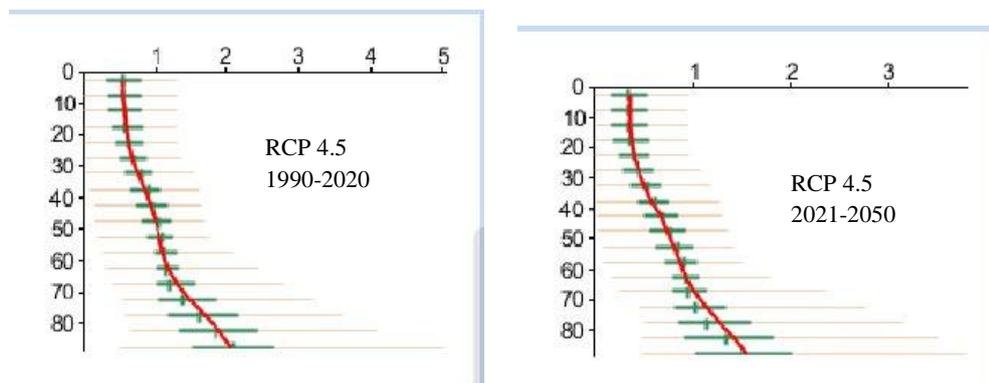


Рисунок 31– Вертикальные профили нитратов в Финском заливе при сценарии: а) RCP 4.5 за 1990-2020 г., б) RCP 4.5 за 2021-2050 г., в) RCP 8.5 за 1990-2020 г., г) RCP 8.5 за 2021-2050 г., где красная линия среднее значение. Минимальные и максимальные значения (желтая линия), среднее (красная), 25%, 50% (медиана) и 75% квантилей (зеленые).

Значения фосфатов по сценарию RCP 4.5 варьируются от 0,03 до 4,45 ммольР/м³, а по сценарию RCP 8.5 — от 0,03 до 4,46 ммольР/м³ (рисунок 33). Минимальные концентрации фосфатов наблюдаются в поверхностных слоях (0–20 м), тогда как максимальные — в придонном горизонте на глубинах 80–112 м. Отмечается чёткая сезонная динамика: летом, в фотическом слое, концентрация фосфатов снижается из-за активного потребления фитопланктоном, а зимой — возрастает.

Согласно рисунку 32, концентрации фосфатов постепенно увеличиваются с глубиной. В среднем по сценарию RCP 4.5 концентрация уменьшилась на 0,29 ммольР/м³, а по сценарию RCP 8.5 — на 0,24 ммольР/м³. Таким образом, во всех сценариях наблюдается снижение концентраций фосфатов по всей толще воды, что свидетельствует об усилении процессов эвтрофикации.



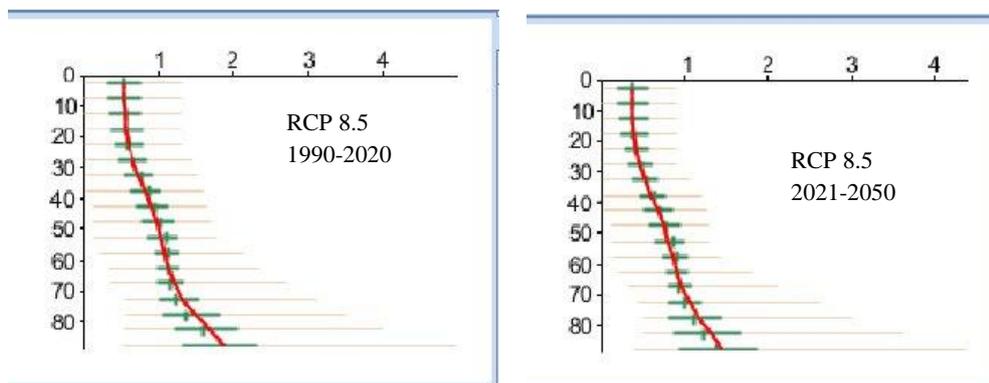


Рисунок 32 – Вертикальные профили фосфатов в Финском заливе при сценарии: а) RCP 4.5 за 1990-2020 г., б) RCP 4.5 за 2021-2050 г., в) RCP 8.5 за 1990-2020 г., г) RCP 8.5 за 2021-2050 г., где красная линия среднее значение. Минимальные и максимальные значения (желтая линия), среднее (красная), 25%, 50% (медиана) и 75% квантилей (зеленые).

Рисунок 33 – Распределение фосфатов в Финском заливе:

3.3. Сравнительный анализ компонентов экосистемы Ботнического и Финского заливов при различных климатических сценариях

Анализ вертикальных профилей гидрохимических характеристик в Ботническом и Финском заливах показывает, что климатические изменения, моделируемые сценариями RCP 4.5 и RCP 8.5, приводят к значительным трансформациям экосистем. Эти изменения могут повлиять на стратификацию

водной толщ, биологическую продуктивность и общее состояние экосистем заливов, что требует дальнейшего мониторинга.

Анализируя Ботнический залив, можно сделать следующие выводы:

Цветовые вертикальные профили распределения температуры показывают чёткую сезонность с максимальными значениями летом у поверхности и минимальными значениями на глубине. Сценарий RCP 8.5 демонстрирует более выраженный рост температуры по сравнению с RCP 4.5, особенно в верхних слоях. В зимний период температура выравнивается по всей толще воды, но в целом наблюдается тенденция к потеплению, что связано с глобальным изменением климата.

Солёность в Ботническом заливе возрастает с поверхности к глубине — от 2,4 PSU до 3,98 PSU. В прогнозном периоде 2021–2050 годов наблюдается снижение солёности по сравнению с первым периодом, особенно при сценарии RCP 8.5, что связано с увеличением пресноводного стока и изменением гидрологического баланса. Вертикальный градиент сохраняется, но абсолютные значения уменьшаются.

Максимальные концентрации кислорода (до 9,9 мг/л) наблюдаются у поверхности, минимальные (около 6,4 мг/л) — на глубине. В будущем прогнозируется уменьшение значений кислорода по глубине как при RCP 4.5, так и при RCP 8.5. По RCP 4.5 кислород в среднем уменьшится на 0,046 мл/л, как по сценарию RCP 8.5 – 0,061 мл/л, следовательно, при втором сценарии кислород уменьшится больше на 0,015 мл/л.

В поверхностных слоях (0–40 м) концентрация нитратов достигает максимальных значений, после чего с глубиной постепенно снижается, достигая минимальных. Сезонные колебания нитратов выражены слабо, однако в некоторые годы на больших глубинах наблюдаются всплески концентраций. По сценарию RCP 4.5 прогнозируется среднее увеличение содержания нитратов на 0,261 ммольN/м³, тогда как по сценарию RCP 8.5 — на 0,039 ммольN/м³. При этом по первому сценарию рост концентраций происходит по всей глубине, а

по второму — на глубинах от 0 до 33 метров наблюдается снижение, после чего концентрации начинают увеличиваться.

Значения фосфатов по сценарию RCP 4.5 варьируются от 0,008 до 0,183 ммольP/м³, а по сценарию RCP 8.5 — от 0,008 до 0,177 ммольP/м³ (рисунок 3.10). Минимальные концентрации фосфатов фиксируются в поверхностных слоях (0–20 м), а максимальные — на глубинах 80–112 м. Отмечается чёткая сезонная динамика: летом в фотическом слое концентрация фосфатов снижается из-за активного потребления фитопланктоном, а зимой — возрастает.

Анализируя Финский залив, можно сделать следующие выводы:

Аналогично Ботническому заливу, в будущем прогнозируется повышение температуры, особенно при RCP 8.5, с максимальными значениями до 21,3°C.

Солёность в Финском заливе варьируется от 4,92 PSU у поверхности до 9,8 PSU у дна. В прогнозном периоде наблюдается тенденция к снижению солёности на всех глубинах, что связано с увеличением пресноводного стока и изменениями в водообмене.

Концентрация кислорода в придонных слоях Финского залива часто близка к нулю, особенно в глубоководных районах, что свидетельствует о наличии гипоксии и сероводородной зоне. В будущем прогнозируется увеличение концентраций кислорода в придонном слое, особенно при сценарии RCP 4.5. С 2034 года не будут наблюдаться сероводородные зоны.

По RCP 4.5 в среднем прогнозируется по всей толще уменьшение нитратов на 0,27 ммольN/м³, как по RCP 8.5 – 0,46 ммольN/м³. Также важно отметить, что по первому сценарию уменьшение происходит до 75 метров, а в придонном слое происходит увеличение концентрации нитратов. При втором сценарии концентрация нитратов с глубиной будет уменьшаться до 80 метров, а затем будет возрастать.

В среднем по сценарию RCP 4.5 концентрация фосфатов уменьшилась на 0,29 ммольP/м³, а по сценарию RCP 8.5 — на 0,24 ммольP/м³. Таким образом, во всех сценариях наблюдается снижение концентраций фосфатов по всей толще

воды, что свидетельствует об усилении процессов эвтрофикации в поверхностных слоях и потенциальном снижении содержания кислорода у дна.

В обоих заливах наблюдается повышение температуры в прогнозном периоде, особенно при сценарии RCP 8.5, что ведёт к ослаблению стратификации. Солёность снижается в верхних слоях, что связано с увеличением пресноводного стока и изменением гидрологического баланса. Растворённый кислород уменьшится в Ботническом заливе и в поверхностном слое Финского залива, что может привести к усилению эвтрофикации, формированию временных или постоянных гипоксических зон, несмотря на снижение стратификации, дестабилизации морской экосистемы, снижению биоразнообразия и ухудшению качества морской среды. В придонном слое Финского залива прогнозируется увеличение концентрации растворенного кислорода, что приведет к снижению гипоксических и сероводородных зон, стабилизирует экологическое состояние залива, способствует высокой продуктивности и восстановлению биоразнообразия.

Рост концентраций нитратов в верхних слоях указывает на возможное усиление эвтрофикации в Ботническом заливе, а в Финском наоборот. Уменьшение фосфора указывает на активное потребление фитопланктоном. Между параметрами прослеживается взаимосвязь: повышение температуры и снижение солености способствует ослаблению стратификации, что приведет к более интенсивному перемешиванию, из-за чего в Ботническом заливе приведет к ухудшению ситуации, а в Финском наоборот будут улучшения состояния экосистем. Но из-за повышения температур в поверхностном слое будет усиливаться эвтрофикация.

Количественные оценки изменчивости гидрофизических и гидрохимических характеристикам по двум сценариям для исследуемых объектов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Компоненты экосистемы и их прогностические оценки.

Характеристика	Климатический сценарий			
	RCP 4.5		RCP 8.5	
Залив	Ботнический	Финский	Ботнический	Финский

Температура -ра [°C]	от -0,14 до 19,51 в ср. ↑ на 0,46 max на 0 м - 0,74 min на 82 м - 0,33	от -0,29 до 20,7 в ср. ↑ на 0,78 max на 27 м - 1,07 min на 87 м - 0,55	от -0,14 до 20,4 в ср. ↑ на 0,52 max на 17 м - 0,71 min на 82 м - 0,35	от -0,27 до 21,27 в ср. ↑ на 0,67, max на 17 м - 0,84 min на 82 м - 0,49
Соленость [PSU]	от 2,42 до 3,98 в ср. ↓ на 0,25 max на 92 м - 0,28 min на 0 м - 0,21	от 4,67 до 9,73 в ср. ↓ на 0,4 max на 87 м - 0,59 min на 0 м - 0,29	от 2,43 до 3,98 в ср. ↓ на 0,23 max на 77 м - 0,27 min на 0 м - 0,18	от 4,92 до 9,79 в ср. ↓ на 0,23 max на 87 м - 0,32 min на 0 м - 0,17
Растворен- ный кислород [мл/л]	от 6,5 до 9,87 в ср. ↓ на 0,05 max на 12 м - 0,1 min на 57 м - 0,02	от -0,8 до 10,2 в ср. ↑ на 0,27 max ↑ на 87 м - 1,13 max ↓ на 0 м - 0,12	от 6,35 до 9,88 в ср. ↓ на 0,06 max на 17 м - 0,14 min на 82 м - 0,004	от -0,82 до 10,22 в ср. ↑ на 0,2 max ↑ на 87 м - 0,87 max ↓ на 0 м - 0,14
Нитраты [ммольN/ м ³]	от 5,57 до 10,05 в ср. N ↑ на 0,26	от 0,01 до 10,71 в ср. N ↓ на 0,27	от 5,59 до 9,26 в ср. N ↑ на 0,04	от 0,01 до 10,7 в ср. N ↓ на 0,46
Фосфаты [ммольP/ м ³]	от 0,01 до 0,18 в ср. ↓ на 0,002 max ↑ на 42 м - 0,003 max ↓ на 122 м - 0,01	от 0,03 до 4,45 в ср. ↓ на 0,29 max на 87 м - 0,52 min на 0 м - 0,21	от 0,01 до 0,18 в ср. ↓ на 0,003 max ↑ на 37 м - 0,001 max ↓ на 92 м - 0,01	от 0,03 до 4,46 в ср. ↓ на 0,24 max на 87 м - 0,43 min на 0 м - 0,18

Заключение

Выпускная квалификационная работа посвящена анализу прогностических изменений гидрохимических и гидрофизических характеристик в Ботническом и Финском заливах Балтийского моря под воздействием климатических изменений. Балтийское море, являясь полузамкнутым водоёмом, чувствительно к антропогенным воздействиям и климатическим изменением региона, что требует тщательного мониторинга и оценки возможных последствий.

Проведенные расчеты на модели BALTSEM для двух климатических периодов 1990-2020 2021-2050 гг. показывают, что в будущем ожидается повышение температуры воды и снижение солёности. Это тенденция является общей для двух исследуемых объектов. В рамках сценария климатических изменений RCP 4.5 в Ботническом заливе наблюдается тенденция к повышению температуры воды по всей толще на $0,46\text{ }^{\circ}\text{C}$, и увеличению концентрации нитратов в среднем на $0,26\text{ ммоль N/м}^3$. В то же время происходит общее снижение солёности и содержания растворённого кислорода — на $0,25\text{ PSU}$ и $0,05\text{ мл/л}$, соответственно. Концентрация фосфатов в верхнем 50-метровом слое несколько возрастает (на $0,002\text{ ммоль P/м}^3$), однако в целом по толщине от 50 до 87 м отмечается их незначительное уменьшение — на $0,005\text{ ммоль P/м}^3$ в среднем.

Для Финского залива в условиях RCP 4.5 характерно более выраженное потепление: среднее повышение температуры воды достигает $0,78\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом солёность воды снижается на $0,4\text{ PSU}$, а концентрация фосфатов — на $0,29\text{ ммоль P/м}^3$. Содержание растворённого кислорода демонстрирует разнонаправленные изменения в зависимости от глубины: в верхнем слое до 35 м его уровень уменьшается на $0,1\text{ мл/л}$, тогда как в глубинных слоях (35–87 м) наблюдается увеличение на $0,51\text{ мл/л}$. Концентрация нитратов в слое от 0 до 75 м снижается на $0,37\text{ ммоль N/м}^3$, тогда как в придонной части водоёма (75–87 м), напротив, увеличивается на $0,23\text{ ммоль N/м}^3$.

Сценарий RCP 8.5 демонстрирует схожие, но более выраженные изменения по двум климатическим периодам. В Ботническом заливе

температура воды по всей глубине возрастает в среднем на 0,52 °С, тогда как солёность и уровень растворённого кислорода снижаются на 0,23 PSU и 0,06 мл/л соответственно. Концентрация фосфатов в верхнем слое (0–50 м) незначительно увеличивается (на 0,001 ммоль P/м³), но в более глубоких слоях (50–87 м) уменьшается на 0,01 ммоль P/м³. Нитраты, напротив, демонстрируют снижение в верхней части водной толщи (на 0,04 ммоль N/м³ в слое до 35 м) и увеличение в глубинных слоях (на 0,07 ммоль N/м³ в слое от 35 до 87 м).

В Финском заливе при RCP 8.5 температура воды увеличивается в среднем на 0,67 °С, также отмечается снижение солёности на 0,23 PSU и уменьшение концентрации фосфатов на 0,24 ммоль P/м³. Растворённый кислород, как и при более мягком сценарии, убывает в верхнем слое до 35 м на 0,1 мл/л, в то время как в более глубоких горизонтах (35–87 м) его уровень возрастает на 0,39 мл/л. Нитратный профиль также демонстрирует характерную дифференциацию: в слое до 80 м происходит уменьшение на 0,53 ммоль N/м³, а в придонной зоне (80–87 м) — рост на 0,13 ммоль N/м³.

Повышение температуры сопровождается изменениями в солёности, понижением концентраций растворённого кислорода и перераспределением биогенных элементов, что в совокупности влияет на структуру и функционирование экосистемы. Прогнозируемые изменения свидетельствуют о возможном ослаблении стратификации водной толщи, сопровождающимся увеличением концентрации кислорода в придонном слое Финского залива и усилении процессов эвтрофикации в двух заливах, особенно в поверхностных слоях. Эти трансформации могут привести к существенным изменениям в биоразнообразии и продуктивности заливов, а также повлиять на устойчивость экосистемы в целом.

Таким образом, полученные прогностические оценки подчёркивают важность комплексного мониторинга и адаптационных мер для сохранения экосистем Балтийского моря в условиях меняющегося климата и антропогенного давления.

Список литературы:

- 1) Моря России – Балтийское море/ Информационный портал География. - URL: <https://geographyofrussia.com/morya-rossii-baltijskoe-more/> (Дата обращения: 25 ноября 2024 год)
- 2) Деев М.Г. Балтийское море/Большая Российская энциклопедия 2004-2017 [Электронный ресурс]. – URL: <https://bigenc.ru/c/baltiiskoe-more-669329> (Дата обращения: 19 ноября 2024 год)
- 3) Балтийское море/База знаний [Электронный ресурс]. – URL: http://proznania.ru/?page_id=2368 (Дата обращения: 10 ноября 2024 год)
- 4) Балтийское море/ Моря СССР - URL: <https://tapemark.narod.ru/more/09.html> (Дата обращения: 13 ноября 2024 год)
- 5) О. А. Дмитриева. 2017. «Исследование закономерностей пространственновременных измерений структурных и количественных показателей фитопланктона в различных районах Балтийского моря». ФГБНУ «АтлантНИРО». Калининград. 309.
- 6) В. М. Бондек. 1953. «Зоопланктон средней и южной части Балтийского моря и Рижского залива». Труды Всероссийского научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО). Том XXVI
- 7) А. Д. Добровольский, Б. С. Залогин. 1982. «Моря СССР». Издательство Московского университета. Москва. 190. (12)
- 8) Валло К. Общая география морей. – М.,Л.: Учпедгиз, 1948. – 507 с.
- 9) Соскин И.М. Многолетние изменения гидрологических характеристик Балтийского моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – 160 с.
- 10) Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. – М.: Мысль, 1965. – 351 с.
- 11) Экологические проблемы Калининградской области и Балтийского региона: Сб. науч. трудов. – Калининград: Изд-во КГУ, 2002.
- 12) Гидрохимические условия и основы формирования биологической

- продуктивности. Проект «Моря СССР» Т.Ш. Балтийское море. Вып. 2. – СПб.: Гидрометеиздат, 1994. – 435 с.
- 13) Антонов А.Е. Крупномасштабная изменчивость гидрометеорологического режима Балтийского моря и ее влияние на промысел. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 248 с.
 - 14) Гидрохимический режим Балтийского моря / Е.Н. Черновская, Н.М. Пастухова, А.Г. Буйневич, М.Э. Кудрявцева, Э.А. Ауниньш. - Л.: Гидрометеиздат, 1965. - 168 с.
 - 15) Экологические проблемы Балтийского моря. Справка/ РИА НОВОСТИ - URL: <https://ria.ru/20100210/208437078.html> (Дата обращения: 15 декабря 2024 год)
 - 16) Nest – a decision support system for management of the Baltic Sea [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nest.su.se/nest/> (дата обращения: 25.05.2025).
 - 17) Fredrik Wulff, Alexander Sokolov and Oleg Savchuk. Nest – a decision support system for management of the Baltic Sea. A user manual. Baltic Nest Institute, Stockholm University Baltic Sea Centre, Technical Report No. 10. 2013.
 - 18) Oleg P. Savchuk, Bo G. Gustafsson and Bärbel Müller-Karulis. BALTSEM – a marine model for decision support within the Baltic Sea Region. Baltic Nest Institute, Stockholm University Baltic Sea Centre, Technical Report No. 7. 2012.
 - 19) Giorgetta M.A., Jungclaus J.H., Reick C.H., Legutke S., Bader J., Böttinger M., Brovkin V., Crueger T., Esch M., Fieg K., et al. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 // Earth System Dynamics. — 2013. — Vol. 4, no. 2. — P. 139–172.
 - 20) Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Author Team. Springer Cham Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 2015. P. 501.

- 21) Giorgetta M.A. et al. The atmospheric general circulation model ECHAM6—Model description. – Hamburg: Max Planck Institute for Meteorology, 2013. – (MPI Report No. 135).
- 22) Stevens B., Giorgetta M., Esch M. et al. Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6 // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. – 2013. – Vol. 5, № 2. – P. 146–172. – DOI: 10.1002/jame.20015.
- 23) Jungclaus J.H., Fischer N., Haak H. et al. Characteristics of the ocean simulations in MPIOM, the ocean component of the MPI-Earth System Model // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. – 2013. – Vol. 5, № 2. – P. 422–446. – DOI: 10.1002/jame.20023.
- 24) Max Planck Institute for Meteorology. MPI-ESM Documentation [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <https://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/mpe-sm/> (дата обращения: 08.06.2025).
- 25) van Vuuren D.P., Edmonds J., Kainuma M. et al. The representative concentration pathways: An overview // *Climatic Change*. – 2011. – Vol. 109. – P. 5–31. – DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z.
- 26) Meinshausen M., Smith S.J., Calvin K. et al. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 // *Climatic Change*. – 2011. – Vol. 109. – P. 213–241. – DOI: 10.1007/s10584-011-0156-z.
- 27) IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Geneva: IPCC, 2014. – 151 p. – Режим доступа: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (дата обращения: 08.06.2025).
- 28) Moss R.H., Edmonds J.A., Hibbard K.A. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment // *Nature*. – 2010. – Vol. 463. – P. 747–756. – DOI: 10.1038/nature08823.

- 29) Riahi K., Rao S., Krey V. et al. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions // *Climatic Change*. – 2011. – Vol. 109. – P. 33–57. – DOI: 10.1007/s10584-011-0149-y.
- 30) Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI). HELCOM NEST: A Decision Support System for Nutrient Reductions in the Baltic Sea [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <https://nest.su.se/nest/> (дата обращения: 08.06.2025).
- 31) HELCOM. Baltic Sea Action Plan (BSAP). – Helsinki: Helsinki Commission, 2007. – 56 с. – Режим доступа: https://helcom.fi/media/documents/BSAP_Final.pdf (дата обращения: 08.06.2025).
- 32) Bartnicki J., Valiyaveetil S., Gusev A. Atmospheric supply of nitrogen, lead, cadmium, mercury and dioxins/furans to the Baltic Sea in 2013 // *EMEP/MSW Technical Report*. – 2015. – No. 1/2015. – 50 p.
- 33) Savchuk O.P., Wulff F. Long-term modeling of large-scale nutrient cycles in the entire Baltic Sea // *Hydrobiologia*. – 2009. – Vol. 629. – P. 209–224. – DOI: 10.1007/s10750-009-9774-z.