



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

**Кафедра прикладной океанологии ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

(Магистерская диссертация)

**«КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ БАЛТИЙСКОГО РЕГИОНА:  
АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ»**

**Исполнитель:** Тюлькина Дарья Сергеевна, студентка группы ПО-М18-1-7

**Научный руководитель:** канд. геогр. наук Хаймина Ольга Владимировна

**«К защите допускаю»**

**Заведующий кафедрой**

---

(подпись)

---

(ученая степень, ученое звание)

---

(фамилия, имя, отчество)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Санкт-Петербург

2020

## Оглавление

Лист использованных сокращений .....	3
Введение.....	4
1 Общая характеристика Балтийского моря и особенностей климата.....	6
1.1 Физико-географическая характеристика акватории Балтики.....	6
1.2 Сценарии изменения климата Балтийского региона .....	13
2 Материалы и методы .....	28
2.1 Характеристика исходных данных.....	28
2.2 Методы исследования.....	32
3 Климатические изменения Балтийского региона: анализ результатов математического моделирования .....	36
3.1 Изменчивость интегрального климатического индекса Балтийского моря.....	36
3.2 Оценка изменчивость интегрального климатического индекса по прогностическим данным.....	39
3.3 Оценка трендовых составляющих.....	44
3.4 Сравнение полученных результатов прогноза по различным данным.....	48
3.5 Наиболее вероятный сценарий климатических изменений в Балтике .....	59
Заключение .....	61
Список используемой литературы .....	63

Лист использованных сокращений

ИКЛ	Интегральный климатический индекс
SPBEM	Санкт-Петербургская модель эвтрофикации Балтийского моря
PKM	Региональная климатическая модель
ГКМ	Глобальная климатическая модель
ПМ	Планетарная модель
МГЭИК	Межправительственная группа экспертов по изменению климата
SST	Температуры поверхности моря
RCA4-NEMO	Модель Центра Россби 4 и океаническая модель Европейского моделирования океана
РКП	Оценки изменения концентрации парниковых газов
BSAP	Сценарий плана действий по Балтийскому морю
MITgsm	Модель циркуляции океана Массачусетского технологического института
RCAO	Региональная климатическая модель Центра Россби
ESMAM5/MPI-OM (E-REF)	Модель Института Метеорологии им. Макса Планка в Германии
HadCM3 (H-REF)	Модель Центра Хэдли в Великобритании

## Введение

Балтийское море - это акватория, где сосредоточено значительное количество различных природопользователей, представляющих интересы разных государств. В результате Балтика сталкивается со множеством серьезных проблем, возникающих в результате избыточного поступления в водоем органических и минеральных веществ, закисления и дефицита кислорода в придонных слоях, также серьезное воздействие на водоем оказывают интенсивное землепользование, промышленное производство, бесконтрольный вылов рыбы и транспортная инфраструктура.

Все это происходит на фоне выраженных климатических изменений в регионе. За последние 30 лет температура воды на Балтике в среднем увеличилась на  $1,5^{\circ}\text{C}$ , тогда как во всех остальных морях [1] этот показатель составил на  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

В таких условиях долгосрочный прогноз является актуальной задачей, так как без понимания наиболее вероятной тенденции изменений климата невозможно обоснованно принимать управленческие решения по развитию Балтийского региона.

Объектом исследования в данной работе является акватория Балтийского моря.

Предмет исследования – климатические изменения Балтийского моря за последние десятилетия и в ближайшем будущем.

Цель исследования – определить наиболее вероятную тенденцию изменения климатических условий акватории Балтийского моря, основываясь на анализе изменчивости интегрального климатического индекса по фактическим и модельным данным.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

- 1) проанализировать физико-географические особенности Балтийского

моря и существующие прогнозы климатических изменений данного региона;

- 2) подготовить массивы гидрометеорологических данных с использованием результатов натурных наблюдений и реанализа, а также результатов прогнозирования;
- 3) произвести расчет интегрального климатического индекса (ИКЛ) для фактических с 2010 по 2018 гг. и прогностических данных 1962-2050 гг.;
- 4) проанализировать изменчивость ИКЛ, рассчитанных по фактическим данным и сравнить с результатами прогнозирования различными методами;
- 5) обосновать наиболее вероятный сценарии изменения климата Балтийского моря.

В результате выполненного исследования было проведено сравнение интегральных климатических индексов, рассчитанных по фактическим данным и по результатам моделирования с использованием Санкт-Петербургской модели эвтрофикации Балтийского моря SPBEM с различным форсингом и статистико-вероятностного подхода. Это позволило сформулировать наиболее вероятный вариант климатических изменений в акватории Балтийского моря в ближайшее десятилетие.

Результаты исследования частично были представлены на V Всероссийской научной конференции молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» КИМО-2020 [2].

## 1 Общая характеристика Балтийского моря и особенностей климата

### 1.1 Физико-географическая характеристика акватории Балтики

Балтийское море глубоко врезано в северо-западную часть Евразийского материка и практически со всех сторон окружено сушей, относится к типу внутренних морей. Оно соединяется с Северным морем Атлантического океана только в юго-западной части – через Датские проливы (Зунд, Большой и Малый Бельты) и далее через проливы Каттегат и Скагеррак [3, 4, 5]. Рельеф дна Балтийского моря очень сложен. Обладая небольшими глубинами, оно целиком лежит в пределах материковой отмели средняя глубина составляет 51 м и наибольшая глубина 470 м (58°38' с. ш., 18°14' в. д.). В современных границах Балтийское море имеет площадь 419 тыс. км<sup>2</sup>, объем 21,5 км<sup>3</sup>. Данное море находится в умеренном климатическом поясе, и ему присущ морской климат умеренных широт, но также Балтике свойственны черты континентального климата. Это связано со значительной протяженностью моря с севера на юг и с запада на восток, где появляются различия климатических условий в разных районах моря [6]. Особое влияние на погоду оказывают Исландский минимум, Сибирский и Азорский антициклоны. В холодные месяцы на Балтике, которыми являются январь и февраль температура воздуха в центральной части моря равна -3°C, а температура воды варьируется в диапазоне 0,7-2°C. В летний период температура воздуха меняется от 14 до 20°C, нагрев поверхностного слоя воды происходит неравномерно в разных частях моря и примерно составляет 15-17°C. Из-за низкой солености поверхностных вод моря их плотность также невелика и уменьшается с юга на север [5].

Гидрометеорологический режим Балтийского моря в целом определяется следующими факторами: 1) общая атмосферная циркуляция; 2)

речной сток, непосредственно влияющий на соленость верхнего слоя моря в прибрежных районах; 3) водообмен с Северным морем, влияющий на соленость придонных слоев. При этом два последних режимобразующих фактора в значительной степени зависят от первого – общей циркуляции атмосферы [3].

Балтийское море хорошо стратифицировано, с сезонным циклом температуры, наложенным на более или менее постоянную двухслойную стратификацию солености. В то время как температура и морской лед быстро реагируют на изменения в атмосферных тепловых потоках, изменения солености определяются главным образом процессами смешивания. Холодные воды, образующиеся зимой, простираются до галоклина, который имеет типичную глубину 60-80 м в самой Балтике и несколько меньше в южных бассейнах. Летом, когда в поверхностных водах на глубинах около 15-20 м развивается сезонный термоклин, подстилающий холодный промежуточный слой, как правило, имеет температуры предыдущей зимы. Поэтому установлено, что летняя (июль–август) температура промежуточного холодного слоя хорошо коррелирует с температурой поверхности (вплоть до галоклина) предыдущего марта. Более глубокие воды, расположенные ниже галоклина, образуются главным образом за счет боковых адвекций соленых вод Северного моря, которые захватывают и смешиваются с окружающими водами во время их прохождения в Балтийское море и через него. Повышение температуры воздуха в регионе Балтийского моря приводит к повышению температуры воды [7].

С 1860-х годов наблюдается рекордное потепление Балтийского и Северного морей [8]. Данные изменения заметны особенно в последние десятилетия. Были более ранние теплые периоды в середине-конце 1800-х и в середине 1900-х годов, особенно в 1930-х годах. Однако примерно с 1985 года потепление поверхностных вод наблюдается во всех наборах данных и во все сезоны года. Вероятность экстремально теплых поверхностных вод зимой и летом возросла с 1990-х годов в два-четыре раза.

Соленость и стратификация глубоководных вод, определяется взаимодействием атмосферной циркуляции, адвективного переноса и вертикального перемешивания, тесно связаны с затоками воды Северного моря в Балтику, которые приносят воды с более высокой соленостью в глубокие слои Балтийского моря. За этими крупными затоками часто следует период застоя, в течение которого уменьшается концентрация соли в воде и развивается дефицит кислорода в донных водах. Основной водообмен по вертикали происходит зимой и весной, он приносит относительно холодные и богатые кислородом воды в глубокие бассейны. Сценарное моделирование показывает, что соленость может уменьшиться, и что изменения в солености поверхности могут произойти в районе Датских проливов, особенно в проливе Большой Бельт, а также на северо-востоке Малого Бельта и северо-восточной части Балтийского моря, с наименьшим изменением температуры воды [9].

Состояние морского льда определяется его ледовитостью, толщиной и дрейфом. Среди этих переменных наиболее достоверной измеряемой величиной является ледовитость. В прошлом она определялась визуальными наблюдениями с побережья, судов и самолетов, но с начала спутниковой эры в 1970-х годах возможны точные ежедневные измерения. В Балтийском море регулярные измерения толщины льда проводятся только на ледовых площадках. Измерения, полученные путем бурения, точно представляют различия в толщине льда только прибрежных зон. Дрейф морского льда можно определить с помощью позиционных буев или путем обнаружения смещения морского льда с помощью пар спутниковых изображений, но до сих пор не было проведено никаких исследований, посвященных долгосрочной изменчивости и изменениям в дрейфе морского льда. Помимо этих основных физических переменных, продолжительность ледового сезона и периода сохранения и разрушения ледового покрова также широко используются в качестве климатологических показателей, которые используются для определения тяжести ледового сезона. Ледовый сезон Балтийского моря обычно длится от шести до восьми месяцев [6, 10]. Обычно прибрежные

мелководья Ботнического залива покрываются льдом в октябре-ноябре. На следующем этапе ледовый покров продвигается к центральной части Ботнического моря, а прибрежные районы других суббассейнов Балтийского моря также покрываются льдом. В среднем площадь льдов наибольшая в марте, когда максимальная ледовитость в Балтийском море составляет около 165 000 км<sup>2</sup>, или 40% от общей площади Балтийского моря. Граница льда, как правило, находится в северной части Балтийского моря, что означает, что Ботнический залив, Финский залив и Рижский залив полностью покрыты льдом. В чрезвычайно суровые зимы все Балтийское море покрыто льдом (420 000 км<sup>2</sup>). В самые мягкие зимы морской лед образуется только в Ботническом заливе и Восточном Финском заливе. Минимальная ледовитость на сегодняшний день составляет 49 000 км<sup>2</sup>. Продолжительность ледового периода составляет 130-200 дней в Ботническом заливе, 80-100 дней в Финском заливе и 0-60 дней в южной части Балтийского моря. Вблизи берега морской лед остается неподвижным (припайный лед), а его толщина контролируется только термодинамическими факторами. В этих регионах горизонтальные колебания толщины льда невелики, обычно до 10-20 см на 1 километр. Большая часть данных мониторинга, в частности по толщине льда, была собрана в районах с припайным льдом. Толщина дрейфующего льда значительно более изменчива [5, 7]. В таблице 1 приведены характеристики ледовой обстановки для акватории Финского залива с учетом суровости зим в данном регионе.

Зимы 2008 и 2009 годов были очень мягкими, морской лед формировался только в Ботническом заливе и прибрежных районах Ботнического моря и Финского залива. Площадь покрытия составляла всего 49 000 км<sup>2</sup> в 2008 году и 110 000 км<sup>2</sup> в 2009 году. Зимы 2010 и 2011 годов, с другой стороны, классифицируются как суровые зимы, и площади акватории, занятой льдом, составляли соответственно больше: 244 000 км<sup>2</sup> (2010 год) и 309 000 км<sup>2</sup> (2011 год). Что еще более важно, сильные штормы вызвали сжатия льда, что представляет серьезные трудности для зимней навигации. В прошлом также

были аналогичные относительно короткие периоды с обоими типами экстремальных ледовых условий, такими как 1873-1876, 1938–1941 и 1985-1990 годы [7, 11].

Таблица 1. Преобладающие характеристики ледовой обстановки на трассе устье Финского залива (22°20' в.д.) – Санкт-Петербург в феврале [7]

Район моря	22°20' в.д. – Таллинн	Таллинн – о. Гогланд	о. Гогланд – м. Стирсудден	м. Стирсудден – о. Котлин	о. Котлин – С-Петербург
<i>Мягкая зима</i>					
Толщина припая, см	0	0	0	0	25-35
Сплоченность дрейфующего льда, баллы	0	0	7-10	9-10	0
Возрастная характеристика дрейфующего льда	чисто	чисто	серо-белый, серый	серо-белый, серый	0
<i>Умеренная зима</i>					
Толщина припая, см	0	0	0	45-55	50-60
Сплоченность дрейфующего льда, баллы	6-8	8-10	10	0	0
Возрастная характеристика дрейфующего льда	начальные виды	серо-белый	тонкий однолетний (до 40 см), серо-белый	0	0
<i>Суровая зима</i>					
Толщина припая, см	0	0	0	50-60	55-65
Сплоченность дрейфующего льда, баллы	9-10	9-10	10	0	0
Возрастная характеристика дрейфующего льда	серо-белый	серо-белый	тонкий однолетний (до 45 см), серо-белый	0	0
<i>Самая суровая зима</i>					
Толщина припая, см	0	40-50 (до о. Вайндло)	55-65	65-75	70-90
Сплоченность дрейфующего льда, баллы	9-10	0	0	0	0
Возрастная характеристика дрейфующего льда	тонкий однолетний (до 50 см), серо-белый	чисто	0	0	0

На большей части акватории Балтийского моря толщина льда достигает 5-20 см, но в особо холодные и продолжительные зимы толщина льда в некоторых районах достигает 50 см. С 1971 года максимальная толщина льда составляет около 50 см на южном побережье Балтийского моря и до 30 см в районе моря к северу от Рюгена [11].

В настоящее время оценка ледовой обстановки в Балтийском море играет ключевую роль в формировании дальнейших прогнозов климатических изменений. Существуют региональные, обзорные, циркумполярные ледовые

карты. По современным картам ледовой обстановки [12] можно отследить площадь уменьшения льда, его перемещение в акватории Балтийского моря.

Балтика - море, практически не имеющее приливов, и поэтому формирование поверхностных течений происходит под влиянием речного стока и ветра. Колебание уровня составляет 10-20 см [6]. Перераспределение вод внутри моря между его районами влияет на внутригодовое изменение уровня Балтийского моря. Нева, Висла, Неман и Даугава основные реки Балтийского региона, которые приносят наибольшее количество воды в море, поступающее в большинстве случаев в восточных районах. Циклонический характер циркуляции поверхностных вод моря присущ региону Балтики, в северной части моря формируется постоянное течение из-за слияния вод Ботнического и Финского заливов, на юге течение имеет восточное направление. Постоянные течения Балтийского моря имеют небольшую скорость, которая равна 3-4 см/с, но не часто происходит увеличение скорости до 10-15 см/с [4, 5]. Преобладающие ветровые (дрейфовые) течения интенсивны осенью и зимой, также во время сильных штормов. Ветер определяет направление дрейфовых течений. Волны Балтийского моря не превышают высоты в 2 м, волны высотой до 6 м наблюдаются крайне редко [13]. Для качественной оценки волнения район Балтийского моря разделен на 8 секторов, которые отмечены на рисунке 1.1.

Ветровое волнение наиболее интенсивно отмечается осенью и зимой в открытых глубоких районах моря при наличии юго-западных ветров. В ноябре наблюдаются крупные волны, которым при более сильных ветрах зимой мешает лед.

В открытых районах моря сгонно-нагонные колебания уровня достигают значительных величин и бывают от 0.5 -2.0 м. Зыбь наблюдается редко в различных направлениях. Так как Балтика имеет слабый водообмен с океаном и у нее значительный материковый сток, все это сказывается на ее гидрохимических условиях. В ионном составе воды наблюдается незначительное повышение относительного содержания ионов кальция и

понижение концентрации ионов натрия. Количество растворенного кислорода подвержено сезонным колебаниям, как и все моря умеренного пояса.

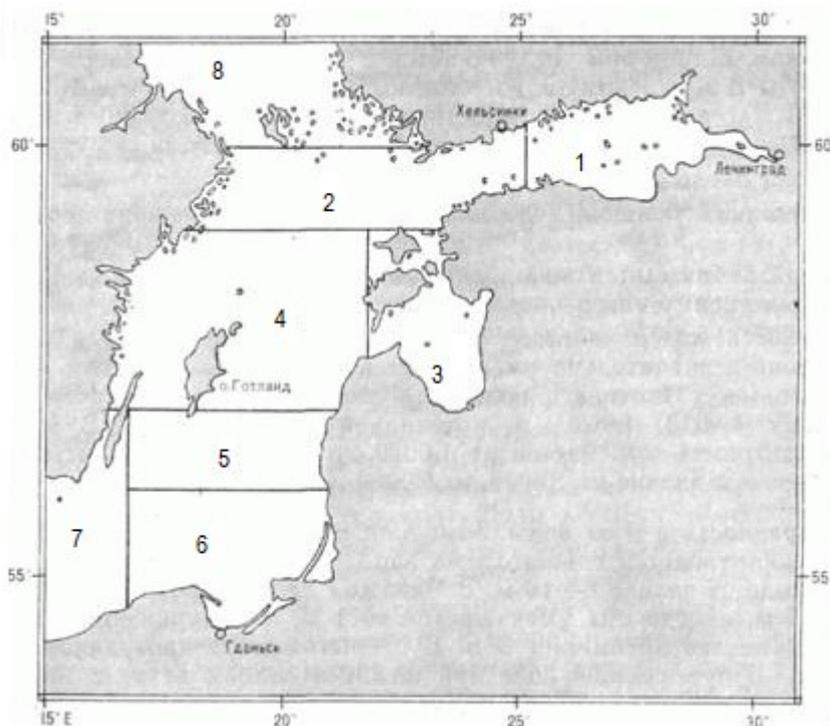


Рисунок 1.1. Схема районирования Балтийского моря по режиму волнения [13]

Весной наблюдается максимальное содержание кислорода в поверхностном слое из-за деятельности фитопланктона. Уменьшение содержания кислорода происходит летом в связи с повышением температуры воды. Вертикальное распределение кислорода в воде характеризуется высоким его содержанием на поверхности моря и до горизонта 70 м, далее происходит резкое уменьшение кислорода. В верхних слоях моря происходит постоянное потребление фосфатов и их медленное возвращение на поверхность из глубин. Основной вынос фосфатов реками происходит в приустьевых районах. Изменение содержания нитратов и нитритов в воде происходит сезонно и по всей акватории моря. Балтийское море богато силикатами из-за большого количества в материковом стоке соединений кремния [3].

Балтийское море разнообразно по составу флоры и фауны. Современное население сложилось в послеледниковый период и разнородно по своему составу. Наблюдается сезонные смены в качественном составе планктона,

весенняя вспышка диатомового фитопланктона обусловлена накоплением в верхних слоях моря питательных веществ. Из животных массово развиваются в конце лета некоторые виды инфузорий, коловраток. Балтийское море не богато видами рыбного населения. Здесь обитают представители сиговых, салака, корюшка, треска, камбала в южной и восточной частях моря. Также производится добыча водорослей и зарождение практики марикультуры. Весь регион Балтийского моря имеет все необходимое для разностороннего хозяйственного использования [5].

Балтийский регион является местом интенсивного судоходства, влияющего на экономические связи между государствами. На данный момент Балтийское море хорошо изучено, но есть нерешенные проблемы, связанные с прогнозированием дальнейших, в том числе климатических, изменений в акватории Балтийского моря [1, 4, 14].

## 1.2 Сценарии изменения климата Балтийского региона

С середины восьмидесятых годов все более активно обсуждается вопрос о том, является ли наблюдаемое сейчас потепление климата результатом воздействия человека и неизбежность потепления представляет собой линейный тренд с далеко идущими последствиями или это проявление циклических колебаний, присущих климату Земли на протяжении всей ее геологической истории. Наиболее актуален ответ на этот вопрос для высокоширотных регионов, где по прогнозам полагают, что потепление обусловлено главным образом ростом положительной части теплового баланса Земли из-за увеличения в атмосфере концентрации парниковых газов вследствие промышленных выбросов [15].

Для устойчивого развития региона Балтийского моря необходимо понимать, как в дальнейшем будут меняться климатические события и то, как они повлияют на эту ситуацию. На данный момент существует большое

количество обобщенных материалов по оценке климатической изменчивости Балтики [8, 14, 15], а также отдельные работы исследователей, которые занимаются изучением данного региона. [16 – 20].

В этой работе мы сосредоточимся на различных сценариях прогноза Балтийского моря, которое представляет собой полузамкнутое море с большим водосбором, расположенным в Северной Европе. Регион Балтийского моря делится на два субрегиона. Для севера характерны обширные леса, низкая плотность населения, преимущественно скалистые берега и субарктический зимний климат. С другой стороны, юг характеризуется сельскохозяйственными угодьями, высокой плотностью населения, преимущественно песчаными побережьями и умеренным зимним климатом. В водосборной зоне Балтийского моря проживает около 90 миллионов человек, что оказывает значительное воздействие на морскую среду. Усиленная речная нагрузка питательных веществ из сельского хозяйства и очистных сооружений сточных вод с 1940/50-х годов вызвала крупнейшие в мире антропогенные индуцированные гипоксические донные отложения. Помимо давления на окружающую среду, Балтийское море подвержено глобальному потеплению больше, чем другие прибрежные моря, возможно, из-за его близости к Арктике, гидродинамических особенностей и географического расположения [8]. В 1982-2006 годах Балтийское море прогрелось больше, чем любая другая крупная морская экосистема [21].

Переходя к рассмотрению существующих прогнозов для Балтийского моря, необходимо отметить, что они могут быть построены на основе экспертного анализа, а значит, будут грубы по своим результатам, также могут основываться на статистико-вероятностных данных и на численном моделировании.

Региональные прогнозы будущего климата, основанные на динамическом уменьшении масштаба результатов глобальных моделей с использованием региональных климатических моделей (RCMs- Regional

Climate Models или РКМ), обладают рядом значительных недостатков, вызванных:

1. недостатками глобальных и региональных климатических моделей,
2. неизвестными будущими концентрациями парниковых газов,
3. естественной изменчивостью,
4. экспериментальным проектированием.

Глобальные климатические модели основаны на моделях общей циркуляции (GCMs-General Circulation Model или ГКМ) или даже планетарных моделях (ESMs – Earth System Model или ПМ) и являются полезными инструментами для решения проблемы изменчивости климата в глобальном масштабе. Однако они все еще имеют значительные недостатки в региональном масштабе, в частности, потому, что их горизонтальные сетки слишком грубы и не обладают детальным пространственным разрешением для учета мелкомасштабных процессов, которые могут иметь важное значение для регионального климата. Для преодоления ограничений глобальных климатических моделей и для региональных климатических исследований были разработаны ограниченные по площади РКМ с высоким разрешением для интересующего региона, основанные на граничных данных из ГКМ или ПМ. С их помощью было проведено сценарное моделирование для изучения воздействия изменения климата и разработки стратегий адаптации к изменению климата для отдельных регионов.

Основанные на моделях прогнозы изменения климата для Балтийского моря являются редкими по сравнению с исследованиями для атмосферы. Первая оценка изменения климата в районе Балтийского моря [15] утверждала, что среднегодовые температуры изменятся на 2-4 °С к концу XXI века, ледовитость в море уменьшится примерно на 50-80 %. Средняя соленость Балтийского моря, по прогнозам, снизится на 8-50 %. Однако следует отметить, что эти выводы основаны лишь на четырех региональных сценарных симуляциях с использованием двух сценариев выбросов углерода и двух

глобальных моделей. К 2008 году имелись результаты расчетов, основанные на более широком ансамбле из 16 моделей для прогнозирования солёности Балтийского моря к концу этого столетия.

Со времени проведения первой оценки изменения климата в бассейне Балтийского моря [15] число соответствующих сценариев моделирования значительно возросло. В частности, в 2009-2011 гг. в рамках проекта ECOSUPPORT было проведено большое количество сценарных симуляций [22].

Новые модели по сравнению с первой оценкой ВАСС характеризуются следующими элементами:

- горизонтальное разрешение компонентов модели атмосферы и океана увеличилось (менее 25 км для атмосферы и 3,6 км для океана);
- результаты и предположения четвертого доклада об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, 2007 год) были использованы вместо результатов и предположений, содержащихся в третьем докладе МГЭИК об оценке (МГЭИК, 2001 год);
- многомодельное ансамблевое моделирование, построенное на большом количестве исходных моделей, использовалось для снижения вероятности ошибки, вызванных численными неточностями модели Балтийского моря.

На основании выполненных модельных расчетов были выявлены основные закономерности, которые предполагаются в развитии климатических обстановки. Существующие различия внутри региона говорят о том, что развитие климатических условий, не смотря на общие закономерности, носит локальные особенности для каждого из выделенных регионов Балтийского моря (рисунок 1.1). Наибольшие изменения прогнозируются в Ботническом заливе и Ботническом море летом и в Финском заливе – весной. По данным расчетов летние температуры могут увеличиться примерно на 2°C и 4 °C в Южной и северной частях Балтийского моря соответственно. Градиент поверхностной температуры воды между южной и северной частями моря вызван, по крайней мере частично, обратной связью «лед-альбедо», которая

увеличивает изменения температуры в северной части Балтийского моря. Прогнозируемое изменение среднегодовой температуры воды на шести станциях мониторинга составит 2 -3 °С (поверхностные слои воды) и 0-2 °С (глубоководные слои). [23]

Важной чертой использованных моделей является сохранение в проливе Каттегат температуры воды в глубоководных районах неизменной, как результат задания граничных условий (вертикальные профили температуры воды и солёности на боковых границах в Каттегате или Скагерраке (в зависимости от используемой модели) не меняются с течением времени). Однако эксперименты показали, что искусственная фиксация граничных данных в целом не влияет на ситуацию в Балтийском море. Это объясняется тем, что в модели даже во время крупных затоков в Балтику объем поступающих североморских вод меньше, чем в поверхностном слое Каттегата. Во всех суббассейнах поверхностный слой, по прогнозам, прогреется больше, чем глубоководный. Хотя этот возрастающий градиент температуры может привести к увеличению вертикальной стратификации, но прогнозируемое изменение солёности более значительно повлияет на плотность воды, чем прогнозируемое изменение температуры. Таким образом, результаты моделирования позволили предположить, что вертикальная стратификация между поверхностными и глубоководными слоями фактически уменьшится.

Прогнозируется, что сезонные изменения солёности поверхностных вод будут минимальными. Прогнозируемые изменения солёности обусловлены изменениями речного стока, который по расчетам увеличится на 15-22 %. Еще одно возможное последствие изменения климата (по результатам моделирования) – увеличение среднемесячных значений скорости ветра почти на 30% для февраля [15], что может оказывать существенное влияние на водообмен с Северным морем. Однако проблема прогнозирования затоков североморских вод — это отдельная задача, которая остается актуальной. Данная проблема лежит в основе долгосрочного прогнозирования, так как

имеет большой вклад для развития экосистем. [3, 24, 25]

Сокращение морского ледового покрова в будущем зависит главным образом от прогнозируемого изменения температуры воздуха над Балтийским морем зимой; другие факторы, такие как ветер, считаются менее важными. Как результаты гидродинамического моделирования, так и статистического моделирования показывают, что зависимость между годовой максимальной ледовитостью и средними зимними изменениями температуры воздуха является нелинейной, то есть даже при более теплом климате будущего морской лед, с высокой вероятностью, будет сохраняться только в северной части Балтийского моря. В целом все варианты климатических расчетов указывают на значительно более мягкие ледовые условия для Балтийского моря в будущем. При этом ожидается значительное уменьшение ледовитости по сравнению с первой оценкой ВАСС. [9].

Начиная с 2000 года, в рамках стратегии устойчивого развития Балтийского региона целях более эффективной защиты морской среды были составлены прогностические оценки развития экосистемы Балтийского моря. Для оценки изменчивости абиотических характеристик морской среды и их влияния на экосистему были созданы мини-ансамбли моделей, воспроизводивших климатические изменения Балтики от настоящего до будущего. Расчеты выполнялись при задании характера атмосферных процессов из двух глобальных климатических моделей, а также с учетом оценок выбросов парников также по двум сценариям. Кроме того, были использованы три различные модели экосистемы Балтийского моря. При использовании региональной модели атмосферы, прогнозируемые температуры поверхности моря (SST) задавались на основании оценок поверхностной температуре воды из ГКМ, которые не учитывают региональные особенности Балтийского моря. Это сказывается на точности прогноза и не позволяет однозначно трактовать полученные результаты. Поэтому необходимо продолжать исследования в этом направлении.

При оценке репрезентативности результатов климатических моделей

необходимо учитывать возможные ошибки из-за неточности задания концентраций парниковых газов, нагрузки биогенными веществами и различными сценариями повышения уровня моря. Крайне нелинейная динамика экосистемы Балтийского моря контролируется поступлением биогенов с суши и из атмосферы, температурой воды, соленостью, освещенностью, глубиной перемешанного слоя, состоянием морского льда (только в северной части Балтийского моря), затоками соленой воды (только в самой Балтике и Финском заливе). Следовательно, все неопределенности в сценарном моделировании температуры воздуха, осадков, скорости ветра, облачности, характера атмосферной циркуляции и речного стока будут оказывать влияние на прогнозируемые изменения в биогеохимических циклах [8]. Например, более высокие температуры воды могут увеличить продукцию и реминерализацию органического материала (т. е. могут интенсифицировать внутренний круговорот биогенных веществ) и уменьшить потоки кислорода на границе раздела вода-воздух. Кроме того, повышенный речной сток может увеличивать объем привносимых биогенных веществ, что, в сочетании с меньшей глубиной верхнего квазиоднородного слоя, может существенно изменить характер цветения фитопланктона. Например, в северной части Балтийского моря сокращение морского ледового покрова приведет к более раннему наступлению и прекращению весеннего цветения из-за улучшения условий освещения.

Частота затоков соленой воды может незначительно увеличиваться из-за изменения крупномасштабной атмосферной циркуляции. С одной стороны, общее повышение уровня Мирового океана может увеличить перенос соли в Балтийское море, усиливая стратификацию, снижение глубоководной вентиляции и расширение гипоксии в самой Балтике. Поскольку Балтийское море мелководно со средней глубиной всего 52 м, обмен биогенными веществами между донными отложениями, водной толщей и взвешенной органикой является важным компонентом биогеохимического круговорота. С другой стороны, в районах с уменьшенным морским ледовым покровом

зимнее перемешивание может увеличиться, а кислородные условия в нижних слоях могут улучшиться. Усиление ветро-волнового перемешивания может привести к увеличению поступления биогенных веществ из продуктивной прибрежной зоны в более глубокие районы. [8].

Поскольку выше изложенные физические факторы меняются и оказывают влияние на состояние экосистемы, то была проведена серия сценарных расчетов с использованием связанной физико-биогеохимической модели Балтийского моря. Модель Балтийского моря была основана на регионализированных данных ГКМ с использованием динамического подхода к уменьшению масштаба. При таком подходе данные атмосферного воздействия рассчитывались с использованием РКМ с данными ГКМ на боковых границах. Полученные в результате атмосферные поля (поле ветра на уровне 10 м, температурой воздуха и удельной влажностью на уровне 2 м, а также осадки, общая облачность и давлением на уровне моря) были затем применены для расчетов климатических изменений в акватории Балтийского моря и на территории его водосборного бассейна. Поскольку биогенная нагрузка зависит не только от естественных абиотических факторов среды, но и от землепользования, сельскохозяйственной практики и очистки сточных вод, все сценарные расчеты проводились в рамках различных социально-экономических сценариев. Модель Балтийского моря в данном исследовании трехмерная, модель циркуляции океана используется при моделировании климата за период 1975-2098 годов. Расчетная область охватывает Балтийское море с открытой границей в Северном Каттегате.

Для подтверждения выше представленных прогностических оценок развития экосистемы Балтийского моря было проведено исследование с использованием модели RCA4-NEMO.

Модель RCA4-NEMO для акватории Балтийского моря была сформулирована на основе атмосферной модели Центра Россби 4 и океанической модели Европейского моделирования моделей океана (RCA4-NEMO - Rossby Center Atmosphere model version 4 - Nucleus for European

Modeling of the Ocean). Данные о боковых границах были получены на основании моделирования четырех глобальных климатических моделей.

RCA4-NEMO - это региональная связанная модель климата атмосфера-океан для акватории Балтийского и Северного морей, что позволяет получить более реалистичное представление об изменении климата. Набор ГКМ, используемых в данном исследовании, включает в себя: - Планетарную модель Института Макса Планка с низким разрешением, - Планетарную модель Европейских Стран, - Климатическая Модель Института Пьера Симона Лапласа со средним разрешением и - Глобальную модель окружающей среды центра Хэдли.

RCPs (Representative Concentration Pathway или РКП) - это оценки изменения концентрации парниковых газов, принятые Межправительственной группой экспертов по изменению климата [15] для ее пятого оценочного доклада (AR5) в 2013 году.

Климатические прогнозы для Балтийского моря осуществляются в соответствии с тремя сценариями нагрузки биогенными веществами, описанными ниже, охватывающими целый ряд вероятных будущих социально-экономических условий: от наиболее оптимистичного до наихудшего сценария. В течение исторического периода (1976-2005 гг.) используются наблюдаемые биогенные нагрузки из Балтийской экологической базы данных (BED - Baltic Environmental Database).

А. Сценарий плана действий по Балтийскому морю (BSAP - Baltic Sea Action Plan) (HELCOM, 2013). В этом сценарии поступление биогенных веществ из рек и с атмосферными осадками в различных суббассейнах задавалось линейное снижение после 2012 года по сравнению со значениями за 2010-2012 годы [26] до максимально допустимого уровня, определяемого планом действий по Балтийскому морю до 2020 года. После 2020 года нагрузка биогенными веществами будет оставаться постоянной до 2098 года.

Б. Эталонный сценарий. В этом сценарии используются прогнозы E-NYPE

для будущих нагрузок биогенными веществами (2006-2098 гг.) в рамках двух различных сценариев концентрации парниковых газов, предполагающих отсутствие социально-экономических изменений по сравнению с историческим периодом (1976-2005 гг.). Таким образом, например, использование земли и удобрений, свойств почвы и очистки сточных вод в каждом суббассейне считаются неизменными с течением времени. Содержание в атмосферных осадках также считается постоянным во времени. Рассматриваются только последствия изменения климата для температуры воздуха и осадков в водосборной зоне Балтийского моря.

В. Наихудший сценарий развития событий. В этом сценарии социально-экономический фактор воздействия, соответствующий наихудшему варианту, накладывается на будущие нагрузки биогенными веществами, которые рассчитаны с помощью E-NUTRE в рамках сценариев РКМ (2006-2098). Изменения в нагрузках азотом и фосфором были рассчитаны на основе региональных допущений (в отношении роста численности населения, изменений в сельскохозяйственной практике, таких как использование земель и удобрений, а также расширение очистных сооружений сточных вод) с учетом глобальных тенденций [8].

Во всех трех сценариях нагрузка биогенными веществами в Балтийском море будет снижаться в результате принятых мер по сокращению данной нагрузки, начавшихся в 1980-х годах. Однако в худшем случае эти нагрузки близки к средним наблюдаемым нагрузкам за период 1976-2005 годов. Ежемесячные и долгосрочные изменения в эталонном и наихудшем сценариях следуют за изменениями речного стока, вызванными изменением климата. Только сценарий Плана действия предполагает, что изменение климата не противодействует стратегиям снижения нагрузки биогенных веществ. Согласно полученным результатам по ансамблю моделей, температура воды будет увеличиваться со временем как прямое следствие увеличения

температуры воздуха, прогнозируемого ГКМ.

В связи с прогнозируемым повышением речного стока соленость снижается во всех сценарных расчетах в конце этого века. Наибольшее снижение солености примерно на 1,5 ‰ в будущем по сравнению с историческим периодом наблюдается в прогнозах по модели Института Пьера Симона Лапласа со средним разрешением. В отличие от этого, Планетарная модель Европейских Стран показывает сначала небольшое увеличение солености примерно до 2030 года. Во второй половине 21-го века соленость снижается. Таким образом, диапазон изменения солености велик, и, следовательно, неточность в прогнозах солености существенна и превышает аналогичную для прогнозов температуры воды. В случае эталонного сценария модель прогнозирует, что ансамблевое среднее значение годовых концентраций биогенных веществ, усредненных по всему Балтийскому морю, изменится (между 1976-2005 и 2069-2098 годами) по сценарию РКП примерно на -62% для аммония, +10% для нитрата и -24% для фосфата. Снижение концентрации фосфатов приводит к снижению первичной продукции (-13%) и азотфиксации (-20%). Средняя концентрация кислорода, по прогнозам, немного снизится примерно на -1%, вероятно, из-за повышения температуры воды. В расчетах с учетом Плана действий по Балтийскому морю ожидается еще большее снижение биогенной нагрузки, что приведет к значительному сокращению первичной продуктивности (-44%), азотфиксации (-96%) и площади гипоксии (-32%).

В соответствии с тремя сценариями нагрузки биогенными веществами в Балтийском море, которые были описаны ранее, был проведен ансамбль из 21 сценарного моделирования, основанного на четырех различных РКМ и двух экспериментах по чувствительности к повышению уровня моря, путем объединения различных будущих климатических сценариев и прогнозов нагрузки биогенными веществами на XXI век. По сравнению с более ранними исследованиями для Балтийского моря, новыми особенностями этого исследования являются:

1. моделирование за период 1850-2098 гг.;
2. использование четырех глобальных климатических моделей с целью оценки влияния неопределенностей климатической модели на изменчивость Балтийского моря;
3. два сценария концентрации парниковых газов, соответствующие РКП;
4. усовершенствованная версия физико-биогеохимической модели Балтийского моря.

Существенная неточность в будущих прогнозах для экосистемы Балтийского моря вызвана существенным разбросом результатов моделирования изменчивости термохалийных процессов, обусловленных погрешностями в прогнозируемом речном стоке и повышении уровня Мирового океана. Неточность в прогнозе солености и, соответственно, характере стратификации влияет на биогеохимические циклы и формирования гипоксических зон. Однако определяющим фактором для изменений экосистемы Балтийского моря являлся характер поступления биогенных веществ в результате хозяйственной деятельности. Таким образом, будущие прогнозы экосистемы Балтийского моря требуют наличия многомодельных ансамблей региональных и глобальных климатических моделей, позволяющих адекватно оценивать возможные изменения. [8]

Из модельных результатов исследования с использованием модели RCA4-NEMO можно сделать вывод о том, что:

1. реализация Плана действий приведет к значительному улучшению состояния экосистемы Балтийского моря независимо от результатов расчета ГKM, поскольку изменение климата не будет противодействовать снижению биогенной нагрузки;
2. основной движущей силой эвтрофикации являются внешние биогенные нагрузки. Изменение климата (главным образом потепление и повышение уровня моря) может усилить эвтрофикацию. Изменения первичной продуктивности и азотфиксации, а также глубоководных кислородных условий при различных климатических сценариях в

большой степени зависят от характера поступления биогенных веществ. В случае высокой (низкой) нагрузки биогенными веществами воздействие изменяющегося климата будет значительным (незначительным). Однако воздействие изменения климата в пределах рассматриваемых сценариев концентрации парниковых газов (РКП) на биогеохимические циклы будет меньше, чем воздействие рассматриваемых изменений биогенной нагрузки (план действий, эталонный, наихудший случай).

В результате моделирования на основе различных сценариев можно выделить основные ожидаемые изменения в экосистеме и во всем регионе Балтийского моря, вызванные климатическими изменениями, а именно ожидается:

1. среднегодовые температуры изменятся на 2-4 °С к концу XXI века;
2. ледовитость моря уменьшится примерно на 50-80 %;
3. средняя соленость снизится на 8-50 %;
4. сокращение морского ледового покрова приведет к более раннему наступлению и прекращению весеннего цветения из-за улучшения условий освещения;
5. в районах с уменьшенным морским ледовым покровом зимнее перемешивание может увеличиться, а кислородные условия в нижних слоях могут улучшиться;
6. Усиление ветро-волнового перемешивания может привести к увеличению поступления биогенных веществ из продуктивной прибрежной зоны в более глубокие районы.

В сравнении с ожидаемыми результатами сценарных расчетов в отчете Международной комиссии по климатическим изменениям ООН отмечено присутствие так называемого глобального потепления, которое сильно отражается на ледовой обстановке во всем мире, а также на суровости зим в северо-западных регионах России. По результатам сравнения ледовой

обстановки было выявлено, что в 50-е годы прошлого столетия преобладали положительные аномалии максимальной за сезон ледовитости, которые отражали тяжелые ледовые условия, в отличие от текущего столетия, где отмечено значительное сокращение льда наряду с аномальным повышением температуры воздуха в холодные месяцы [16].

По результатам оценочного доклада Росгидромета температура моря будет повышаться ближайшие 70 лет, что приведет к уменьшению площади морского льда. Отмечена межгодовая существенная изменчивость в грациях ледовитости, которая приводит к уменьшению затрат, связанных с судоходством и портовой деятельностью. Также изменение климатической обстановки повлияло на рыболовство и биоресурсы, а именно изменение среды обитания и увеличение кормовой базы для промысловых рыб [17]. Изменение климата уже оказало влияние на некоторые аспекты экосистемы Балтийского моря. Четко прослеживается тенденция к потеплению в поверхностных водах моря. Данные дистанционного зондирования свидетельствуют о том, что среднегодовая температура поверхности моря повысилась на 1°C за десятилетие, причем наибольший рост наблюдался в северной части Ботнического залива и значительный рост - в Финском заливе, Рижском заливе и северной части центральной Балтики [14].

Как было указано выше, несмотря на изученность процессов, протекающих в акватории Балтийского моря, в результатах численного моделирования наблюдается значительный разброс ожидаемых климатических изменений из-за использования различных данных об атмосферных процессах, речном стоке, уровне моря и т.д. Однако для прогнозов, опубликованных в первом десятилетии XXI века уже можно получить оценки их качества, основываясь на имеющейся фактической информации последнего десятилетия. Это может помочь в выборе наиболее вероятного сценария развития климата данного моря. Учитывая пространственные и временные масштабы, целесообразно при сравнении результатов натуральных наблюдений и модельных расчетов использовать обобщенные (интегральные) показатели,

например, интегральный климатический индекс. Это позволит проследить согласованность основных тенденций изменения климата, наблюдающихся фактически и ожидавшихся по прогнозу.

## 2 Материалы и методы

### 2.1 Характеристика исходных данных

Для мониторинга климатических изменений используются как продолжительные временные ряды измеряемых гидрометеорологических величин, так и различные индексы, учитывающие изменчивость климатообразующих факторов. Например, для анализа колебаний климата в районе Баренцева моря В.Д. Бойцовым был предложен среднегодовой интегральный климатический индекс (ИКЛ), который учитывает суммарную изменчивость тепловых климатообразующих факторов, какими являются температуры воздуха и воды, а также ледовитость моря [27].

В 2012 году были опубликованы результаты анализа изменчивости ИКЛ для Балтийского моря и прогноз трендовой составляющей ряда значений ИКЛ до 2020 года [28].

Оценка возможных изменений климата Балтики была опубликована в 2017 году по результатам численного моделирования, выполненного коллективом авторов [18] на базе Санкт-Петербургской модели эвтрофикации Балтийского моря SPBEM. Модель SPBEM представляет собой совместную трехмерную эко-гидродинамическую модель, имеющую модульную структуру. Результаты моделирования, начиная с 2008 года, представляли собой прогностические значения.

В качестве исходных гидрометеорологических данных для выполнения данного исследования использовались временные ряды следующих характеристик за период с 2000 года по 2018 год:

– среднемесячные значения температуры воздуха в Балтийском регионе (Хапаранда, Санкт-Петербург, Калининград),

– среднемесячные значения температуры поверхности воды (ТПО) в сетке  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  акватории Балтийского моря (12 узлов) [28, 29],

– максимальная за зимний период ледовитость Балтийского моря, выраженная в % площади занятой льдом.

Полученные среднемесячные исходные данные были обработаны и осреднены до среднегодовых значений температуры воздуха и воды. Для дальнейшего исследования все ряды нормировались на средние значения за период 1900-2009 годы, аналогично работе [28], что позволило сформировать непрерывные временные ряды за период с 1900 по 2018 годы. Схемы расположения использованных узловых точек архива NOAA NCDC ERSST version 5 и гидрометеорологических станций представлены на рисунке 2.1.

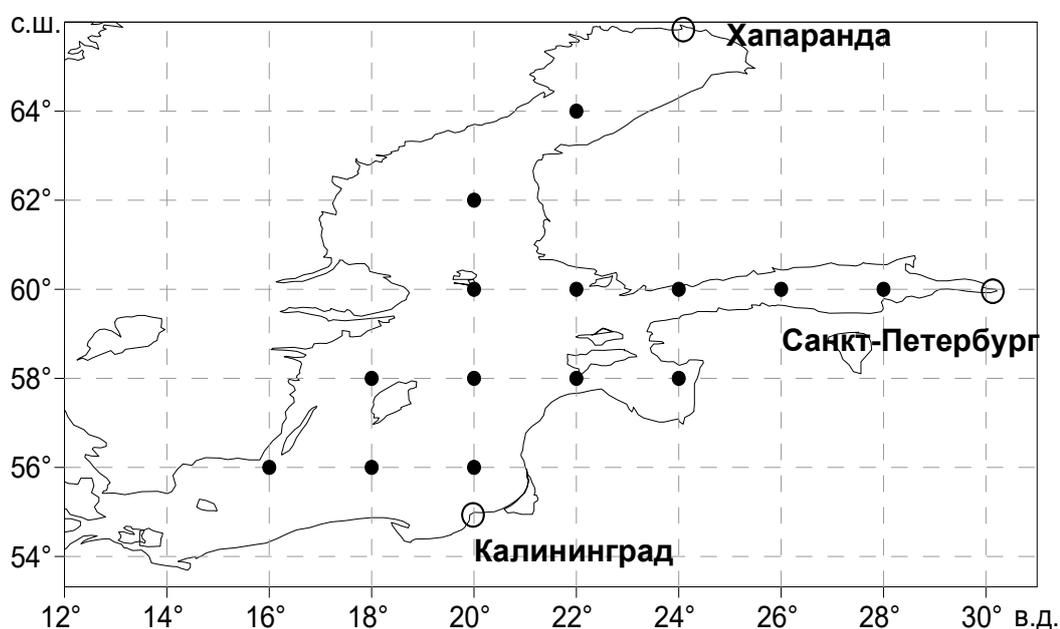


Рисунок 2.1. Схема расположения узловых точек архива NOAA NCDC ERSST version5 (●) и гидрометеорологических станций (○) в акватории Балтийского моря.[28]

Данные натуральных наблюдений и реанализа были дополнены результатами моделирования, выполненного на основе Санкт-Петербургской модели эвтрофикации Балтийского моря SPBEM-2 с 1962 по 2050 года [18, 31] а также результатами статистико-вероятностного прогнозирования тенденции

изменения интегральных климатических индексов, выполненного Хайминой О.В. с соавторами [28].

Модели SPBEM-2 представляет собой трехмерную сопряженную экогидродинамическую модель с модульной структурой. Современный гидродинамический модуль основан на модели циркуляции океана Массачусетского технологического института (MITgcm) в гидростатическом приближении. [32, 33].

Для определения начальных и граничных условий в модели было проведено сравнение полученных результатов с натурными данными, которые были взяты из международной базы данных международного проекта "Год Финского залива-2014" [26]. Результаты верификации опубликованы в работе [34]. Область моделирования охватывает Финский залив от самой восточной части Невской губы до открытой жидкой границы по долготе 24.08°Е. Горизонтальное разрешение сферической сетки - 2 мили как по меридиану, так и по параллели. Вертикальное разрешение составляет 3 метра. Начальные распределения температуры, солености и биогеохимических переменных были сформированы путем интерполяции в ячейки расчетной области полевых наблюдений, проведенных в зимние месяцы 2002-2012 гг.

Поля атмосферного давления, компоненты скорости ветра, температура, влажность, осадки, а также коротковолновое и длинноволновое входящее излучение были заданы из промежуточных полей реанализа ERA, среднемесячные значения речного стока и поступление биогенных веществ с суши были взяты из Балтийской экологической базы данных Стокгольмского университета [35] и последней компиляции нагрузки HELCOM [36]. Моделирование было выполнено в 2009-2014 гг. с использованием численных значений параметров, заимствованных из [37], без какой-либо калибровки.

Результаты моделирования были представлены для двух различных сценариев атмосферных процессов. Облачность, скорость ветра, осадки, относительная влажность воздуха в приводном слое атмосферы и температура задавались на основе расчетов по региональной климатической модели Центра

Россби Шведского метеорологического и гидрологического института RCO (Rossby Centre Atmosphere Ocean model), где на боковых границах были использованы результаты восстановления атмосферных характеристик на основе двух глобальных моделей климата: ECHAM5/MPI-OM Института Метеорологии им. Макса Планка в Германии и HadCM3 Центра Хэдли в Великобритании. Также был задан сценарий эмиссии парниковых газов [15], предполагающий быстрый экономический рост с использованием различных источников энергии.

Таким образом, были получены данные по модели SPBEM для двух сценариев изменения климата, которые в дальнейшем изложении будут называться E-REF и H-REF.

Такая формулировка модели и задание начальных и граничных условий позволяют ожидать близость прогностических оценок изменения климата к фактически наблюдаемым.

Исходными данными из модели SPBEM для выполнения исследований являлись временные ряды следующих характеристик за период с 1962 года по 2050 год с различными сценариями изменения климата с заданными метеорологическими воздействиями:

- среднемесячные значения температуры воздуха в Балтийском регионе в градусах Кельвина для различных высот над уровнем моря (Хапаранда, Санкт-Петербург, Калининград),
- среднемесячные значения температуры поверхности воды (ТПО) в точках в сетке  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  акватории Балтийского моря (30 узлов),
- максимальная за зимний период ледовитость Балтийского моря, выраженная в % площади занятой льдом.

На основе исходных модельных данных были получены временные ряды среднегодовых значения температур воды и воздуха, а также максимальной ледовитости. Для дальнейшего определения модельных оценок ИКЛ все ряды нормировались на средние значения за период 1900-2009 годы, аналогично работе [27, 28].

## 2.2 Методы исследования

Как уже было отмечено выше, для мониторинга климатических изменений используются как продолжительные временные ряды измеряемых гидрометеорологических элементов, так и различные индексы, учитывающие изменчивость климатообразующих факторов такие, например, как: числа Вольфа, продолжительность земных суток; индексы, отражающие развитие аномалий характеристик циркуляции в атмосфере и другие.

Помимо индексов, характеризующих развитие процессов на Земле планетарного и полушарного масштабов, используются различные региональные индексы. Так для анализа изменений климата в районе балтийского моря в данной работе использован интегральный климатический индекс, предложенный В.Д. Бойцовым [27]:

$$IKl_j = \sum \left[ (Ta_j - \overline{Ta_j}) / \sigma_{Ta_j} + (Tw_j - \overline{Tw_j}) / \sigma_{Tw_j} + (L_j - \overline{L_j}) / \sigma_{L_j} \right] \quad (1)$$

где  $IKl_j$  – климатический индекс j-того моря,  
 $Ta_j, Tw_j$  – фактические значения температуры воздуха и воды соответственно (°C),  
 $L_j$  – фактическая ледовитость (%),  
 $\overline{Ta_j}, \overline{Tw_j}, \overline{L_j}$  – средние многолетние значения температуры воздуха, воды и ледовитости  
 $\sigma_{Ta_j}, \sigma_{Tw_j}, \sigma_{L_j}$  – среднеквадратические отклонения температуры воздуха, воды и ледовитости

По формуле интегрального климатического индекса были рассчитаны временные ряды с 1900 по 2018 года по фактическим исходным данным.

По модельным данным также был рассчитан ИКЛ с 1962 по 2050 годы по формуле (1) для двух сценариев.

Сформированные ряды ИКЛ были подвергнуты статистической обработке аналогичной для всех анализируемых в работе гидрометеорологических характеристик.

Для исследования временных рядов на данный момент существует большое количество методов статистической обработки. Началом проведения любого статистического анализа является расчет первичных статистик, которые подразделяются на группы. Среднее арифметическое, максимум статистического ряда и другое относится к группе показатели положения. К показателям разброса относится дисперсия, размах колебаний и стандартное отклонение. В последнюю группу описательных статистик, а именно в показатели, описывающие закон распределения входит эмпирическая функция распределения и ее характеристики.

Для начала был произведен расчет показателя положения наших исходных рядов, а именно среднего арифметического ( $\bar{x}$ ) – оценка точки равновесия ряда при различных его колебаниях.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2)$$

Следующим этапом является оценка показателя разброса, в нашем случае рассчитывалась дисперсия (D) и связанное с ней стандартное отклонение ( $\sigma$ ), характеризующее среднее рассеяние среднего арифметического значения ряда от всех его значений. Формулы для расчета представлены ниже.

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{D} \quad (4)$$

Для детального анализа изменения характеристик ряда была проведена оценка трендовых составляющих для фактических и сценарных расчетов. В данной работе рассчитывались линейный и полиномиальные тренды для каждого из анализируемых рядов. При оценке значимости линейного тренда рассчитывался коэффициент корреляции  $r$  – количественная мера взаимосвязи двух переменных, а полиномиального тренда – корреляционное соотношение  $\eta$  - измерение тесноты связи, а также выборочный критерий Стьюдента  $t$  – определяет вероятность отношения двух средних значений в выборке в одной совокупности :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})(y_i - \bar{y})}{n\sigma_{\hat{y}}\sigma_y}, \quad (5)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{D_{\hat{y}}}{D_y}}, \quad (6)$$

$$t = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}, \quad (7)$$

где  $n$  - длина ряда,  $\hat{y}_i, y_i$  - значения трендовой составляющей и исходного ряда,

$\bar{\hat{y}}, \bar{y}$  - средние арифметические трендовой составляющей и исходного ряда;

$\sigma_{\hat{y}}, \sigma_y$  - стандартные отклонения трендовой составляющей и исходного ряда,

$D_{\hat{y}}, D_y$  - дисперсии трендовой составляющей и исходного ряда.

При оценке критерия Стьюдента превышающего трендовое критическое значение при заданном уровне значимости  $\alpha$  и числе степеней свободы  $\nu$  тренд считался значимым.[38]:

$$t > t_{kp}(\alpha, \nu = n - 2) . \quad (8)$$

Также рассчитывались коэффициент детерминации  $R^2$ , значение которого показывает долю дисперсии исходного ряда, определяемую трендовой составляющей и представляет собой квадрат коэффициента множественной корреляции или корреляционного соотношения, и величина линейного тренда. Коэффициент детерминации  $R^2$  для линейного тренда или его нелинейный аналог  $\eta^2$  характеризуют вклад тренда в общую дисперсию ряда. Вклад может быть значимым или незначимым. Это определяется на основании проверки на значимость коэффициента корреляции  $r$  или  $\eta$ .

Таким образом, определение первичных статистик и оценка трендовых составляющих были выполнены для всех исходных рядов и рядов ИКЛ.

Дополнительно корреляционный анализ использовался для оценки согласованности тенденций климатических изменений в акватории Балтийского моря, полученных различными методами: гидродинамическим моделированием, статистико-вероятностным моделированием и обобщением натуральных данных.

### 3 Климатические изменения Балтийского региона: анализ результатов математического моделирования

#### 3.1 Изменчивость интегрального климатического индекса Балтийского моря

На первом этапе обработки ряд интегральных климатических индексов, рассчитанных на основании данных натуральных наблюдений и реанализа, был продлен от 1900 до 2018 гг. Данный ряд представлен на рисунке 3.1 (красная линия).

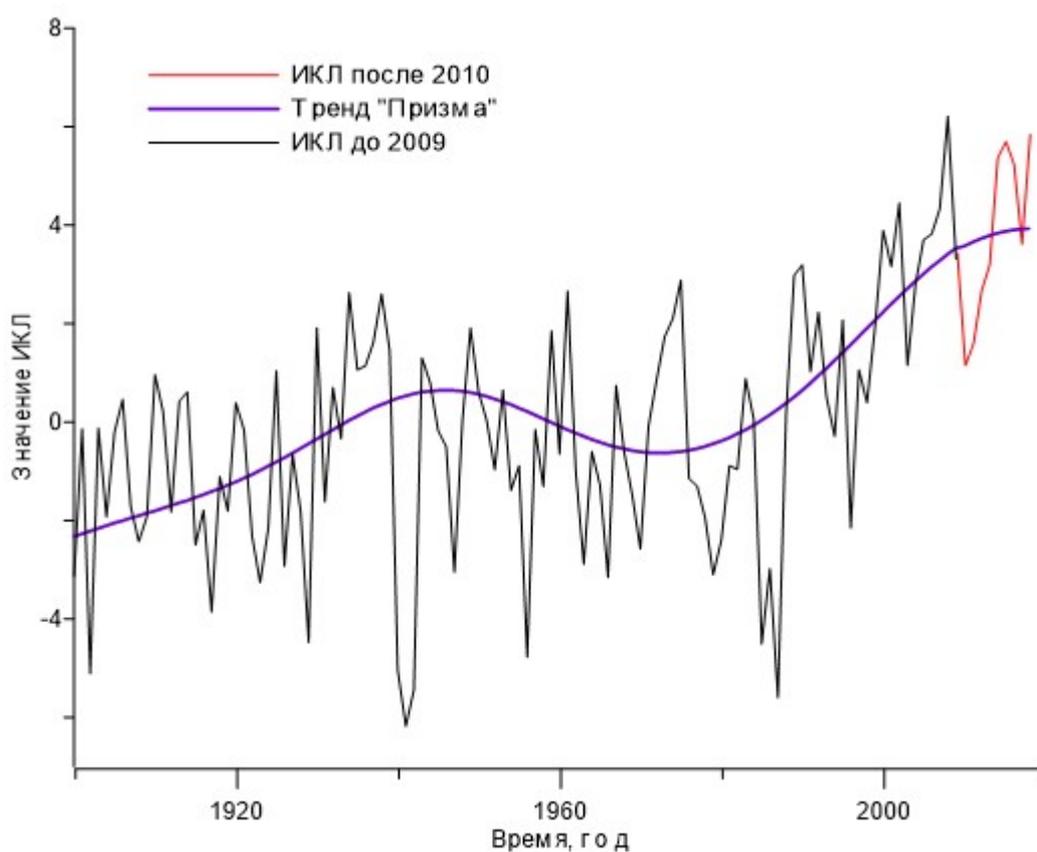


Рисунок 3.1. Изменчивость климатических индексов Балтийского моря в XX – начале XXI веков

Сравнительный анализ первичных статистик рядов ИКЛ (см. таблицу 2) в период с 1900 года по 2010 год и с 1900 года по 2018 год показал, что при продлении ряда максимальные и минимальные значения ИКЛ не изменились. Данные значения наблюдались в 2008 году и в 1941 году соответственно. Величина среднего значения ИКЛ сместилась практически к нулю из отрицательной области. Несколько возросли среднее квадратическое отклонение (приблизительно на 8%), и дисперсия. Также увеличился коэффициент детерминации, характеризующий тенденцию увеличения трендовой составляющей, следовательно, линейный тренд стал более выраженным. Данные первичных статистик приведены в таблице 2.

Таблица 2. Первичные статистики временных рядов интегрального климатического индекса Балтийского моря для исходного и продленного рядов.

Наименование первичных статистик	Ряд с 1900 по 2010 гг.	Ряд с 1900 по 2018 гг.
Максимальный ИКЛ	6,21	6,21
Минимальный ИКЛ	-6,18	-6,18
Среднее значение ИКЛ	-0,29	0,01
Дисперсия, D	5,78	6,68
Стандартное отклонение ИКЛ, $\sigma$	2,40	2,59
Коэффициент детерминации, $R^2$	0,16	0,26

Добавленный временной промежуток с 2010 по 2018 годы характеризуется гораздо более узким диапазоном изменчивости ИКЛ. Размах значений ИКЛ на этом временном интервале составил 4,69 единиц,

минимальное значение в период с 2010 по 2018 года 1,03 в 2010 году, а максимальное значение ИКЛ зафиксировано в 2018 году и составляет 5,72. Это несколько ниже, чем аналогичная величина в первом десятилетии 2000-х годов, где размах колебаний ИКЛ составляет 5,06 единиц, максимальное значение наблюдается в 2008 году и составляет 6,21, а минимальное в 2003 и равняется 1,15, и значительно ниже, чем размах, характерный для всего ряда равного 12,39 единиц. Самые низкие значения размаха в ряду ИКЛ были характерны для 20-х годов XX века. Размах колебаний в этот период составляет 4,3 единицы, минимальное значение ИКЛ в 1923 году составляет - 3,26, а максимальное 1,04 зафиксировано в 1925 году.

Увеличение интегрального климатического индекса отражает повышение температуры воды и воздуха, а также снижение максимальной ледовитости Балтийского моря. С 1999 года среднегодовые значения температуры воды возрастают до 8-9 °С, в этот же период происходит увеличение среднегодовых значений температуры воздуха до 6 °С. Это привело к уменьшению ледовитости, что отражает рисунок 3.2. С начала 2000-х годов максимальная ледовитость наблюдалась в 2011 году и составила 309 000 км<sup>2</sup>. Это составляет около 75% максимально возможной ледовитости Балтийского моря. Для рядов температуры воздуха и температуры воды наблюдается тенденция увеличения вклада линейной трендовой составляющей, и коэффициенты детерминации равны 0,20, 0,32, в то время как для ледовитость вклад линейного тренда незначим ( $R^2 = 0,02$ ).

Тем не менее, на фоне резкого роста ИКЛ с середины 1980-х годов к началу XXI века характер изменчивости значений индекса в 2000-2018 годах может свидетельствовать о некоторой стабилизации климатических условий в данном регионе.

Рассмотрим далее результаты прогнозов изменений климата Балтики на основе гидродинамического моделирования и статистико-вероятностного подхода.

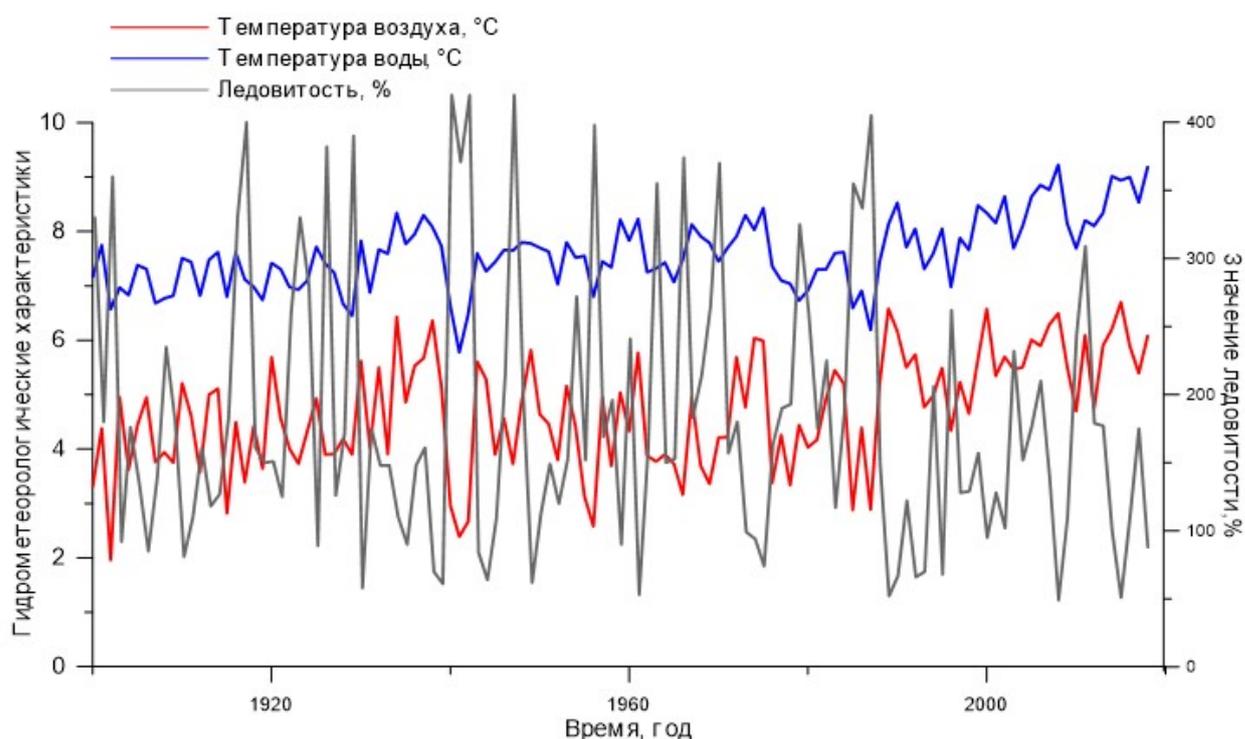


Рисунок 3.2. Изменчивость гидрометеорологических характеристик Балтийского моря в период 1900-2018 гг.

### 3.2 Оценка изменчивость интегрального климатического индекса по прогностическим данным

Ряды температуры воздуха, температуры воды и максимальной ледовитости, полученные в результате сценарных расчетов на модели SPBEM с 1962 по 2050 года были обобщены в ряды модельных ИКЛ. Фактические данные ИКЛ по Балтийскому морю и результаты экстраполяции различных модельных сценариев представлены на рисунке 3.3.

Первичные статистики модельных рядов и ряда фактических значений ИКЛ для интервала 1962-2018 гг. приведены в таблице 3. По сравнению со значениями первичных статистик ряда ИКЛ, построенного на основе данных натурных наблюдений и реанализа, модельные оценки характеризуются меньшим размахом, меньшими дисперсией и стандартным отклонением. Среднее значение для сценария «E-REF» превышает на 20% среднее для

фактических данных, в то время как для сценария «H-REF» среднее значение на 85% меньше.

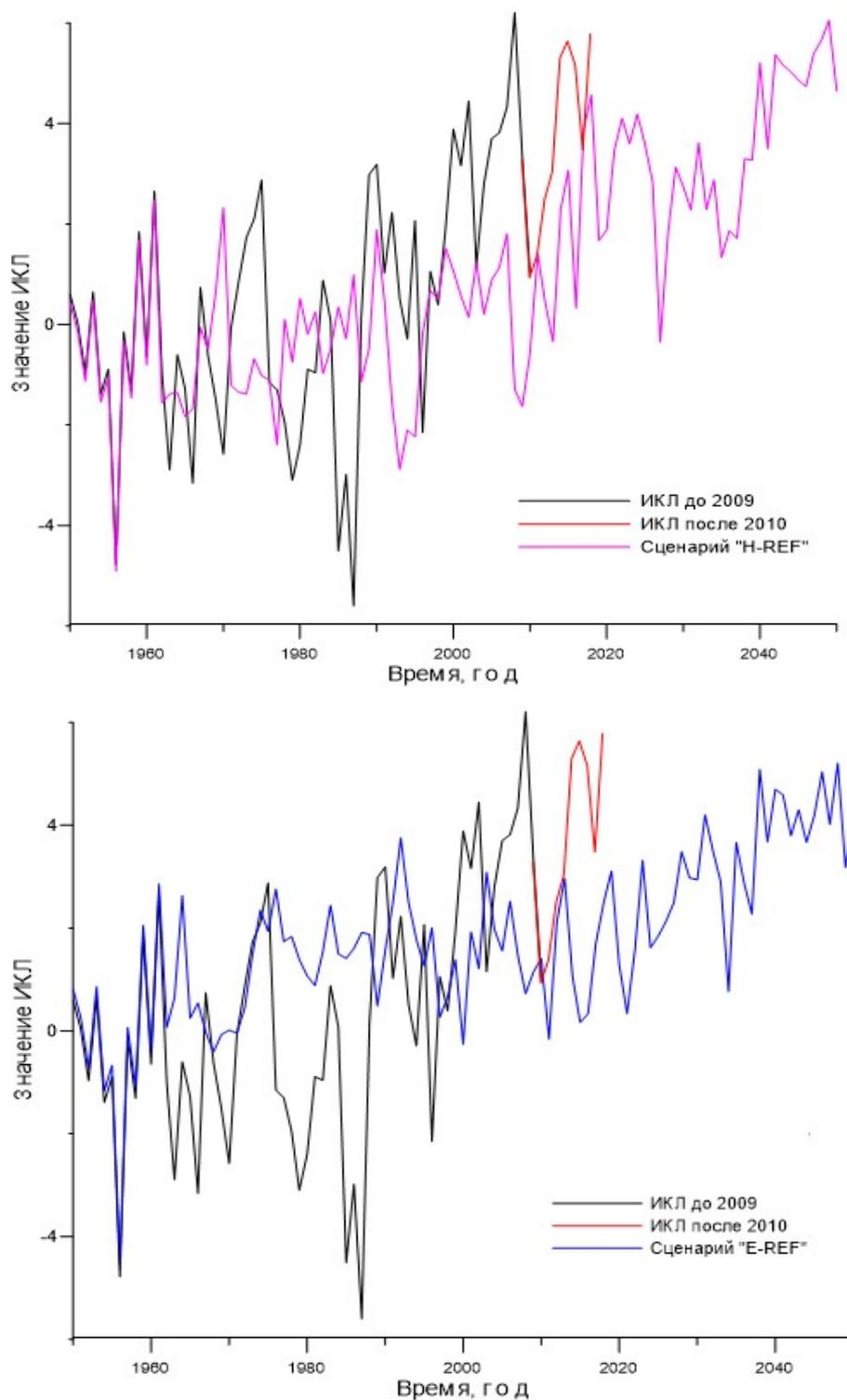


Рисунок 3.3. Изменчивость климатических индексов Балтийского моря в XX – начале XXI веков по различным сценариям.

Таблица 3. Первичные статистики временных рядов интегрального климатического индекса для фактических и сценарных данных.

Наименование первичных статистик	ИКЛ по сценарию «Е-REF»	ИКЛ по сценарию «Н-REF»	ИКЛ с 1962 по 2018 гг.
Максимальный ИКЛ	3,56	4,77	6,21
Минимальный ИКЛ	-0,63	-2,74	-5,6
Среднее значение ИКЛ, $\bar{X}$	1,15	0,14	0,95
Стандартное отклонение ИКЛ, $\sigma$	0,97	1,54	2,74
Дисперсия, D	0,94	2,36	7,51

Показатель разброса (дисперсия) максимален у ИКЛ рассчитанного по данным натуральных наблюдений и реанализа с 1962 по 2018 года и составляет 7,51. У сценария «Е-REF» дисперсия минимальна. Максимальная корреляция наблюдается между сценарием «Н-REF» и ИКЛ, рассчитанными по натурным данным, составляет 0,25 и является значимой. Корреляционная связь между модельными рядами ИКЛ является незначимой ( $r = 0,06$ ), как связь между модельными ИКЛ по сценарию «Е-REF» и ИКЛ по натурными данным ( $r = 0,07$ ).

Оценивая изменчивость интегральных климатических индексов по сценарию «Е-REF» можно отметить степень влияния гидрометеорологических характеристик (рис.3.4). Так температура воды имеет незначительное повышение значений за весь исследуемый период. В то время как температура воздуха повышается значительно сильнее с 2000 года. Максимальное значение температуры воздуха наблюдается в 2019 году и составляет 8,6°C. У выше упомянутых характеристик отмечена тенденция увеличения трендовой составляющей и коэффициент детерминации составляет 0,33 и 0,48

соответственно. По данному сценарию максимальная ледовитость в XXI веке должна была наблюдаться в 2015 году, достигнув 116 750 км<sup>2</sup>. Далее ожидалось ее уменьшение до 4 100 км<sup>2</sup> в 2046 году, что связано с ростом температуры воздуха и воды. Уменьшение ледовитости и повышение температур приводит к скачкообразному повышению климатического индекса, что и отображает рисунок 3.3.

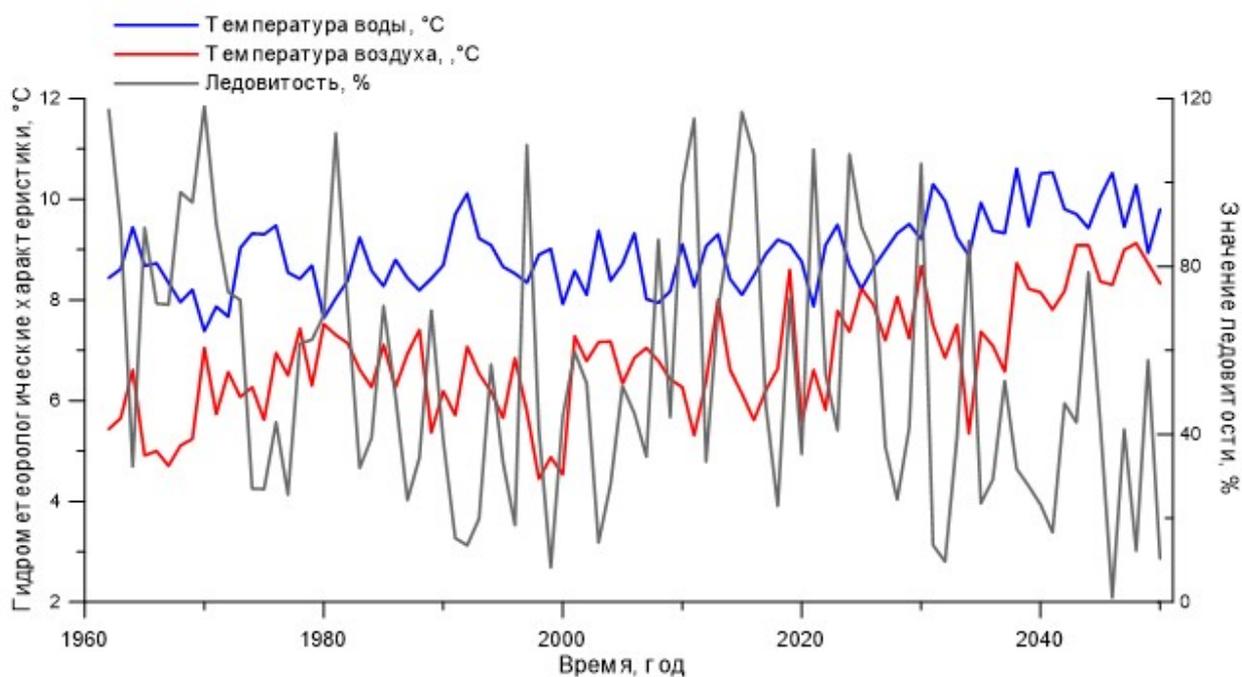


Рисунок 3.4. Изменчивость гидрометеорологических характеристик Балтийского моря по сценарию «E-REF»

При детальном рассмотрении влияния гидрометеорологических характеристик региона, полученных по сценарию «H-REF» было отмечено, что температура воды растет с 1994 года и составляет 7,1°C, максимальное значение температуры зафиксировано в модельных данных в 2049 году и равно 10,8°C. В этот же период происходит более интенсивный рост температуры воздуха с 3,4°C до 9,6°C, но также наблюдается более заметная амплитуда изменений температуры воздуха, нежели чем у воды. В данном сценарии общие показатели ледовитости значительно выше, чем в сценарии

«E-REF», но сохраняется тенденция уменьшению площади занятой льдом и коэффициент детерминации равен 0,39. В сценарии «H-REF» максимальная ледовитость зафиксирована в 1995 году и составляет 249 700 км<sup>2</sup>, в этот период ИКЛ достигает своих минимальных значений в XX веке, что подтверждает рисунок 3.1, но далее происходит уменьшение ледовитости до 74 000 км<sup>2</sup> в 2006 году (рис.3.5). Климатический индекс возрастает до этого периода, но в 2009 году снижается из-за повышения ледовитости до 182 000 км<sup>2</sup> и снижения температур воздуха и воды.

Скачкообразное увеличение интегрального климатического индекса происходит с 2015 года, когда ожидалось резкое снижение площади льда до 21 000 км<sup>2</sup> и затем по результатам расчетов до 2050 года наблюдается дальнейшее уменьшение ледовитости до 6 600 км<sup>2</sup> за исключением 2027 и 2032 годов, когда ожидается увеличение ледовитости до 120 000 км<sup>2</sup>, связанное с резким уменьшением температуры воздуха и воды. Эти изменения отчетливо видны на графике изменчивости климатических индексов, где происходит их непродолжительные снижения.

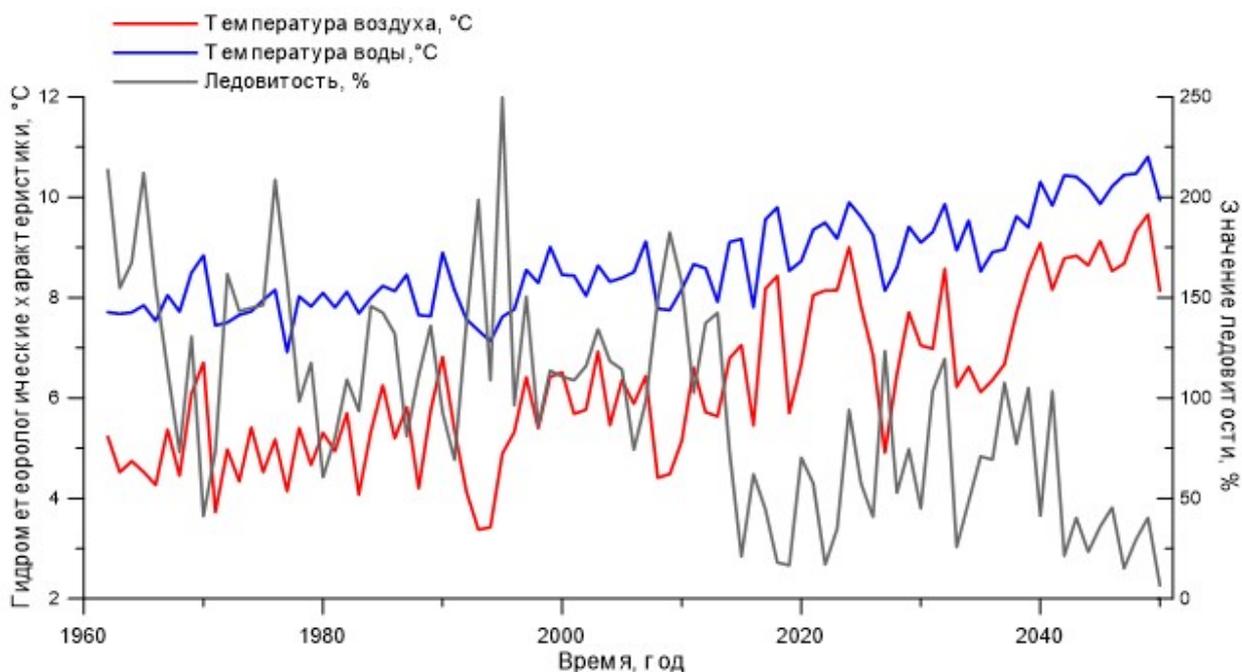


Рисунок 3.5. Изменчивость гидрометеорологических характеристик Балтийского моря по сценарию «H-REF».

В целом же на период до 2050 года по обоим модельным расчетам ожидается устойчивое повышение значений ИКЛ, однако темпы повышения на различных временных интервалах будут неодинаковыми. Для анализа таких особенностей временных рядов был проведен тренд-анализ.

### 3.3 Оценка трендовых составляющих

При долгосрочном прогнозе наиболее важным является анализ тенденции и поэтому для детального анализа изменения интегрального климатического индекса была проведена оценка трендовых составляющих для фактических и сценарных расчетов. В данной работе рассчитывались линейный и полиномиальные тренды для каждого из анализируемых рядов ИКЛ.

Анализ линейных трендов рядов климатических индексов фактических и сценарных расчетов показал, что их вклад в дисперсию ИКЛ на отдельных участках рядов превышает 30 %, а в период с 1960 по 2000 года значительно ниже и составляет 0,04% и 7%. Это связано со сменой тенденции в начале 1980-х годов. Абсолютные величины изменений индексов за весь период положительны и близки для всех расчетов, кроме периода с 1960 по 1990 года, где наблюдается тенденция уменьшения (таблица 4). Наиболее вероятно линейные тренды фактических и сценарных значений ИКЛ представляют собой положительную часть цикла с квазипериодом, существенно превышающим длину исходных рядов (рисунок 3.6).

Вклад полиномиальных трендов, аппроксимированных полиномами 3 – 6 степеней, возрастает до ~27 – 53 % для периода с 1950 по 2018 года и возрастает до ~50-60 % для периода с 2018 по 2050 год (таблица 4), что свидетельствует о значительном влиянии долгопериодной квазигармонической составляющей, присутствующей в анализируемых исходных рядах.

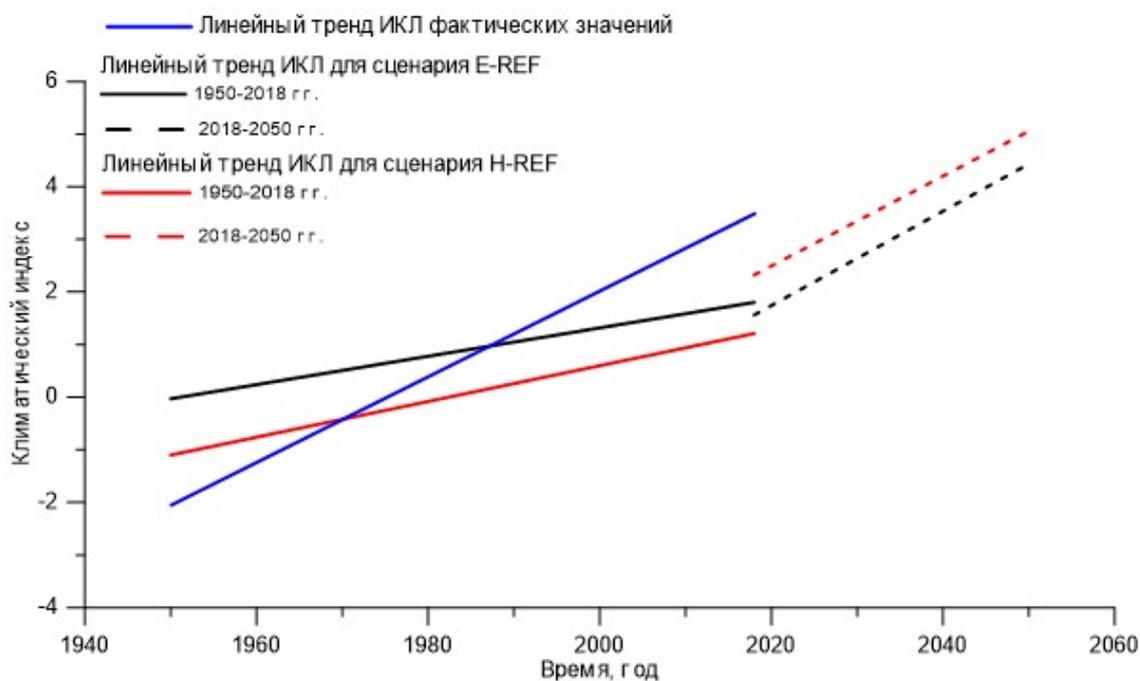


Рисунок 3.6. График линейных трендов для фактических и сценарных расчетов ИКЛ

Таблица 4. Характеристики линейных трендов рядов климатических индексов для фактических и сценарных данных по Балтийскому морю.

ИКЛ	Вклад в дисперсию, %	Тенденция	Изменения ИКЛ за период
Фактические значения за весь период	38	увеличение	5,2
Фактические значения 1960-1990	0,04	уменьшение	3,84
Фактические значения 1970-2000	7	увеличение	6,47
Фактические значения 1980-2010	47	увеличение	3,43
Сценарий E-REF с 1950 по 2018 гг.	17	увеличение	3,8
Сценарий H-REF с 1950 по 2018 гг.	18	увеличение	2,6
Сценарий E-REF с 2018 по 2050 гг.	48	увеличение	2,7
Сценарий H-REF с 2018 по 2050 гг.	30	увеличение	2,6

Следует отметить, что заметное увеличение вклада полиномиального тренда в дисперсию колебаний ИКЛ на 8 % произошло при повышении степени аппроксимирующего полинома для сценария H-REF и на 4% для фактических значений и сценария H-REF для периода с 1950 по 2018 года. Более значительное увеличение вклада полиномиального тренда в дисперсию колебаний ИКЛ с 51 до 60 % произошло при повышении степени аппроксимирующего полинома для сценария H-REF (таблица 5). Исходя из полученных результатов, был построен график полиномиальных трендов 6 степени (рисунок 3.7).

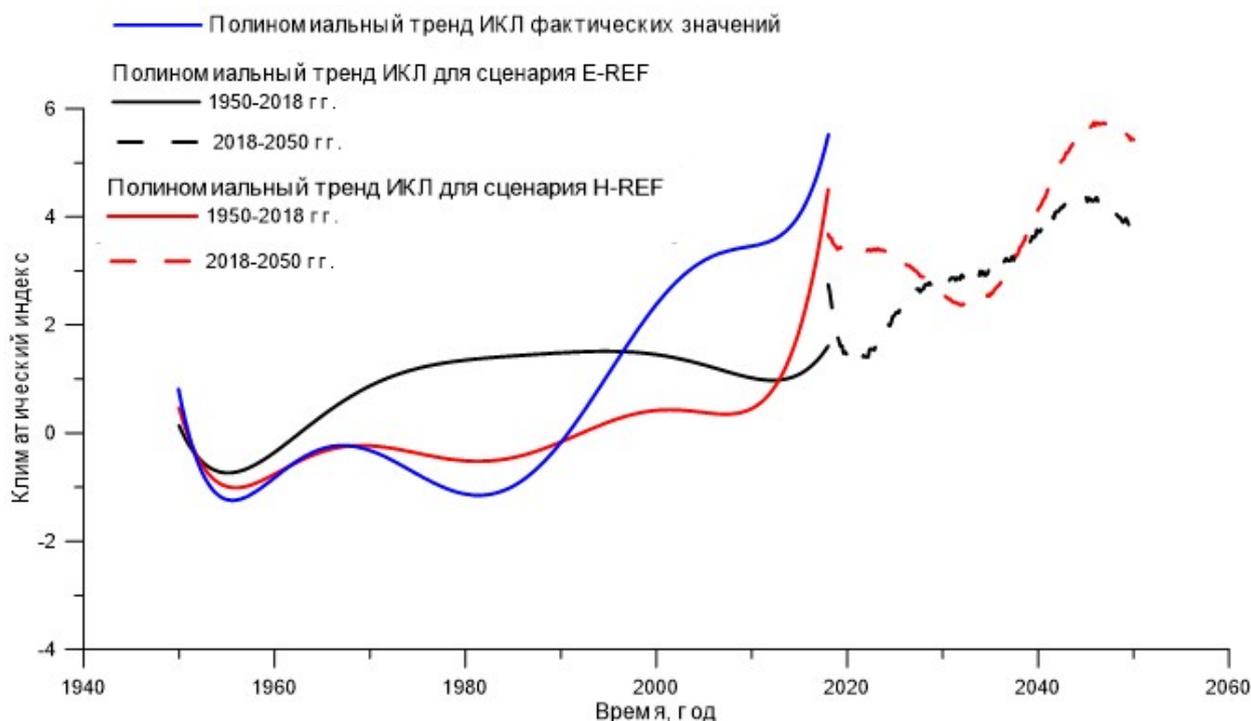


Рисунок 3.7. График полиномиальных трендов 6 степени для фактических и сценарных расчетов ИКЛ.

При этом у ряда ИКЛ для сценария E-REF моменты экстремумов долгопериодных квазигармоник выражены не так ярко, как у сценария H-REF и у ИКЛ по фактическим значениям для периода до 2018 года (рисунок 3.7).

Таблица 5. Вклад полиномиальных трендов, аппроксимированных полиномами различной степени, в дисперсию исходных значений климатических индексов (в %).

ИКЛ	Степень полинома			
	3	4	5	6
Фактические значения с 1950 по 2018 гг.	~49	~50	~51	~53
Сценарий E-REF с 1950 по 2018 гг.	~27	~29	~30	~31
Сценарий H-REF с 1950 по 2018 гг.	~27	~30	~30	~35
Сценарий E-REF с 2018 по 2050 гг.	~50	~50	~54	~57
Сценарий H-REF с 2018 по 2050 гг.	~51	~58	~58	~60

Для ИКЛ фактических значений в рассмотренный период моменты наступления экстремумов несколько не совпадают по времени с аналогичными показателями для ИКЛ различных сценариев, но они близки по своим максимальным значениям к значениям сценария H-REF.

Для периода с 2018 по 2050 года время наступления экстремумов долгопериодных квазигармоник совпадает у сценарных расчетов, но значения индекса у сценария E-REF меньше, чем у сценария H-REF. Минимумы ИКЛ фактических значений и сценария H-REF долгопериодного цикла выражены слабее по сравнению со сценарием E-REF и практически совпадают до 1990 годов, далее у ИКЛ, рассчитанным по фактическим значениям, начинается стремительный рост, что подтверждают данные таблицы 4 о вкладе в дисперсию равную 47 % в период с 1980 по 2010 года.

Таким образом, как и по результатам сравнения первичных статистик модельных и фактических ИКЛ для интервала 1962-2018 год, так и по

результатам сравнения трендовых составляющих наиболее близок к фактическим данным прогноз по сценарию H-REF.

### 3.4 Сравнение полученных результатов прогноза по различным данным

Существует достаточно много методов прогнозирования климатических изменений. В данной работе использовался метод прогнозирования путем экстраполяции внутренних закономерностей ряда и это менее сложный процесс по сравнению с другими методами. Для экстраполяции использовались квазигармоника с периодом 70 лет и линейный тренд [28], характерный для периода с 1900 года по 2009 год, а также полином 6-ой степени. Фактические данные ИКЛ по Балтийскому морю и результат экстраполяции представлен на рисунке 3.8.

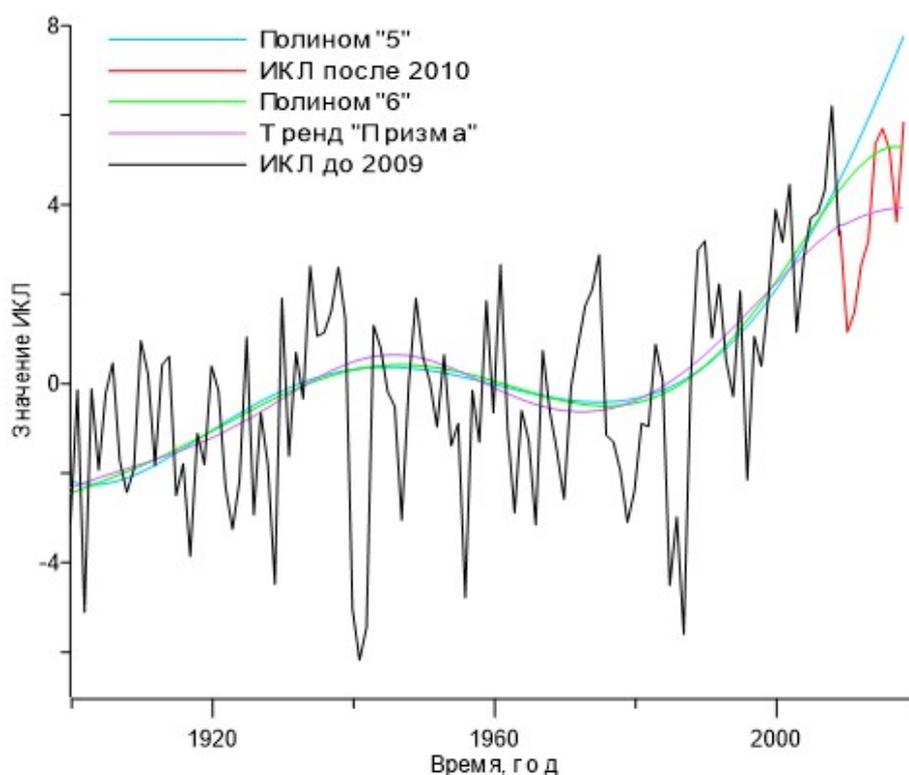


Рисунок 3.8. Изменчивость климатических индексов Балтийского моря в XX – начале XXI веков: фактические данные и прогноз

Результаты исследования показали, что наибольшее изменение среднегодовых значений ИКЛ наблюдалось в 2008-2010 годах и составило ~5 единиц (в 2008 году значение ИКЛ было максимальным (6,2 единицы) за весь период, начиная с 1900 года), после 2012 года размах колебаний ИКЛ не превышал 2,6 единиц. При этом в период 2010-2018 годы абсолютные величины ИКЛ колебались относительно значения ~4 единицы.

Сравнение нелинейных трендовых составляющих, рассчитанных в пакете «Призма» [39], для периодов 1900-2009 гг. и 1900-2018 гг. выявило различия абсолютных величин в пределах 0,5 единиц при сохранении общих закономерностей изменчивости (коэффициент корреляции для рядов долгопериодных составляющих ИКЛ по данным за 110 лет равен 0,99). Исключением являлся период с 1934 по 1943 гг., когда разница значений возросла до 0,65 единиц.

Для прогнозирования долгопериодных изменений ИКЛ в работе [28], была использована экстраполяция значений индекса на основе выявленного линейного тренда с учетом 70-летней квазигармоники, характерной для изменчивости гидрометеорологических характеристик Балтийского моря. Совместный анализ межгодовой динамики фактических значений ИКЛ и опубликованных прогностических значений за период 2010-2018 гг. показал, что среднее значение фактических величин ИКЛ составило 3,7 единиц, в то же время по прогнозу долгопериодной составляющей среднее значение ожидалось равным 3,2 единицы. Таким образом, прогностические значения оказались несколько занижены (на 0,5 единиц) относительно фактических величин.

При этом следует обратить внимание на тот факт, что ожидаемые тенденция снижения темпов роста и некоторая стабилизация значений ИКЛ в 2010-2020 годах, оправдались. Это позволяет считать прогноз тенденции изменения ИКЛ на 2010-2020 годы в целом оправдавшимся, а высказанный ранее тезис относительно возможной близости переломного момента в наблюдающейся тенденции потепления [28], сохраняет свою актуальность.

Схожие результаты были получены и опубликованы в работе [19], где использовался другой метод прогнозирования. В исследовании будущих изменений климата Балтийского моря в конце XXI века была использована региональная модель циркуляции океана. Было проведено четыре сценарных моделирования с использованием двух глобальных моделей и двух сценариев. Для уменьшения смещений модели и увеличения будущей солености был применен так называемый  $\Delta$ -подход изменения. Используя региональную сопряженную атмосферно-океаническую модель, были рассчитаны 30-летние климатологические среднемесячные изменения данных температуры атмосферы и речного стока в Балтийское море на основе ранее проведенных экспериментов с временными срезами. Эти изменения были добавлены к реконструированным атмосферным поверхностным полям и стоку за период 1903-1998 годов. Из-за повышенных западных ветров в зимний период среднегодовая скорость ветра будет между 2 и 13% больше по сравнению с нынешним климатом. Оба изменения приведут к снижению средней солености Балтийского моря от 8 до 50%. Хотя соленость во всей Прибалтике может быть значительно ниже в конце двадцать первого века, глубоководная вентиляция, скорее всего, лишь незначительно изменится.

Наибольшее изменение прогнозируется для максимума температуры морской воды в пределах галоклина. Кроме того, средняя температура повысится между 1,9 и 3,2°C. Температурная реакция на атмосферные изменения запаздывает на несколько месяцев. Будущий годовой максимальный размер морского льда сократится в соответствии с предыдущими исследованиями на 46-77%. Однако, в отличие от более ранних результатов в самом теплом сценарии моделирования была найдена одна бесснежная зима из 96 сезонов. Хотя изменения скорости ветра являются равномерными, экстремальные уровни моря могут увеличиваться больше, чем средний уровень моря. [19] Оценивая результаты представленного выше исследования необходимо проанализировать то, что получилось в нашей работе по данным модели SPBEM.

По модельным данным результаты исследования показали, что наибольшее изменение среднегодовых значений ИКЛ рассчитанных с 1950 по 2010 гг. наблюдалось в 2008-2010 годах и составило ~5 единиц (в 2008 году значение ИКЛ было максимальным (6,2 единицы) за весь период, начиная с 1950 года), но по расчетам ИКЛ с 1962 по 2050 гг. по сценарию «Н-REF» максимальное значение составляет 6,3 единицы в 2049 года за весь рассматриваемый период, а наибольшее изменение среднегодовых значений ИКЛ с 1962 по 2050 гг. по сценарию «Н-REF» наблюдалось в 1990-1993 годах и составило 4,8 единиц. По расчетам ИКЛ с 1962 по 2050 гг. по сценарию «Е-REF» максимальное значение составляет 5 единиц в 2048 году за весь рассматриваемый период, а наибольшее изменение среднегодовых значений ИКЛ с 1962 по 2050 гг. по сценарию «Е-REF» наблюдалось в 2031-2034 годах и составило 3,5 единиц, что значительно ниже изменений в значениях ИКЛ рассчитанных с 1950 по 2010 гг. и ИКЛ с 1962 по 2050 гг. по сценарию «Е-REF»

При этом в период 2010-2018 годы абсолютные величины ИКЛ колебались относительно значения ~4 единицы, в то время как абсолютные величины ИКЛ по сценарию «Н-REF» были приблизительно равны 2 единицы, а абсолютные величины ИКЛ по сценарию «Е-REF» колебались относительно значения ~1-2 единицы.

Совместный анализ межгодовой динамики фактических значений ИКЛ и опубликованных прогностических значений за период 2010-2018 гг. показал, что среднее значение фактических величин ИКЛ составило 3,7 единиц, в то же время по прогнозу долгопериодной составляющей среднее значение ожидалось равным 3,2 единицы. Таким образом, прогностические значения оказались несколько занижены (на 0,5 единиц) относительно фактических величин. Среднее значение ИКЛ за период с 1962 по 2050 гг. по сценарию «Е-REF» равен 1,8 единиц и среднее значение ИКЛ с 1962 по 2050 гг. по сценарию «Н-REF» составило 1,4 единицы, что меньше среднего значения долгопериодной составляющей по оценкам равной 1,8 единиц. Из полученных

результатов можно сделать вывод, что прогностические значения соответствуют рассчитанным значениям ИКЛ за период с 1962 по 2050 гг. по сценарию «E-REF» и несколько завышены по отношению к средним значениям ИКЛ с 1962 по 2050 гг. по сценарию «H-REF».

Для ИКЛ Балтийского моря максимум и минимум долгопериодного цикла в исследуемый период выражены слабее и моменты наступления экстремумов несколько не совпадают с аналогичными показателями для ИКЛ по результатам расчета с различным форсингом.

При этом следует обратить внимание на тот факт, что ожидаемые тенденции снижения темпов роста и некоторая стабилизация значений ИКЛ в 2010-2020 годах, оправдались для всех полученных результатов. Это позволяет считать прогноз тенденции изменения ИКЛ в целом оправдавшимся, а высказанный ранее тезис относительно возможной близости переломного момента в наблюдающейся тенденции потепления [15], сохраняет свою актуальность.

Изменения в температурных характеристиках воздуха и воды сильно влияют на площадь ледяного покрова. Уменьшение площади ледяного покрова на акватории Балтийского моря подтверждает сценарное моделирование, которое было проведено с целью оценки влияния площади льда на биогеохимию моря. По результатам проведенного моделирования было выявлено, что ежегодная максимальная ледовитость уменьшится в конце столетия на 50-80%. Прогнозируемое сокращение будущего морского ледового покрова зависит главным образом от изменения температуры воздуха в зимний период. Как динамическое, так и статистическое моделирование ледовитостью и зимними средними изменениями температуры воздуха является нелинейной. Таким образом, в северной части Балтики можно даже ожидать появления морского льда в будущем климате. Влияние повышенной температуры воды и пониженной солености в будущем климате на биогеохимию было исследовано в многочисленных модельных исследованиях, главным образом с акцентом на сегодняшнюю эвтрофированную Балтику. В

данном исследовании было изучено потенциальное влияние восстановленного морского ледового покрова на биогеохимию в северных частях Балтийского моря, т. е. в Ботническом заливе, Ботническом море и Финском заливе, используя ансамбль из четырех различных регионализированных глобальных климатических симуляций, рассчитанных с помощью связанной трехмерной физико-биогеохимической модели высокого разрешения. Поскольку все сценарии моделирования отличаются только количественно, все было сосредоточено на одном эксперименте, чтобы проиллюстрировать и обсудить основные процессы. Форсирование модели океана рассчитывалось на основе полей атмосферной поверхности из четырех сценариев моделирования изменения климата. Эти данные были рассчитаны с использованием динамического подхода к масштабированию с использованием региональной климатической модели RCO (Rossby Centre Atmosphere Ocean model) с боковыми граничными данными из двух глобальных моделей общей циркуляции, HadCM3 и ECHAM5, вынужденных использовать два сценария выбросов парниковых газов. Средние изменения были рассчитаны по разнице между будущим (2070-2099) и контрольным (1969-1998) периодами.

Таким образом, настоящее исследование было основано на усредненных результатах, относящихся к временным масштабам изменения климата (~30 лет), тогда как систематические изменения больших вариаций между отдельными годами более не анализировались. В современном климате Ботническое море, Ботнический залив и Финский залив в среднем покрываются льдом каждую зиму. В будущем климате, по прогнозам, почти все районы, за исключением Ботнического залива, будут свободны ото льда в течение ранней весны. [40]

Шведский метеорологический и гидрологический институт опубликовал материал, который основан на метеорологических наблюдениях и расчетах с климатическими моделями, в которых используется информация о будущих изменениях в атмосфере. Результаты расчетов с использованием климатических моделей были дополнительно обработаны для округов

Швеции, речных бассейнов и районов метеорологического прогноза. Расчеты охватывают период 1961-2100 годов. Расчеты климатической модели являются частью международного исследовательского проекта CORDEX [41]. Для расчета климата в будущем использовались климатические модели. Они включают в себя трехмерное представление атмосферы, поверхности суши, моря, озер и льда. В модели атмосфера разделена на трехмерную сетку вдоль поверхности Земли и вверх в воздух. В этом исследовании была использована региональная атмосферная модель центра Россби-RCA. Модель охватывает Европу, и размер квадратов в сетке по площади суши (разрешение) составляет примерно 50x50 км. Моделирование климата основано на сценариях выбросов или радиационных сценариях. Сценарии выбросов - это предположения о будущих выбросах парниковых газов. Сценарии выбросов основаны на предположениях о будущем развитии мировой экономики, росте численности населения, глобализации, переходе на экологически чистые технологии и многом другом. Радиационные сценарии основаны на предположениях о том, как парниковый эффект будет усиливаться в будущем, так называемом радиационном приводе (измеряемом в Вт/м<sup>2</sup>). Чем больше выбросов парниковых газов, тем больше мощность излучения. Такие сценарии называются репрезентативными путями концентрации. [ 20, 42]

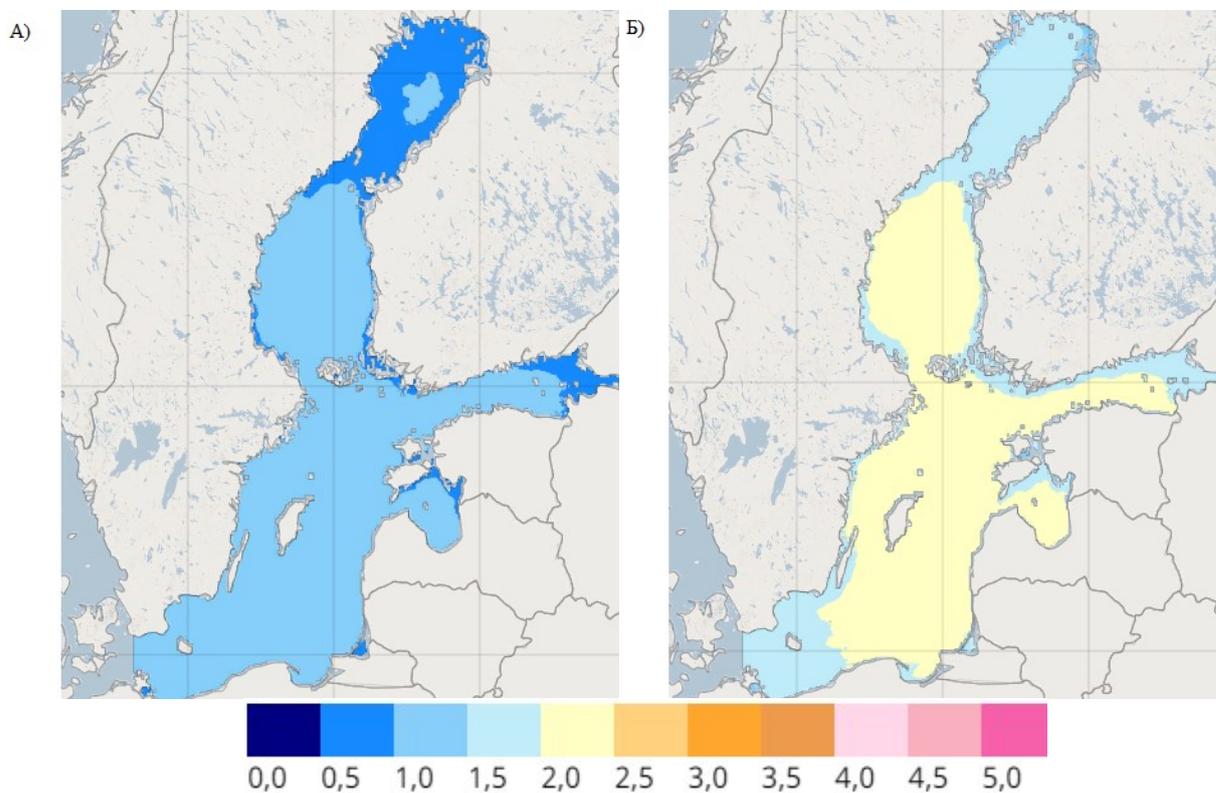
Этот анализ использует четыре сценария для Балтийского моря:

1. RCP2, 6: мощная политика изменения климата в отношении выбросов парниковых газов достигнет своего пика к 2020 году, мощность излучения достигает 2,6 Вт / м<sup>2</sup> к 2100 году (используется в МГЭИК). Этот сценарий наиболее близок к амбициям Парижского соглашения по климату.
2. RCP4, 5: стратегии сокращения выбросов парниковых газов приводят к стабилизации излучаемой мощности на уровне 4,5 Вт / м<sup>2</sup> до 2100 года.
3. RCP8, 5: увеличение выбросов парниковых газов означает, что выход излучения достигает 8,5 Вт/м<sup>2</sup> в 2100 году (используется в МГЭИК, EVENTS5). Этот сценарий в настоящее время наиболее близок к

измеренным тенденциям концентрации парниковых газов.

4. SRES A1B: умеренный рост населения, быстрое глобальное развитие в направлении более эффективных технологий и сбалансированного использования ископаемых видов топлива и возобновляемых источников энергии.

По всем предложенным сценариям, кроме последнего, были предоставлены данные и графики изменения температуры воды в Балтийском море (рисунки 3.9; 3.10).



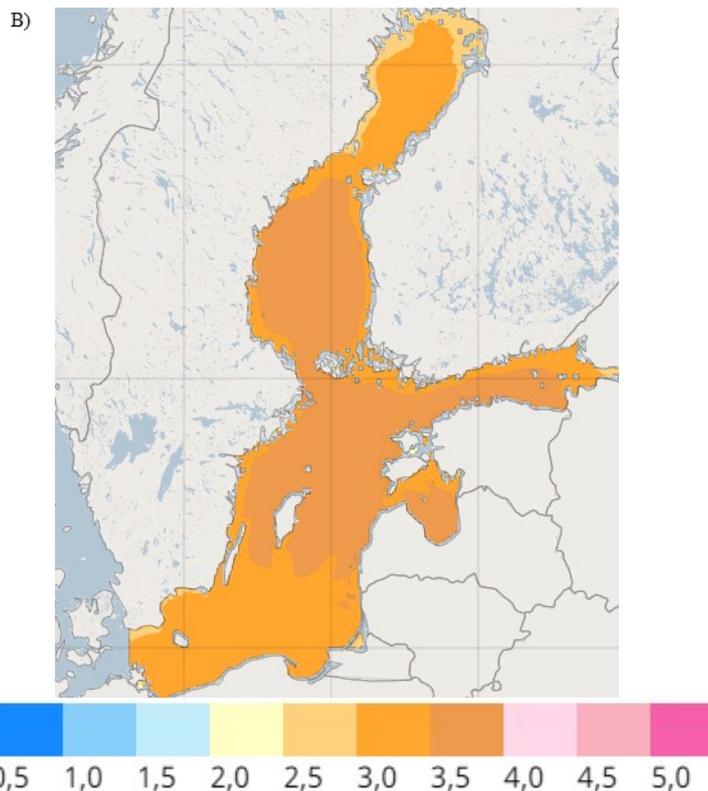


Рисунок 3.9. Изменение среднегодового значения температуры поверхностных вод ( $^{\circ}\text{C}$ ) в период с 1970-1999 по 2070-2099 гг. Согласно А)RCP2,6; Б) RCP4,5; В) RCP8,5. Положительные цифры означают повышение температуры. [20, 42]

Согласно полученным результатам увеличение температуры воды в центральной части Балтийского моря произойдет на  $1,5^{\circ}\text{C}$ . На акватории Финского залива и в северной части Ботнического залива увеличение температуры воды будет на  $0,5^{\circ}\text{C}$ , что отображает сценарий RCP2,6 на рисунке 3.9. По сценарию RCP4,5, где применяется стратегии сокращения выбросов парниковых газов, приводящая к стабилизации излучаемой мощности наблюдается увеличение температуры воды в центральной части моря на  $2,5^{\circ}\text{C}$ , а в Финском заливе, на севере Ботнического залива и вблизи о. Борнхольм увеличение произойдет на  $1,5^{\circ}\text{C}$ . И в самом не утешительном сценарии RCP8,5, в котором заложено увеличение выбросов парниковых газов и который в настоящее время наиболее близок к измеренным тенденциям концентрации парниковых газов наблюдается уменьшение площади более

прогретых участков воды в центральной части моря, но увеличение температуры в этой части происходит на 4 °С. На 3°С увеличатся значения температуры воды в акватории о. Борнхольм, Гданьского залива, а также о. Готланд. На севере Ботнического залива у побережья температура воды увеличится на 2,5°С.

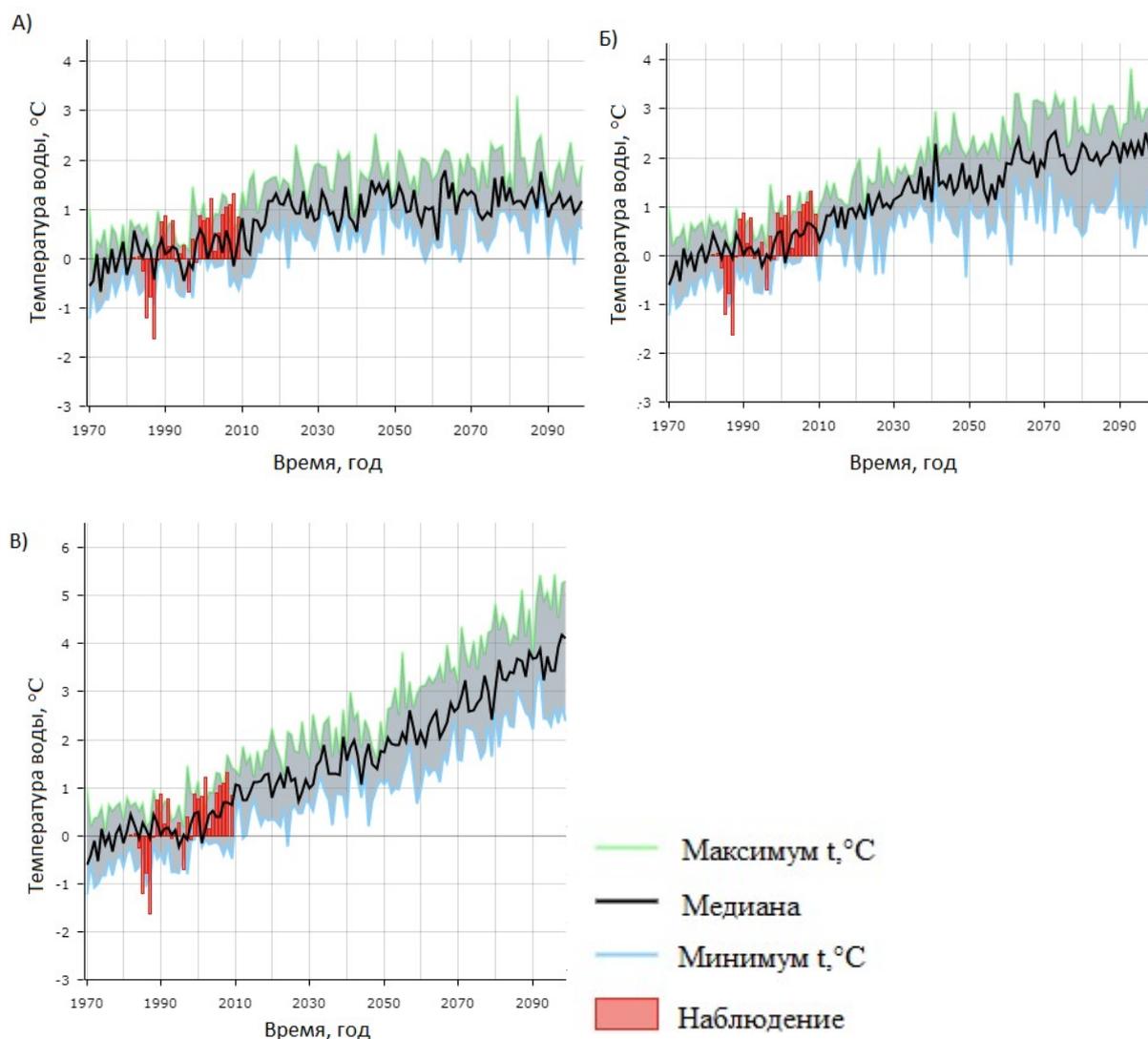


Рисунок 3.10. Изменение поверхностной температуры воды (°С) по сравнению с период 1970-1999 для А)RCP2,6; Б) RCP4,5; В) RCP8,5. Ансамблевая статистика по данным за весь год показана вместе с наблюдениями. Серое поле показывает вариацию между самым высоким и самым низким значением для членов ансамбля. [20, 42]

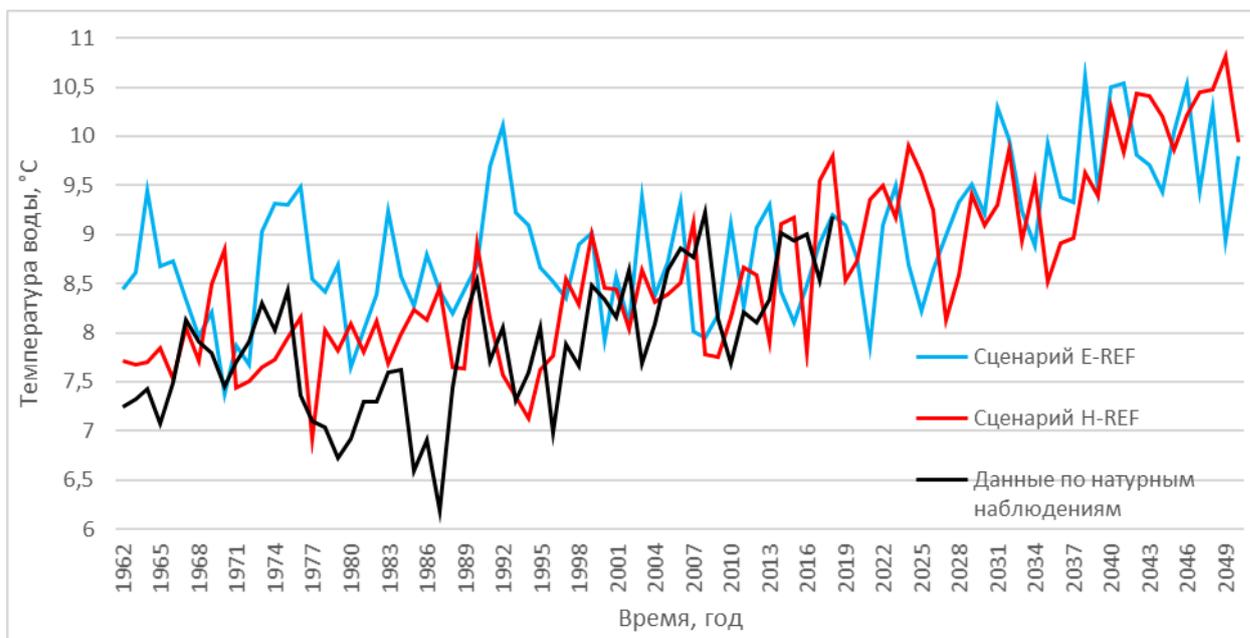


Рисунок 3.11. Изменчивость температуры воды по модельным сценариям и данным натурных наблюдений и реанализа.

Изменчивость температуры за период с 1970 по 2100 года отображает рисунок 3.10. По сценарию RCP2,6 происходит незначительное увеличение температуры и дальнейшее ее сохранение до конца исследуемого периода. Перепад между максимальными и минимальными значениями роста температуры невелик. Для сценария RCP4,5 характерно более резкое и постоянное увеличение температуры воды, которое стабилизируется к 2060 году и в дальнейшем интенсивность повышения температуры воды уменьшается.

Постоянное и значительное повышение температуры воды за весь период исследования характерно для неутешительного сценария RCP8,5. Данным по этому сценарию соответствуют модельные значения температуры воды, полученные из модели эвтрофикации Балтийского моря SPBEM по сценарию H-REF. За период с 1962 года по 2018 года в данном сценарии наблюдается аналогичное увеличение температуры воды на  $2,5^{\circ}\text{C}$  как и в сценарии RCP8,5.

Фактические данные температуры воды и данные по модели SPBEM по

сценарию E-REF близки по значениям увеличения температуры и приближены к сценарию RCP4,5 Шведский метеорологический и гидрологический институт (рисунок 3.11). Во всех этих трех сценариях увеличение температуры происходит на 1-1,5°C за период с 1970 по 2018 года.

### 3.5 Наиболее вероятный сценарий климатических изменений в Балтике

Репрезентативность рассчитанных временных рядов интегрального климатического индекса зависит от качества прогноза температуры воды, воздуха и ледовитости. В данной работе мы рассматривали фактические и модельные данные для двух сценариев. Климатический индекс для модельных данных по сценарию E-REF до 2000 года завышен по отношению к индексам, рассчитанным по фактическим значениям температуры воды, воздуха и ледовитости. В то время как после 2000 года наоборот значения модельных климатических индексов по данному сценарию существенно занижены. (см. рисунок 3.3б). Ряд интегральных климатических индексов, рассчитанный по модельным значениям сценария H-REF, на всем интервале более близок к фактическим значениям (рисунок 3.3а).

В данных сценария E-REF есть весомое отличие с данными сценария H-REF и фактическими гидрометеорологическими данными. Сценарий E-REF значительно занижает площади ледового покрова Балтийского моря, но при этом температуры воды и воздуха близки как к фактическим данным, так и к модельным данным для сценария H-REF (разница значений варьируется в пределах 1 °C). Возможной причиной таких различий является значительное повышение температуры воды в зимний период у сценария E-REF по сравнению со сценарием H-REF [18]. Так как именно это определяет формирование ледовитости моря.

Не смотря на то, что в целом за весь прогностический период до 2050

года рост значений температуры воздуха и поверхности воды в сценарии H-REF выражен более значительно, чем в сценарии E-REF, тем не менее данный сценарий выглядит более предпочтительным. Это связано не только с тем, что значения ИКЛ лучше согласуются с фактическими данными, но и с наличием в модельных рядах по данному сценарию квазигармонических колебаний (см. рисунок 3.7). Так в период 2025-2030 годы можно ожидать некоторое снижение значений климатических индексов, также прогнозируемое и статистико-вероятностными методами.

Таким образом, наиболее обоснованным является вариант сценария с продолжительной стабилизацией климатических условий в пределах незначительного диапазона повышения по температуре, солености, который будет характерен на протяжении ближайших двух десятилетий. При этом ежегодные колебания могут быть достаточно значительны, но в среднем будет происходить выход на «плато» с небольшой амплитудой колебаний (с меньшей, чем была в предыдущие периоды, когда изменения характеристик наблюдались с выраженным трендом).

## Заключение

Была проанализирована существующая информация о климате Балтийского моря и о сценариях, которые рассматривались в последние десятилетия в плане будущего этого региона.

Рассчитаны интегральные климатические индексы Балтийского моря для периода с 1900 по 2018 года по фактическим данным, а также применен этот же подход к анализу данных сценарных расчетов на модели SPBEM с 1962 по 2050 год.

Сравнение показало, что для натуральных данных при увеличении длины ряда максимальные и минимальные значения ИКЛ не изменяются, в добавленный временной промежуток с 2010 по 2018 годы ИКЛ изменялся в гораздо более узком диапазоне. Результаты исследования показали, что наибольшее изменение среднегодовых значений ИКЛ наблюдалось в 2008-2010 годах и составило ~5 единиц, после 2012 года размах колебаний ИКЛ не превышал 2,6 единиц. При этом в период 2010-2018 годы абсолютные величины ИКЛ колебались относительно значения ~4 единицы. Ожидаемые тенденции снижения темпов роста и некоторая стабилизация значений ИКЛ в 2010-2020 годах, оправдались. Это позволяет считать прогноз тенденции изменения ИКЛ, сделанный на основе статистико-вероятностного подхода, на 2010-2020 годы в целом оправдавшимся.

Климатический индекс для модельных данных по сценарию E-REF до 2000 года завышен по отношению к индексам, рассчитанным по фактическим значениям температуры воды, воздуха и ледовитости. По сценарию H-REF абсолютные величины ИКЛ по сценарию «H-REF» были приблизительно равны 2 единицы. На период с 2000 по 2018 года фактические значения гидрометеорологических характеристик наиболее приближены к модельным данным полученным по сценарию H-REF, но интегральные климатические индексы различны и занижены у сценария H-REF по отношению к индексам,

рассчитанным по фактическим данным.

Вклад полиномиальных трендов, аппроксимированных полиномами 3 – 6 степеней, возрастает до ~27 – 53 % для периода с 1950 по 2018 года и возрастает до ~50-60 % для периода с 2018 года по 2050 год, что свидетельствует о значительном влиянии долгопериодной квазигармонической составляющей, присутствующей в анализируемых исходных рядах.

У ряда ИКЛ для сценария E-REF экстремумы долгопериодных квазигармоник выражены не так ярко, как для сценария H-REF и для ИКЛ по фактическим данным для периода до 2018 года. Для ряда ИКЛ по фактическим значениям в рассмотренный период моменты наступления экстремумов несколько не совпадают по времени экстремумами для ИКЛ различных сценариев, но они близки по своим максимальным значениям к значениям сценария H-REF.

Таким образом, наиболее близкие к фактическим оценки изменения климата для интервала 2010-2018 годы дал модельный расчет по сценарию H-REF. Это позволяет рекомендовать использовать именно его результаты для оценки изменений экосистемы Балтики в XXI веке. В тоже время для оценки долгопериодных тенденций изменения климата могут быть использованы и результаты прогнозирования на основе статистико-вероятностного подхода.

## Список используемой литературы

1. Linköpings universitet: [электронный ресурс]/режим доступа <https://liu.se/nyhet/ostersjon-visar-vagen-for-varldshaven-> – (Дата обращения: 2.05.2020).
2. КИМО: [электронный ресурс]/режим доступа <http://kimocon.ru/kimo2020/> – (Дата обращения: 10.01.2020).
3. Рожков В.А., Смирнова А.И., Терзиев Ф.С. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Балтийское море. Гидрометеорологические условия. - Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992 г., том 3, выпуск 1, 447 стр.
4. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. – Москва: Изд-во Московского ун-та, 1982 г., 146 стр.
5. Зенкевич Л. А. Биология морей СССР. - Ленинград: Гидрометеоиздат, 1963 г., 739 стр.
6. Зенкевич Л.А. Моря СССР. Их флора и фауна. – Москва: Государственное учебно-педагогическое издательство Наркомпроса РСФСР, 1956 г., 424 стр.
7. Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. Москва: ИГ-СОЦИН, 2014 г., 608 стр.
8. ВАСС II Author Team. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. [Jurnal]. Regional Climate Studies. Springer, 2015 year, 515 p.
9. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin.- Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, 2015 year, 515 p.
10. Думанская И.О. Типовые ледовые условия на основных судоходных

- трассах морей европейской части России для зим различной суровости. – Москва: Гидрометеорологический научно-исследовательский Центр Российской Федерации, 2013 г., 166 стр.
11. Бетин В.В., Преображенский Ю.В. Суровость зим в Европе и ледовитость Балтики. - Л.: Гидрометеоздат, 1962г., 110 стр.
  12. ФГБУ "ААНИИ": [электронный ресурс]/режим доступа <http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=17> – (Дата обращения: 14.04.2020).
  13. ЕСИМО: [электронный ресурс]/режим доступа [http://esimo.oceanography.ru/esp1/index.php?menu\\_code=4579&sea\\_code=1&section=6](http://esimo.oceanography.ru/esp1/index.php?menu_code=4579&sea_code=1&section=6) – (Дата обращения: 7.03.2020).
  14. ICES. Report of the Ecosystem Overviews. Baltic Sea Ecoregion – Ecosystem overview. - Copenhagen, Denmark, 2019 year, 154 p.
  15. Solomon S., Qin D., Manning M., Z. Chen. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. - Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2007, 378 стр. Режим доступа: [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/)
  16. Лебедев А.А., Миронов Е.У. Особенности изменчивости ледовых условий Балтийского моря, Финского залива и Белого моря в связи с глобальным потеплением [Журнал]. – Санкт-Петербург: Проблемы Арктики и Антарктики, 2008 г., №3, 141 стр.
  17. Фролов А.В. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – Москва: Росгидромет, 2014г., 61 стр.
  18. Рябченко В.А., Карлин Л.Н., Исаев А.В., Ванкевич Р.Е. Оценка развития эвтрофикации в Балтийском море в будущем климате [Журнал]. Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения

- и перспективы. Труды Всероссийской конференции. 2017г., 419 стр.
- 19.Meier, Н.Е.М. Климат Балтийского моря в конце XXI века: динамический подход к масштабированию с использованием двух глобальных моделей и двух сценариев выбросов. [Jurnal]. *Climate Dynamics*, 2006 year, volume 27, 68 p.
- 20.SMHI: [электронный ресурс]/режим доступа <http://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/klimatscenarioer-for-hav#scenario=rcp85,season=year,param=temperature> – (Дата обращения: 20.05.2020).
- 21.Belkin, I. M. Rapid warming of large marine ecosystems. Prog. Oceanogr. 2009 year, 213 p.
- 22.ECOSUPPORT. BALTEX. The Baltic Sea Experiment: [электронный ресурс]/режим доступа <https://www.baltex-research.eu/ecosupport/> – (Дата обращения: 20.02.2020).
- 23.Вестман А.В. Современные проблемы Балтийского моря [Журнал]. Современные научные исследования и инновации, 2016 г., №3, 47 стр.
- 24.Терзиев Ф.С. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Балтийское море. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. - Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1994 г., том 3, выпуск 2, 521 стр.
- 25.Антонов А.Е. Крупномасштабная изменчивость гидрометеорологического режима Балтийского моря и ее влияние на промысел. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1987 г., 247 стр.
- 26.Mika Raateoja, Out Setälä. Оценка Финского залива. Доклад Финского института окружающей среды. Финский Институт Окружающей Среды, 2016 г., 363 стр.
- 27.Бойцов В.Д. Изменчивость температуры воды в Баренцевом море и ее прогнозирование. - Мурманск: ПИНРО, 2006 г., 292 стр.
- 28.Хаймина О.В, Бойцов В.Д., Карпова И.П. Вековые колебания климата

- морей северо-запада России [Журнал]. Ученые записки РГГМУ, 2012 г., № 24, 74 стр.
29. International Research Institute [электронный ресурс]/режим доступа [http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/.Diagnostic/.above\\_ground/.temp/](http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/.Diagnostic/.above_ground/.temp/) – (Дата обращения: 21.11.2019).
30. International Research Institute [электронный ресурс]/режим доступа <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.ERSST/.version5/.sst/T/> – (Дата обращения: 21.11.2019).
31. Неелов И.А., Еремина Т.Р., Исаев А.В., Рябченко В.А. Моделирование экосистемы Финского залива с помощью трехмерной модели. - Труды Эстонской Академии наук, 2003 г., № 52, 359 стр.
32. Marshall J., Adcroft A., Hill C., Perelman L., Heisey C. A finite-volume, incompressible navier-stokes model for studies of the ocean on parallel computers [Jurnal]. Geophys. 1997 year, 102 p.
33. Marshall J., Hill C., Perelman L., Adcroft A. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling [Jurnal]. Geophysical. 1997 year, 102 p.
34. Владимирова О. М., Еремина Т. Р., Исаев А. В., Рябченко В. А., Савчук О. П. Моделирование растворенного органического вещества в Финском заливе [Журнал]. Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018 г., Т. 11, № 4, 101 стр.
35. Baltic Environmental Database. Baltic Nest Institute, Stockholm University. <http://nest.su.se/bed> (Accessed on 5 Apr 2018).
36. HELCOM. Updated Fifth Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC-5.5). [Jurnal]. Baltic Sea Environment Proceedings. Helsinki Commission Baltic Marine Environment Protection Commission. 2015 year, N 145, 124 p.
37. Gustafsson E., Savchuk O. P., Gustafsson B. G., Muller-Karulis B. Key processes in the coupled carbon, nitrogen, and phosphorus cycling of the Baltic Sea [Jurnal]. Biogeochemistry. 2017 year. № 134. 317 p.
38. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической

- информации. [Учебник].- Санкт-Петербург: РГГМУ, 2008г., 408 стр.
- 39.Аверкиев А.С., Булаева В.М., Густоев Д.В., Карпова И.П. Методические рекомендации по использованию метода сверхдолгосрочного прогнозирования гидрометеорологических элементов (МСПГЭ) и программного комплекса «Призма». - Мурманск: ПИПРО, 1997 г., 40 стр.
- 40.Эйлола К., Mårtensson S., Meier, Н.Е.М. Моделирование влияния сокращенного морского ледового покрова в будущем климате на биогеохимию Балтийского моря .Том 40, Выпуск 1 [Jurnal]. Geophysical Research,2013 year, volume 40, № 1,154 p.
- 41.CORDEX: [электронный ресурс]/режим доступа <https://cordex.org/publications/report-and-document-archives/> – (Дата обращения: 7.05.2020).
- 42.SMHI: [электронный ресурс]/режим доступа <http://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/klimatscenarioer/info/haag> – (Дата обращения: 20.05.2020).