



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра океанологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(магистерская диссертация)

«Исследование изменчивости ледовитости Арктических морей»

Исполнитель: Бойко Анастасия Игоревна

Руководитель: к. г. н, Шевчук Олег Игоревич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Густоев Дмитрий Владимирович

(фамилия, имя, отчество)

«14» 06 2024 г.

г. Санкт-Петербург

2024

Оглавление

Введение	2
1. Характеристика объекта исследования.	3
1.1 Географическое положение.	3
1.2 Характеристика исследуемых морей.....	6
1.3 Рельеф	11
1.4 Климат.....	13
1.5 Арктический морской лед	15
2. Материалы и методы.	18
2.1 Материалы.	18
2.2. Статистические методы исследования.	19
2.2.2. Корреляционный анализ.	19
2.2.3. Множественная линейная регрессия	20
2.2.4. Гармонический анализ.	21
3. Исследование изменчивости ледовитости Арктического бассейна... 23	
3.1 Межгодовой ход ледовитости морей Северного Ледовитого океана и других исследуемых характеристик.	23
3.2 Оценка корреляционной связи площади морского льда и исследуемых характеристик.	31
3.3 Гармонический анализ	32
3.4 Множественная линейная регрессия	45
Заключение.....	56
Список литературы.....	60

Введение

Изменение климата на Земле ставит под угрозу экосистемы по всему миру, и полюса, особенно Арктика, являются особыми точками в этом процессе. Летом морской лед в Арктике значительно сократился по сравнению с предыдущими десятилетиями, что свидетельствует о нарастающем воздействии глобального потепления. В то время как атмосферное потепление над Арктикой усиливается, изменения в океане менее заметны из-за его большей инерции. Однако уже наблюдается влияние изменения климата на Северный Ледовитый океан, и, вероятно, этот процесс только усилится в будущем. Арктический морской лёд не только служит индикатором изменений климата, но и играет ключевую роль в важных обратных связях в земной климатической системе [1].

В следствие глобального потепления климата происходят изменения ледяного покрова Арктики в последние десятилетия. В некоторых источниках [14] указывают на тот факт, что в течение последних 50 лет Северный Ледовитый океан прогревается в два раза быстрее, чем остальная часть Земли. Исходя из этого, к концу 2030-х годов Северный ледовитый океан, в летнее время года, может быть в большей степени свободен от морского льда, чем на данный момент. В этом есть некоторый плюс – судоходство в Арктике будет более жизнеспособным в месяцы, когда сокращения ледового покрова максимальны.

Объект исследования: моря Арктического бассейна.

Целью данной работы является исследование изменчивости ледовитости Северного Ледовитого океана в условиях изменяющегося климата.

Задачи:

1. Исследование климатических особенностей исследуемых морей Северного Ледовитого океана.
2. Анализ межгодового хода ледовитости, температуры воздуха и Атлантической мультидекадной осцилляции.
3. Гармонический анализ.
4. Анализ множественной линейной регрессии.

1. Характеристика объекта исследования.

1.1 Географическое положение.

Северный Ледовитый океан является обширной акваторией в северной части Земли, омывающей Северный полюс. Это один из пяти основных океанов нашей планеты, известный своими значительными ледяными покровами, которые сохраняются большую часть года. Арктический климат региона характеризуется холодными зимами и прохладными летними месяцами. Местная экосистема богата разнообразными морскими обитателями, такими как белые медведи, тюлени, моржи, морские птицы и рыбы. Северный Ледовитый океан также имеет стратегическое и экономическое значение благодаря значительным запасам природных ресурсов, включая нефть, газ и минералы.

Расположенный между Европой, Азией и Северной Америкой, Северный Ледовитый океан простирается в основном к северу от Полярного круга и включает несколько морей, таких как Баренцево море, Белое море, Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, Чукотское море, Берингово море, море Баффины, море Бофорта, Норвежское и Гренландское море. Северный Ледовитый океан изолирован от других частей Мирового океана, соединяясь через узкий Берингов пролив с Тихим океаном и через Девисов, Фарерско-Исландский, Фарерско-Шетландский и Датский проливы с Атлантическим океаном. Площадь этого океана составляет 15,558 миллиона квадратных километров, а его объем достигает 18,07 миллиона кубических километров, что эквивалентно примерно 4% площади и 1,35% объема всего Мирового океана. Максимальная глубина Северного Ледовитого океана достигает 5527 метров, расположенная в северо-восточной части Гренландского моря. Шельфовая зона, где глубины не превышают 200 метров, покрывает 39,6% общей площади океана.



Рисунок 1. Карта Северно-Ледовитого океана [2].

Климат Арктики формируется в условиях значительно меньшего притока тепла от Солнца, чем климат неполярных областей. Отчасти дефицит восполняется внутренними термодинамическими процессами, протекающими как в климатической системе в целом, так и в морской Арктике. Наибольший вклад в потепление арктического климата по сравнению с гипотетическим климатом при неподвижной и прозрачной атмосфере вносит перенос тепла по направлению к полюсу. Благодаря этому процессу климат Арктики в районе

Северного полюса «теплее» почти на 60 К по сравнению с климатом при отсутствии адвекции, в то время как парниковый эффект атмосферы повышает приповерхностную температуру воздуха здесь на более чем в два раза меньшую величину [16].

В состав Северного Ледовитого океана входят следующие моря:

1. Баренцево море: Расположенное между Норвегией и Россией, на северо-западе оно связано с Белым морем через морской пролив.
2. Белое море: Расположенное на северо-западе России, оно омывает берега России и Шпицбергена.
3. Карское море: Расположенное между островами Земля Франца-Иосифа и Новая Земля, это море находится на севере России.
4. Море Лаптевых: Расположенное в восточной части Северного Ледовитого океана, омывает берега Сибири.
5. Восточно-Сибирское море: Расположенное на северо-востоке России, оно находится между Сибирским побережьем и островом Северный Земля.
6. Чукотское море: Расположенное между Чукоткой (Россия) и Аляской (США), оно соединяется с Беринговым морем через Берингов пролив.
7. Море Баффина и Бофорта: Расположенное в западной части Северного Ледовитого океана, омывает берега Канады и Гренландии.
8. Норвежское море: Расположенное на северо-западе Европы, оно соединяется с Северным Ледовитым океаном через Фарерские и Норвежские моря.
9. Гренландское море: Расположенное на северо-западе Атлантического океана, оно находится между Гренландией и островами Канады.
10. Берингово море, хоть оно и относится к бассейну Тихого океана: Расположенное между Чукоткой (Россия) и Аляской (США), оно соединяется с Тихим океаном через Берингов пролив.

Эти моря образуют комплексный гидрографический образец, который составляет Северный Ледовитый океан.

1.2 Характеристика исследуемых морей.

1.2.1. Баренцево море

Баренцево море — это северное море, омывающее северные области России и побережье Норвегии. Оно расположено между Скандинавским и Кольским полуостровами. Площадь Баренцева моря составляет около 1,4 миллиона квадратных километров, а средняя глубина — примерно 230 метров. Море названо в честь голландского мореплавателя Виллема Баренца, который исследовал этот регион в конце XVI века.

Баренцево море имеет важное значение для рыбной промышленности и судоходства, особенно в контексте транспортировки нефти и газа. Основные порты на его побережье — Мурманск в России и Киркенес в Норвегии. Климат в районе Баренцева моря арктический, с холодными зимами и прохладным летом. Ледовый покров существенно изменяется по сезонам, достигая минимального уровня в августе-сентябре и максимального в феврале-марте. Баренцево море также известно своим богатым биоразнообразием, включающим обильные рыбные запасы, морских млекопитающих и разнообразные виды птиц.

1.2.2. Карское море

Карское море представляет собой значительную часть Северного Ледовитого океана, расположенную на севере России между архипелагом Земли Франца-Иосифа и Новой Землей. В его состав входит Карская впадина, одна из самых глубоких частей Северного Ледовитого океана.

Площадь Карского моря составляет примерно 900 тысяч квадратных километров. Море отличается сложной гидрологической структурой, включающей множество проливов, заливов и островов. Благодаря воздействию

теплых атлантических вод зимой море слабо замерзает, что позволяет сохранять судоходство в течение большей части года.

Климат прибрежных зон Карского моря арктический, характеризующийся холодными зимами и прохладными летами. Весной и летом температуры повышаются, но остаются относительно низкими из-за близости к полярному региону. Карское море является важным районом для рыболовства, богатым треской, минтаем, палтусом и другими видами. Оно также играет ключевую роль в добыче нефти и газа, с множеством месторождений на его шельфе, которые активно эксплуатируются в последние годы.

Карское море является домом для различных морских видов, включая тюленей, моржей, белых медведей и морских птиц. Однако уязвимость этого региона к изменениям климата и глобальному потеплению представляет угрозу для его экосистемы и биоразнообразия в будущем.

1.2.3. Море Лаптевых

Море Лаптевых, расположенное в северо-восточной части России между Землей Святого Сергия и Новосибирскими островами в Северном Ледовитом океане, является важным географическим объектом. Оно названо в честь русского мореплавателя и исследователя Дмитрия Лаптева, который открыл этот регион в XVIII веке.

Общая площадь моря Лаптевых составляет около 662 тысяч квадратных километров, а средняя глубина — приблизительно 50 метров. Одной из характерных особенностей моря являются приливы, которые могут достигать значительных высот, особенно на северном побережье, что делает его объектом активного изучения приливных явлений.

Климат в прибрежных районах Моря Лаптевых арктический, с суровыми зимами и прохладными летами. Зимой море замерзает, но начало ледохода может варьироваться в мае-июне в зависимости от погодных условий. Летом лед полностью тает, открывая водную поверхность для судоходства.

Море Лаптевых является важной частью арктического бассейна, богатого морскими ресурсами, включая рыбные запасы, а также месторождения нефти и газа. Кроме того, оно является домом для множества морских животных, таких как тюлени, моржи, белые медведи и морские птицы.

1.2.4. Восточно-Сибирское море

Восточно-Сибирское море, также известное как Лаптево, является частью Северного Ледовитого океана и расположено на северо-востоке России, между Таймырским полуостровом и Новосибирскими островами. Оно омывает берега Якутии и острова Таймырского архипелага.

Площадь Восточно-Сибирского моря составляет около 360 тысяч квадратных километров. Этот регион отличается суровым климатом и небольшой глубиной по сравнению с другими морями Северного Ледовитого океана. Средняя глубина составляет около 100 метров, а максимальная — 105 метров.

Климат в прибрежных зонах арктический, с холодными зимами и прохладными летами. Зимой море замерзает, что делает его непригодным для судоходства. Ледоход обычно начинается в мае-июне и продолжается до сентября-октября.

Восточно-Сибирское море является важным рыболовным районом, богатым разнообразными видами рыбы, такими как треска, минтай и палтус. Этот регион также является домом для различных видов морских животных, включая тюленей, моржей и морских птиц.

1.2.5. Чукотское море

Чукотское море, являясь частью Северного Ледовитого океана, расположено между северо-восточной Россией и западной частью Аляски (США), омывая Чукотский полуостров и Аляску. Оно соединено с Беринговым морем через

Берингов пролив и играет важную роль в торговых путях между Северной Азией и Северной Америкой.

Площадь Чукотского моря составляет примерно 595 тысяч квадратных километров. Этот регион богат биоразнообразием и имеет значительное значение для рыболовства, морской транспортировки и экономического развития.

Климат в прибрежных районах арктический, с холодными зимами и прохладными летами. Зимой море замерзает, образуя ледяные поля, которые летом распадаются. Ледоход начинается в апреле-мае и заканчивается в сентябре-октябре

Чукотское море известно своими богатыми рыбными ресурсами, включая треску, минтай, лосось и другие виды. Это также место обитания многих морских млекопитающих, таких как тюлени и моржи, и различных видов морских птиц.

1.2.6. Берингово море

Берингово море, расположенное между Северо-Восточной Азией и Западным побережьем Северной Америки, соединяется с Тихим океаном через Берингов пролив. Общая площадь этого моря оценивается примерно в 2 миллиона квадратных километров, и оно предлагает разнообразие глубин от неглубоких до глубоководных участков, достигающих нескольких километров в глубину.

Одной из характеристик Берингова моря является его умеренный климат, обусловленный влиянием Тихого океана. По сравнению с другими северными морями, здесь зимы не так суровы, а лето более мягкое. Однако сильные ветры и приливы могут представлять трудности для мореплавания.

Это море богато биологическим разнообразием, что делает его ключевым регионом для рыболовства и морской промышленности. В его водах обитают

различные виды рыбы, включая лосося, минтая и камбалу, а также множество морских млекопитающих, таких как тюлени, моржи и киты.

1.2.7. Моря Бофорта и Баффина

Моря Бофорта и Баффина расположены в западной части Северного Ледовитого океана, между Канадой и Гренландией.

Море Баффина простирается к востоку от Гренландии и к западу от острова Баффин, занимая площадь около 1,45 миллиона квадратных километров. Его глубина превышает 3 километра, и зимой часто замерзает, но ледоход обычно начинается в конце весны и продолжается до середины лета.

Море Бофорта находится на северо-западе Атлантического океана, к северу от острова Баффин, и имеет площадь около 537 тысяч квадратных километров. Его глубина сравнительно невелика, не превышая 800 метров. Климат в этом регионе суровый, с холодными зимами и прохладными летами, а также характеризуется ветрами и сильными приливами.

Оба эти моря играют важную роль в рыболовстве и морских перевозках. Они богаты разнообразными видами рыбы, такими как треска, камбала, лосось и другие, а также служат жилищем для различных морских млекопитающих, включая китов и тюленей.

1.2.9. Гренландское море

Гренландское море расположено к северу от Гренландии и югу от архипелага Земли Франца-Иосифа и Шпицбергена, входя в состав Северного Ледовитого океана. Этот арктический регион окружен землями и островами, включая Гренландию и некоторые другие меньшие острова, и архипелаги.

Гренландское море имеет площадь около 2 миллионов квадратных километров и подчинено переменчивому климату с холодными зимами и

прохладными летами. Зимой море обычно покрывается толстым слоем льда, который может сохраняться до лета, делая его непроходимым для судоходства.

Этот регион является ключевым для исследования арктической экосистемы и климатических изменений. Здесь обитает множество видов морских животных, таких как киты, тюлени, моржи и морские птицы. Гренландское море также важно для рыболовства, особенно для добычи трески и других коммерчески важных видов рыбы.

1.3 Рельеф

С конца 19 века, когда норвежский исследователь Фритьоф Нансен впервые открыл океан в центральной части Арктики, до середины 20 века считалось, что Северный Ледовитый океан представляет собой единый большой бассейн. Исследования после 1950 года выявили истинную сложную природу океанского дна. Северный Ледовитый океан не является единым бассейном, а состоит из двух основных глубоких бассейнов, которые разделены на четыре меньших бассейна тремя трансокеанскими подводными хребтами. Центральный из этих хребтов простирается от континентального шельфа у острова Элсмир до Новосибирских островов на расстояние 1770 км. Этот огромный подводный горный массив был открыт советскими учёными в 1948–49 годах, о нём сообщалось в 1954 году. Он назван Ломоносовским хребтом в честь учёного, поэта и грамматика Михаила Васильевича Ломоносова [4].

Рельеф дна Северного Ледовитого океана (СЛО) образован характерными типами морфоструктур планетарного масштаба: погружённой окраиной Евразийского и Североамериканского материков, которая состоит из шельфа, материкового склона и материкового подножья, системой глубоководных котловин и поднятий ложа океана, а также срединно-океаническим хребтом Гаккеля. Хребет Ломоносова разделяет ложе океана на два бассейна: Евразийский и Амеразийский. Для всех морфоструктур СЛО характерно

расположение в определённом диапазоне глубин, резко отличном от таковых в других океанах Земли, что отражает специфику их происхождения и развития. Рассмотрены особенности строения рельефа дна. Наряду со структурами, для которых можно чётко установить геодинамическую природу рельефа (спрединговая природа Евразийской и Амеразийской котловин и хребта Гаккеля, сложенных океанической корой, континентальная природа коры хребта Ломоносова), имеется немало структур, морфология которых, а также геофизические данные пока не позволяют сделать однозначные выводы о природе их происхождения и особенностях эволюции.

Ложе океана разделяется хребтом Ломоносова на два субширотных бассейна: Евразийский (включает глубоководные котловины Амундсена, Нансена и разделяющий их срединно-океанический хребет Гаккеля) и Амеразийский (включает глубоководные котловины Макарова, Подводников, Канадскую и разделяющий их хребет Альфа-Менделеева). В глубоководной океанической части СЛО острова отсутствуют, в то время как шельф изобилует островами (рис. 2) [6].

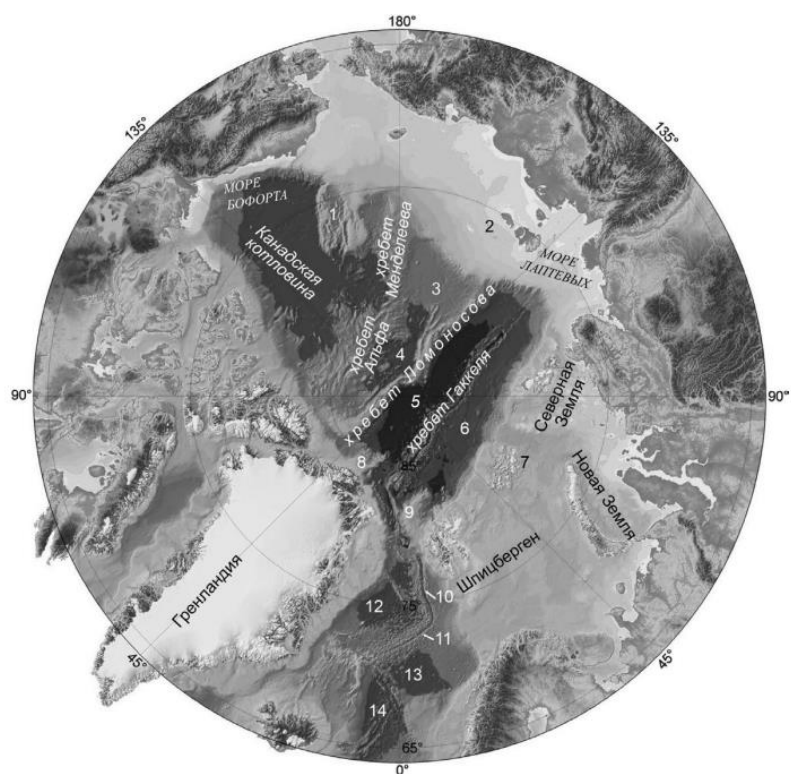


Рисунок 2. Батиметрическая карта Северного Ледовитого океана [6]. Цифрами обозначены: 1 – Чукотское плато и поднятие Нортвинд, 2 – Новосибирские острова, 3 – котловина Подводников, 4 – котловина Макарова, 5 – котловина Амундсена, 6 – котловина Нансена, 7 – Земля Франца-Иосифа, 8 – плато Моррис-Джесуп, 9 – плато Ермак, 10 – хребет Книповича, 11 – хребет Мона, 12 – Гренландская котловина, 13 – Лафотенская котловина, 14 – Норвежская котловина.

1.4 Климат.

Климат Арктики имеет большое значение для глобального климата и экосистемы, и его изучение важно для понимания изменений в масштабе всей планеты.

Уменьшение площади морского льда в Арктике за последнее десятилетие происходит быстрее, чем в предыдущие двадцать лет. Уменьшение площади морского льда происходит быстрее, чем было предсказано моделями, использованными при подготовке 4-го оценочного доклада МГЭИК. Площадь не растаявшего летом морского льда (многолетний лед) каждый год начиная с 2001 г. была равна или близка к рекордно низким уровням. В настоящее время это значение на треть меньше среднего значения для морского льда в период с 1979 по 2000 гг. Новые наблюдения показывают, что средняя толщина морского льда уменьшилась, и ледовый покров представлен в основном более молодым и более тонким льдом.

Климатические модели предсказывают еще бóльшие изменения. Средние температуры в Арктике в осенние и зимние месяцы, даже если удастся сократить масштабы выбросов углекислого газа в атмосферу в течение ближайшего десятилетия, все равно поднимутся на 3—6°C к 2080 г [7].

Прогнозируется, что количество осадков в виде снега и дождя увеличится в течение всего года, но особенно зимой. Несмотря на это, предполагается, что

арктические территории станут более засушливыми в летнее время. Это связано с тем, что более высокая температура воздуха вызовет большее испарение воды, снег начнет таять раньше, и водный режим изменится.

Также прогнозируется, что в ближайшие десятилетия толщина морского льда и площадь распространения морского льда летом продолжат снижаться, несмотря на то что значительные колебания будут наблюдаться от года к году. Предполагается, что к середине столетия Северный Ледовитый океан окажется практически полностью свободным ото льда в летние периоды. Это значит, что больше не будет постоянного присутствия толстого многолетнего льда. Климатические модели прогнозируют снижение массы горных ледников и ледяных шапок на 10—30% к концу столетия. Предполагается, что таяние ледяного щита Гренландии будет происходить быстрее, чем это происходит сейчас, однако в настоящее время не существует моделей, которые могли бы точно предсказать, как эти и другие массивы материкового льда Арктики отреагируют на прогнозируемые изменения климата. Это обусловлено тем, что до сих пор нет полного понимания динамики льда и комплексного взаимодействия между океаном, снегом, льдом и атмосферой.

Изменения в криосфере вызывают фундаментальные изменения арктических экосистем. Изменения в толщине и структуре снежного покрова оказывают влияние на почву, растения и животных. Некоторые виды, такие как короткоклювый гуменник, выиграют от уменьшения снежного покрова весной. Однако животные, которые пасутся на заснеженных пастбищах, пострадают, если дожди в зимнее время создадут на снегу ледяную корку. Такое явление все чаще наблюдается на севере Канады и в Скандинавии. Меньший снегозапас и более быстрое таяние снега являются причиной летней засухи в лесах, на заболоченных территориях и на озерах, питающихся талой водой. Тающая вечная мерзлота также ведет к осушению и высыханию заболоченных территорий в одних местах и их появлению в других. Исчезновение ледяного покрова на реках, озерах и морях изменит животные и растительные сообщества, обитающие в водной среде. Исчезновение больших пространств, покрытых

морским льдом, нанесет большой экологический ущерб видам, приспособленным к жизни на льду, в том числе белым медведям, тюленям, моржам, нарвалам и некоторым микробным сообществам. Многие животные, в том числе гренландские киты, зависят от мелких ракообразных, обитающих у морского льда. В данном источнике пищи произойдут изменения, если граница льда отступит. Подобные изменения в экосистемах окажут прямое воздействие на водоснабжение, поставки рыбы и леса, традиционное питание и пастбищные угодья, используемые жителями арктических территорий. Например, предполагалось, что популяции субарктических и арктических видов рыбы (включая ценные промысловые) могут измениться, если морской лед отступит. Неопределенность в отношении снабжения живыми природными ресурсами делает затруднительным планирование на будущее. Таяние вечной мерзлоты может оказать положительное воздействие на лесные массивы в тех районах, где достаточно воды для роста деревьев, однако насекомые-вредители создают все больше проблем. Численность некоторых животных, являющихся объектами охоты, таких как тюлени и моржи, снижаются по мере изменения условий обитания. Другие мигрируют на новые места обитания, поэтому охотникам приходится преодолевать большие расстояния [7].

1.5 Арктический морской лед

Цикл морского льда:

Морской ледяной покров имеет естественный цикл вследствие периодических изменений падающей солнечной радиации в высоких широтах. С наступлением холодного сезона температура воздуха начинает быстро падать. Это приводит к положительному температурному градиенту от океана к окружающему воздуху, что приводит к прямой потере явного тепла из верхних слоев океана. Динамическая неустойчивость в верхних метрах океана возникает вследствие изменений плотности, вызванных охлаждением, и вертикальное

перемешивание сохраняется до тех пор, пока значительный слой верхней толщи воды не приблизится к однородной температуре. Как только температура замерзания океана достигает $-1,9^{\circ}\text{C}$, структуры морского льда начинают формироваться, и во время этого процесса солевой раствор (рассол) выбрасывается в океан, еще больше увеличивая его плотность. Однако если перемешивание происходит достаточно глубоко, поверхностные воды могут не достичь температуры замерзания из-за смешивания с более теплыми водами на промежуточных глубинах, и образования морского льда не произойдет [8].

После первоначального образования осенью, морской лед продолжает свой рост в течение зимних месяцев, увеличиваясь как в вертикальной, так и в горизонтальной протяженности. Его структура становится весьма сложной и разнообразной, включая гряды, талые пруды, подводы и полыньи. Площадь морского льда достигает максимума к концу зимы. Постепенно увеличивается солнечная радиация весной, и начинается процесс таяния, который продолжается до следующего сезона похолодания. Если весь морской лед тает, в данном районе образуется однолетний лед. Однако если морской лед остается до конца теплого сезона, формируется многолетний (многолетний) ледяной покров. Основные различия между ними касаются вертикального роста и шероховатости поверхности.

Роль морского льда в климатической системе:

Морской лед представляет собой поверхность с высокой отражающей способностью, альбедо которого варьируется от 50% до 70%. Альбедо — это мера отражательной способности поверхности, которая может быть даже выше, если присутствует снежный покров. Более толстый ледяной покров поддерживает больший слой снега, и эта система может отражать до 90% солнечной энергии. Кроме того, он действует как изолятор между океаном и атмосферой и, следовательно, ограничивает потоки тепла и импульса на этой границе. Если атмосфера или океан нагреваются (выше температуры таяния), морской лед тает, и, поскольку открытая поверхность океана имеет гораздо более низкое альбедо, чем морской лед, общее альбедо полярных областей

уменьшается. Поверхность океана с низким коэффициентом отражения поглощает дополнительное тепло, что приводит к серьезным изменениям в региональном радиационном равновесии и дальнейшему таянию морского льда. Описанные процессы представляют собой так называемый механизм обратной связи по альбедо льда и считаются основной причиной нелинейных изменений в полярных регионах. Изменения плотности океана, вызванные циклом морского льда, являются важными процессами для местной стратификации океана и глобальной океанической циркуляции [5].

2. Материалы и методы.

2.1 Материалы.

В качестве исходных данных о площади льда по морям Арктического бассейна была выбрана база данных National Centers for Environmental Information (NCEI) и National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), которая располагается по адресу: <https://www.ncei.noaa.gov/> . В данной базе данных были взяты ежемесячные данные площади льда в млн км², временной промежуток которого составил с января 1979 по декабрь 2023 года.

Также, в настоящей работе исследуется связь между площадью льда и Атлантической Мультидекадной Осцилляцией.

Атлантическая мультидекадная осцилляция (АМО) — это своеобразный климатический маркер, отражающий изменения в температуре поверхности воды в северной части Атлантического океана в течение длительных периодов, обычно в пределах десятилетий. Этот показатель стал объектом внимания многих исследователей, так как он имеет значительное влияние на климатические условия в Северной Америке и Европе. АМО влияет на уровень осадков, температуру и даже частоту ураганов.

Этот феномен, по-видимому, связан с циклическими изменениями в циркуляции океанских вод и температуре в различных слоях воды в северной части Атлантического бассейна. Изучение АМО помогает ученым лучше понять долгосрочные тенденции климата и предсказать возможные погодные аномалии в будущем. Временные ряды значений индекса АМО, за период с января 1979 по январь 2023г представлены в [9]

Также в данной работе используется глобальная температура воздуха (HadCRUT5) на сетке 5° на 5 ° с временным промежутком с января 1979 по

декабрь 2023 года из базы данных Climate Research Unit (University of East Anglia), адрес: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>,

В работе анализировались данные для следующих арктических морей: Баренцева, Бофорта, Баффина, Берингова, Восточно-Сибирского, Чукотского, Гренландского, Карского и Лаптевых.

2.2. Статистические методы исследования.

В качестве методов исследования изменчивости ледовитости арктических морей были использованы: корреляционный и гармонический анализы и модель множественной линейной регрессии.

2.2.2. Корреляционный анализ.

Корреляционный анализ – это статистический метод, применяемый для изучения взаимосвязи между двумя или более переменными. Его основная цель – определить, существует ли связь между этими переменными, а также оценить силу и направление этой связи.

Одним из наиболее распространенных показателей корреляции является коэффициент корреляции Пирсона, который измеряет линейную зависимость между двумя переменными. Его значения могут варьироваться от -1 до 1. Значение, приближенное к 1, указывает на сильную положительную корреляцию – когда значения одной переменной растут, значения другой переменной также увеличиваются. Значение, приближенное к -1, свидетельствует о сильной отрицательной корреляции – увеличение значений одной переменной сопровождается уменьшением значений другой переменной. Коэффициент, близкий к нулю, указывает на отсутствие корреляции между переменными. Итак, для определения и оценки взаимосвязи между двумя или несколькими переменными используется корреляционный анализ. Коэффициент корреляции r

– количественная мера, которая характеризует степень тесноты линейной зависимости.

Для исследования нескольких переменных во всех сочетаниях используется корреляционная матрица. Чтобы оценить степень связи между переменными нужно сделать проверку коэффициента корреляции на значимость: формулируется нулевая гипотеза $H_0: r = 0$ и альтернативная $H_1: r \neq 0$.

Далее выбирается критерий Стьюдента, который рассчитывается по формуле:

$$t^* = \frac{|r|}{\sigma_r}, \quad \sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{N-2}},$$

где σ_r – средняя квадратическая погрешность расчета коэффициента корреляции.

После этого нужно определить критическое значение $t_{кр}(\alpha, v)$, где α (уровень значимости) принимается равным 5%, а v (число степеней свободы) = $N-2$, где N – длина исследуемого ряда.

Следом сравнивается t^* и $t_{кр}$:

- в случае, когда $t^* > t_{кр}$ нулевая гипотеза отвергается, т.е. коэффициент корреляции значим и между двумя исследуемыми переменными существует значимая связь.

- в случае, когда $t^* < t_{кр}$ нулевая гипотеза не отвергается, т.е. коэффициент корреляции незначим и связь между двумя переменными отсутствует [10].

2.2.3. Множественная линейная регрессия

Множественная линейная регрессия представляет собой статистический метод, используемый для анализа взаимосвязей между одной зависимой переменной и несколькими независимыми переменными.

Тогда общее уравнение связи переменных может быть сформулировано в виде:

$$Y = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_mX_m + b + \varepsilon,$$

где Y – зависимая переменная; X_i – i -тая независимая переменная ($i = 1 \div m$); a_i – коэффициент регрессии при i -той переменной; b – свободный член; ε – остатки модели.

Y и X_i формируют в виде матрицы исходных данных: $(m+1)$ столбцов на N строк. [10]

Основные элементы множественной линейной регрессии:

Зависимая переменная (Y):

Это переменная, которую нужно предсказать или объяснить. Её ещё называют откликом или результатом.

Независимые переменные ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$):

Переменные, используемые для предсказания значения зависимой переменной. Они также известны как предикторы или регрессоры.

2.2.4. Гармонический анализ.

В основе гармонического анализа лежит идея, что любой ряд можно разложить без остатка в ряд Фурье, т.е. на конечное число гармоник. Гармониками называются тригонометрические функции, имеющие периоды, кратные длине ряда, т.е. каждая гармоника целое число раз «укладывается» в длину исходного ряда.

Основная идея гармонического анализа заключается в разложении временных рядов на более простые составляющие, такие как синусоидальные функции.

Формула гармоники: $G_k = A_k \cos(\omega_k \cdot t - \varphi_k), \quad \omega_k = 2\pi/T_k$

где k – номер гармоники; A_k – амплитуда k -той гармоники; ω_k – частота k -той гармоники; T_k – период k -той гармоники; φ_k – фаза k -той гармоники; t – время.

Характеристики гармоники определяются на основании коэффициентов Фурье a_k и b_k :

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \sin(\omega_k \cdot t_i)], \quad b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \cos(\omega_k \cdot t_i)],$$

где x_i – исходный ряд; N – длина ряда; ω_k – частота k -той гармоники; t_i – ряд времени $t_i = i$, $i = 1, 2, 3, \dots, N$.

Характеристики гармоники определяются по формулам:

Амплитуда гармоники: $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$;

Фаза гармоники: $\varphi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k} \pm \pi$;

Дисперсия гармоники: $D_k = \frac{A_k^2}{2}$;

Вклад гармоники в общую дисперсию ряда: $V_k = \frac{D_k}{D_y}$,

где D_y – дисперсия исходного ряда.

Амплитуда гармоники показывает наибольшее отклонение характеристики от среднего значения на данном периоде [10].

3. Исследование изменчивости ледовитости Арктического бассейна.

3.1 Межгодовой ход ледовитости морей Северного Ледовитого океана и других исследуемых характеристик.

Для каждого исследуемого в данной работе моря Северного Ледовитого океана были построены графики межгодового хода ледовитости и исследуемых характеристик с 1979 по 2023 гг.

Площадь арктического морского льда испытывает значительные межгодовые колебания, но на более длинных временных масштабах зимой она почти линейно связана с температурой воздуха.

В следствие этого для исследования были выбраны 2 характеристики – температура воздуха в Северном полушарии и Атлантическая мультидекадная осцилляция. Далее представлен их межгодовой ход и тренд:

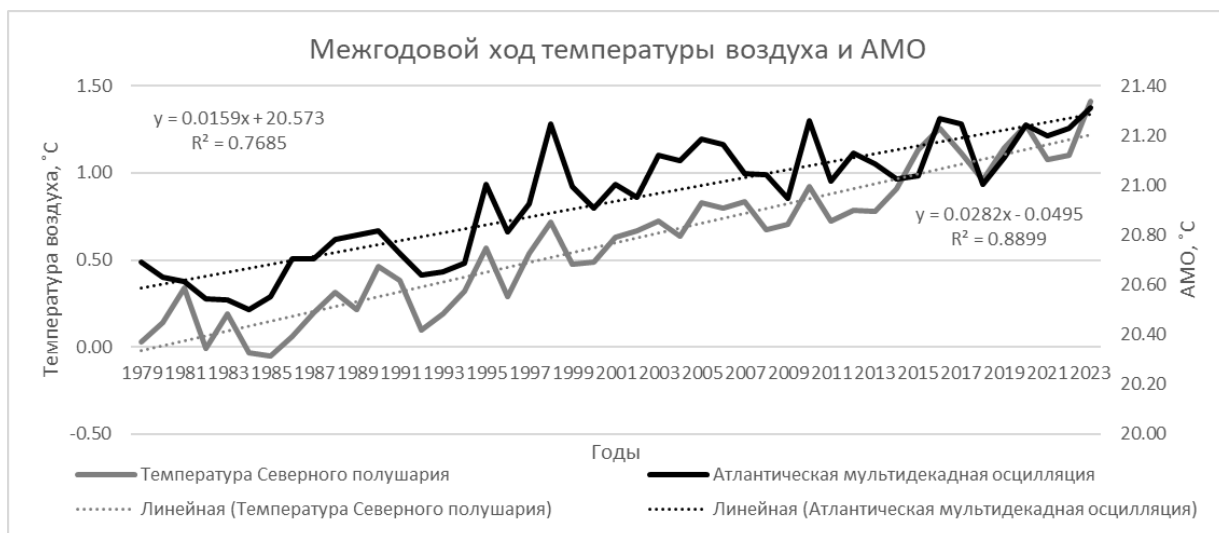


Рисунок 3. Межгодовой ход температуры воздуха в Северном полушарии и Атлантической мультideкадной осцилляции.

В обоих случаях можно заметить тенденцию на увеличение показателей и температуры воздуха и Атлантической мультideкадной осцилляции. Коэффициент линейного тренда температуры воздуха за исследуемый период с 1979 по 2023 г. составил $0,28^{\circ}\text{C}/10$ лет. Коэффициент линейного тренда АМО составил $0,16^{\circ}\text{C}/10$ лет. Вклад тренда в дисперсию исходного ряда составляет 0.77 в случае с АМО и 0.89 с температурой воздуха. Также можно отметить сходство межгодового хода температуры воздуха и АМО – почти все максимумы и минимумы практически совпадают друг с другом.

Изменение атмосферной циркуляции над Арктикой в сторону преобладания циклонического режима оказало влияние на формирование климатических аномалий в прилегающих умеренных широтах, включая аномально холодные зимы в Европе и восточной Азии. Первая такая зима с аномальными холодами в Европе была зафиксирована в 2005-2006 годах. Это произошло из-за смещения путей циклонов из Атлантики на север и усиления циклонической активности над Баренцевым и Карским морями.

Далее представлены графики ледовитости исследуемых морей СЛО:



Рисунок 4. График площади морского льда Баренцева моря.

Видим отрицательный тренд, площадь льда постепенно снижается, можно заметить пики максимумов в 1998 и 2003 г. Вклад в дисперсию ряда составляет 0.71. Коэффициент линейного тренда площади морского льда за исследуемый период с 1979 по 2023 г. составил $-0,088^{\circ}\text{C}/10$ лет.

По мнению авторов [15], потепление было вызвано значительным усилением юго-западного ветра в районе к северу от Норвегии, что привело к увеличению переноса тепла как атмосферного, так и океанического, посредством теплого Северо-Атлантического течения через проход между Норвегией и Шпицбергом в Баренцево море. Основной причиной потепления стал перенос теплой океанской воды в верхнем 125-метровом слое, что привело к заметному уменьшению ледового покрова в Баренцевом море.



Рисунок 5. График площади морского льда в Карском море.

Площадь льда Карского моря также снизилась, характер изменения ледовитости циклический с периодом в два-три года. Наиболее интенсивная динамика снижения ледовитости наблюдается с 2003 года. Коэффициент линейного тренда площади морского льда за исследуемый период с 1979 по 2023 г. составил $-0,0055^{\circ}\text{C}/10$ лет.

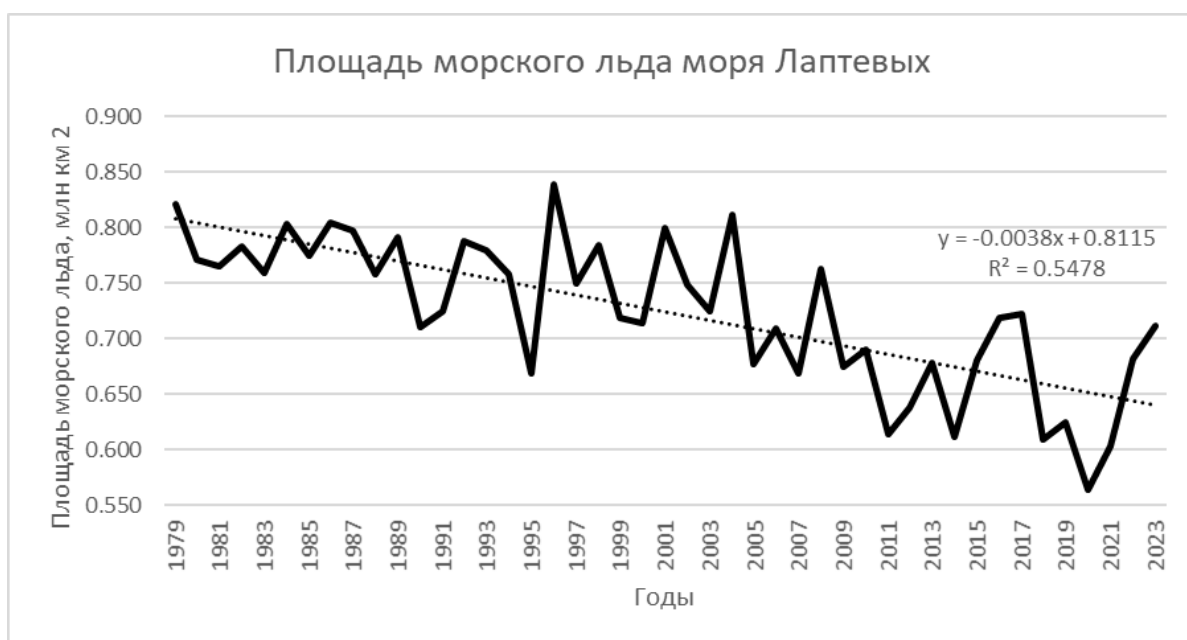


Рисунок 6. График площади морского льда в море Лаптевых.

У моря Лаптевых тренд на снижение площади морского льда меньше, вероятно, это связано с системой холодных течений, существующей в западной

части моря. Смещая большие водные массы вдоль Евразийского материка, Трансарктическое течение своей южной периферией встречается с далеко выдвинутым в океан островом Комсомолец. Здесь часть этого водного потока раздваивается, образуя Североземельское холодное течение, которое, следуя вдоль архипелага Северная Земля, встречается с островами Старокадомского и Малый Таймыр и также раздваивается. Одна его часть поворачивает к востоку, формируя циклонический кругооборот вод и льдов на севере моря Лаптевых, а другая часть, обходя острова, соединяется с течением из пролива Б. Вилькицкого, образуя Таймырское холодное течение. Именно эта система холодных течений противодействует процессу сезонного очищения моря, что отражается на возникновении положительных знаков ежедекадных трендов. Коэффициент линейного тренда площади морского льда за исследуемый период с 1979 по 2023 г. составил $-0,038^{\circ}\text{C}/10$ лет.



Рисунок 7. График площади морского льда в Восточно-Сибирском море.

Площадь льда Восточно-Сибирского моря со временем снижается, вклад в дисперсию ряда составил 0.63. На графике можно отметить два пика минимума – в 1990 и 2007 г. Коэффициент линейного тренда площади морского льда за исследуемый период с 1979 по 2023 г. составил $-0,06^{\circ}\text{C}/10$ лет.

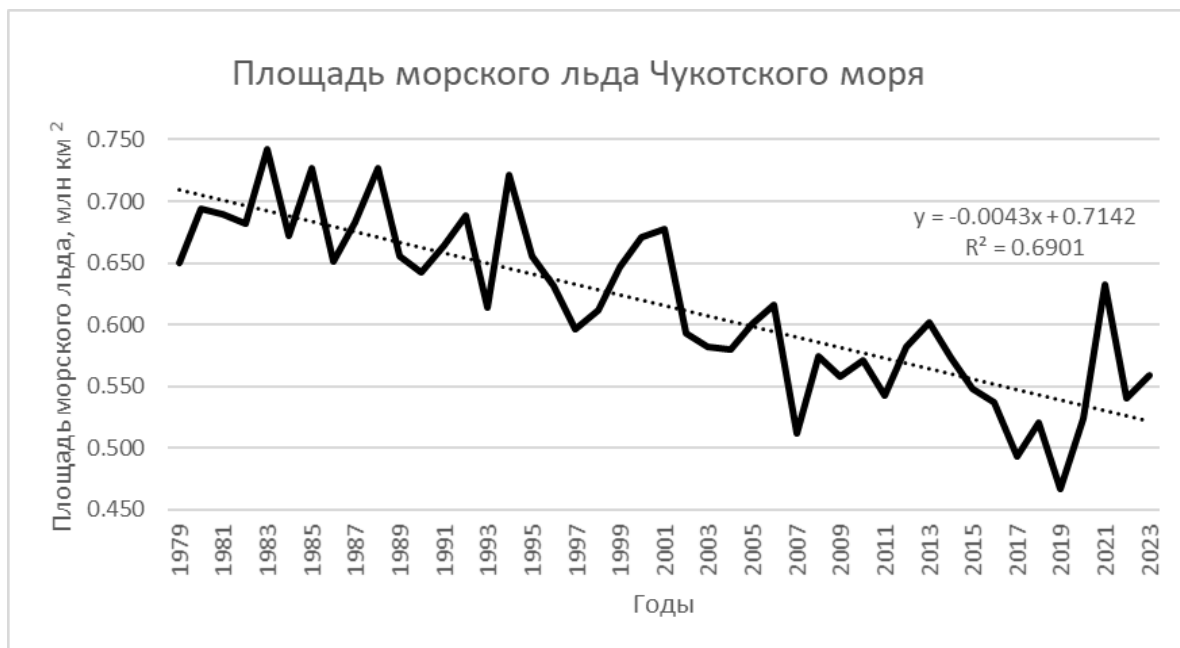


Рисунок 8. График площади морского льда в Чукотском море.

В Чукотском море с начала 90-х годов идет активная интенсификация процесса уменьшения ледяного покрова. Вклад в дисперсию составил 0.69. Коэффициент линейного тренда площади морского льда за исследуемый период с 1979 по 2023 г. составил $-0,043^{\circ}\text{C}/10$ лет.

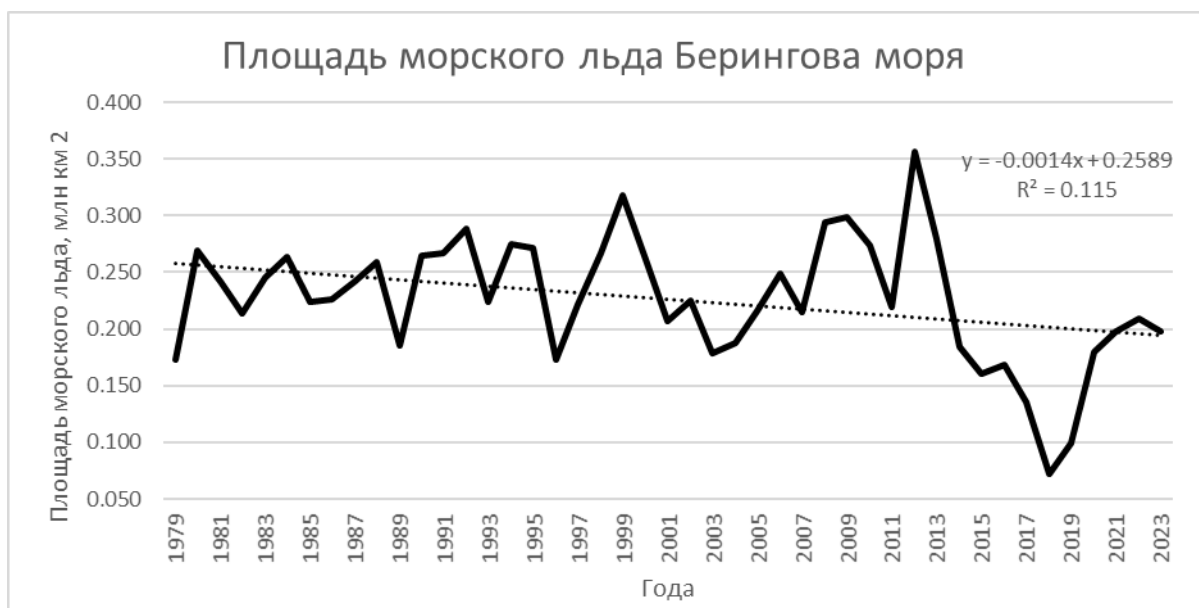


Рисунок 9. График площади морского льда Берингова моря.

Отрицательный тренд минимален, вклад в дисперсию 0.11, линейный тренд не значим. Это позволило сделать вывод, что в общей оценке ледовых условий не отмечено тенденции изменения режимных характеристик (климата). Коэффициент линейного тренда площади морского льда за исследуемый период с 1979 по 2023 г. составил $-0,014^{\circ}\text{C}/10$ лет.



Рисунок 10. График площади морского льда Гренландского моря.

Для всех месяцев года зафиксировано уменьшение значений ледовитости за исследуемый период. Наиболее интенсивное уменьшение ледовитости наблюдается в зимний период, наименее интенсивное - в летний. Анализ аномалий позволил определить, что именно в третьем десятилетии (1999-2008гг.) наблюдается значительное уменьшение ледовитости Гренландского моря, что может быть связано с глобальным увеличением температуры. Коэффициент линейного тренда площади морского льда за исследуемый период с 1979 по 2023 г. составил $-0,041^{\circ}\text{C}/10$ лет.

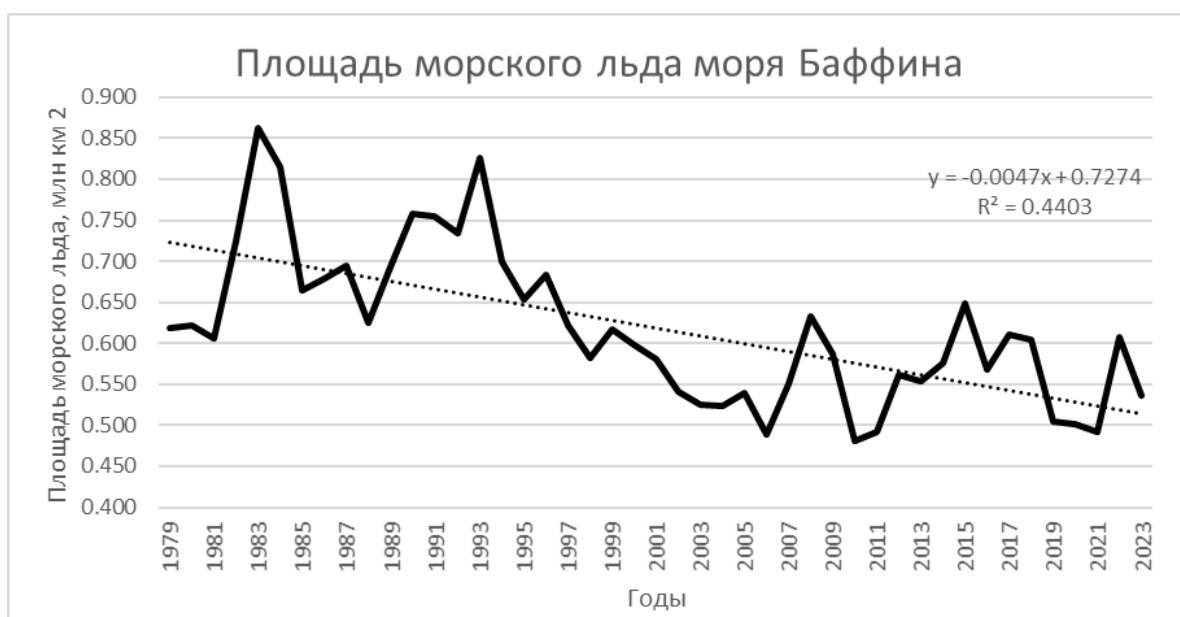


Рисунок 11. График площади морского льда моря Баффина.

Море Баффина большую часть года покрыто льдом. На ледовый режим влияет как холодные воды, проникающие из моря Линкольна, так и относительно теплые воды Атлантики с юга. На акватории моря наблюдается большое количество айсбергов, основная часть которых отделяется от ледников западного побережья Гренландии. Коэффициент линейного тренда площади морского льда за исследуемый период с 1979 по 2023 г. составил $-0,047^{\circ}\text{C}/10$ лет.

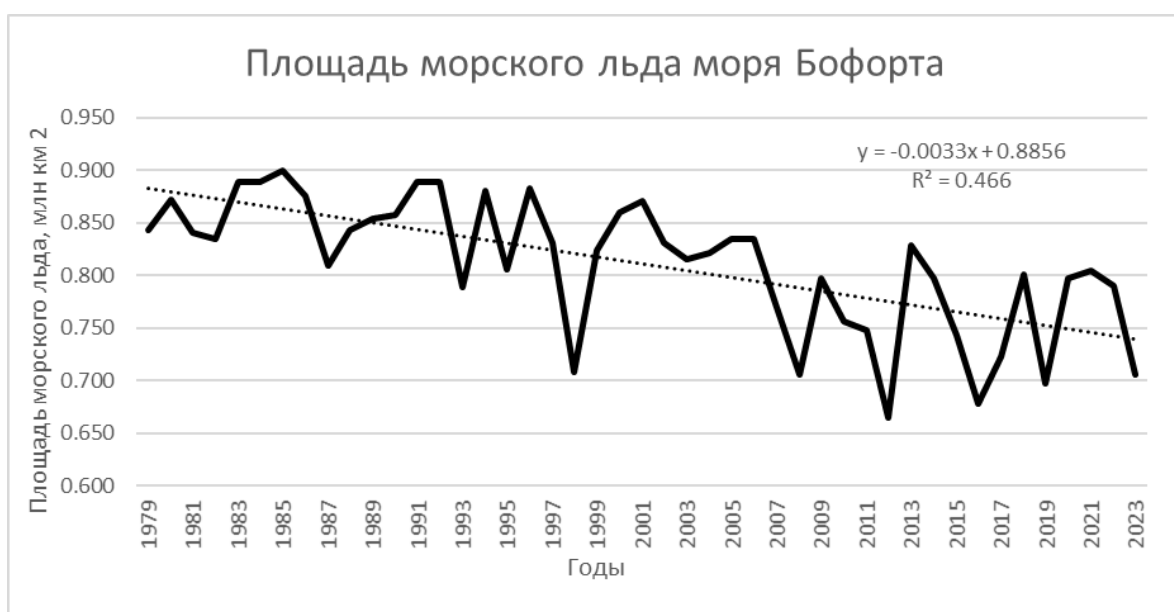


Рисунок 12. График площади морского льда моря Бофорта.

Коэффициент линейного тренда площади морского льда моря Бофорта за исследуемый период с 1979 по 2023 г. составил $-0,033^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Общий вывод:

Все графики показывают тенденцию к уменьшению площади ледяного покрова и увеличению температурных значений в разных морях Арктики. Это связано с глобальными климатическими изменениями и ростом АМО. Снижение площади льда и увеличение температур имеют серьезные последствия для экосистем Арктики и глобального климата.

3.2 Оценка корреляционной связи площади морского льда и исследуемых характеристик.

Таблица 1. Значения коэффициентов корреляции между приповерхностной температурой воздуха и площадью морского льда и между Атлантической мультideкадной осцилляцией и площадью морского льда для исследуемых морей.

Параметры/моря	Баренцево море	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море
Приповерхностная температура воздуха и площадь морского льда	-0.378	-0.262	-0.259	-0.283	-0.275

Атлантическая мультideкадная осцилляция и площадь морского льда	-0.850	-0.885	-0.798	-0.746	-0.901
---	--------	--------	--------	--------	--------

Параметры/моря	Берингово море	Гренландское море	Море Бофорта	Море Баффина
Приповерхностная температура воздуха и площадь морского льда	-0.132	-0.298	-0.292	-0.212
Атлантическая мультideкадная осцилляция и площадь морского льда	-0.857	-0.874	-0.790	-0.966

Анализируя полученные результаты, можно выделить высокие отрицательные корреляционные связи площади морского льда всех исследуемых морей и Атлантической мультideкадной осцилляции.

Наличие отрицательной корреляционной связи между рассматриваемыми процессами не удивительно, поскольку увеличение значений индекса АМО не может через соответствующее время не приводить к повышению температуры воды, что в итоге вызывает ускорение процессов таяния морского льда.

3.3 Гармонический анализ

Гармонический анализ — это метод математического исследования, применяемый для изучения периодических или циклических явлений. Главная идея гармонического анализа заключается в том, чтобы разложить сложные сигналы или временные ряды на простые составляющие, в основном синусоидальные функции.

Для расчета гармонического анализа был удален тренд, так как гармонический анализ, также известный как спектральный анализ, направлен на обнаружение периодических составляющих в наборе данных. Долгосрочные

изменения, или тренды, могут осложнить выявление этих периодических элементов.

Для начала была получена периодограмма, на которой показаны “пики”, т.е. гармоники, имеющие большие дисперсии и амплитуду. Соответственно, самые большие пики и были выбраны для дальнейшего расчета гармонического анализа.

Ниже будут представлены получившиеся графики.

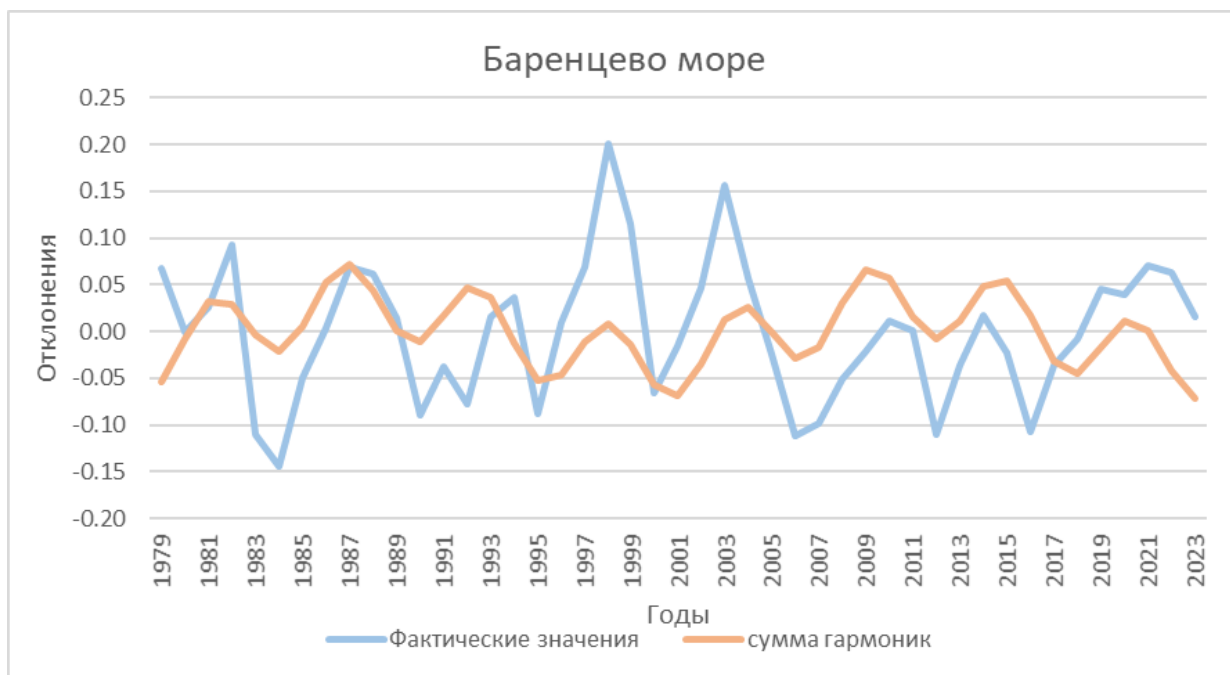


График 13. Совмещенный график отклонений и суммы гармоник Баренцева моря.

Наблюдается общий тренд на снижение площади льда в Баренцевом море с 1979 года. В течение периода видны значительные колебания, что может свидетельствовать о временных климатических аномалиях или изменениях в ледовой динамике.

Отклонения площади льда демонстрируют значительные межгодовые колебания. На графике заметны периоды с резким уменьшением и увеличением площади льда. На графике видны несколько значительных отклонений, например, резкие увеличения и уменьшения площади льда в середине 1990-х и в начале 2000-х годов.

Для понимания величины периодов гармоник, ниже представлена таблица:

Таблица 2. Результаты расчета составляющих гармонического анализа для Баренцева моря.

Период, год	23.47	5.59
Амплитуда	0.03	0.04
Фаза, год	9.56	3.26
Вклад гармоник (R^2)	0.10	0.14
t^*	3.01	3.01
$t_{кр}$	2.01	2.01

Итак, мы видим две гармоники с периодом 23.47 года и 5.59 лет. Обе гармоники прошли проверку на значимость при уровне значимости 5%. Отмечены долгопериодные колебания ледовитости: 23 годовой период, как и 5 летний, вероятно, могут быть связаны с различными климатическими аномалиями. К этому можно отнести тройной солнечный цикл, Атлантическую мультидекадную осцилляцию, Северо-Атлантическое колебание и т.д.

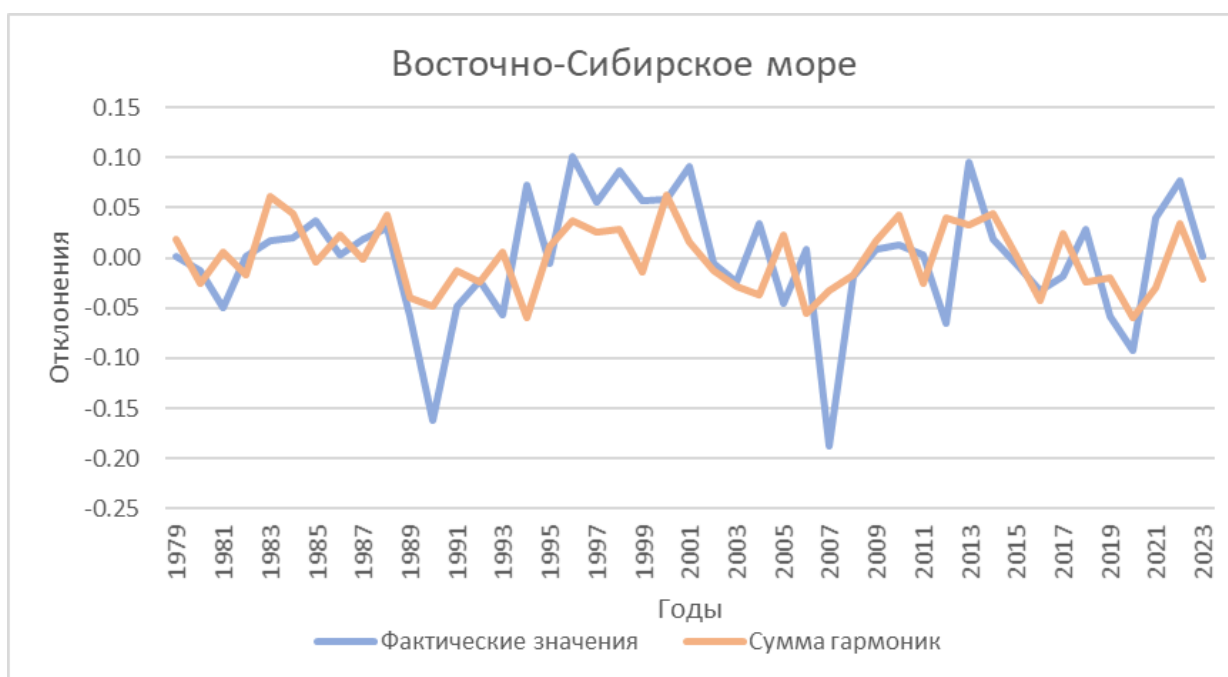


График 14. Совмещенный график отклонений и суммы гармоник Восточно-Сибирского моря.

Отклонения площади льда значительно варьируются из года в год. Наблюдаются резкие колебания в определенные годы, что может

свидетельствовать о значительных изменениях климатических условий (таких, как аномальная солнечная активность или влияние Эль-Ниньо) или других факторов. Внутригодовые величины ледовитости площади льдов значительно меняются от года к году.

На графике видно несколько резких отклонений в фактических данных, например, значительное уменьшение площади льда в конце 1980-х и середине 2000-х годов. Сумма гармоник менее подвержена таким резким изменениям, показывая общие тенденции.

Таблица 3. Результаты расчета составляющих гармонического анализа для Восточно-Сибирского моря.

Период, год	14.08	4.29	2.39
Амплитуда	0.03	0.03	0.03
Фаза, год	6.22	1.08	0.60
Вклад гармоники (R^2)	0.12	0.10	0.10
t^*	2.31	2.31	2.31
$t_{кр}$	2.01	2.01	2.01

На периодограмме Восточно-Сибирского моря были отмечены три гармоники с различными периодами. Гармонику с периодом 2.39 года можно отнести к квазидвухлетней изменчивости, которая может указывать на различные изменения гидрометеорологических характеристик Земли. Период 4.29 лет может указывать на феномены Эль-Ниньо и Ла-Нинья, которые также существенно влияют на изменчивость климата. Также присутствует

долгопериодное колебание – 14 лет, которое указывает на более глобальные изменения на Земле (аномальная солнечная активность, к примеру)



График 15. Совмещенный график отклонений и суммы гармоник Карского моря.

На графике видны значительные отклонения, такие как резкое уменьшение площади льда в конце 1990-х и середине 2000-х годов. Гармонические компоненты показывают более плавные изменения и менее подвержены резким колебаниям. В периоды с умеренными колебаниями реальные данные хорошо согласуются с суммой гармоник.

Таблица 4. Результаты расчета составляющих гармонического анализа для Карского моря.

Период, год	29.33	5.33	2.07
Амплитуда	0.02	0.02	0.02
Фаза, год	20.01	3.68	0.55
Вклад гармоник (R^2)	0.09	0.08	0.06
t^*	2.14	2.14	1.78
$t_{кр}$	2.01	2.01	2.01

Проверку на значимость прошли две гармоники из трех – третья гармоника не прошла проверку на значимость по критерию Стьюдента ($t^* < t_{кр}$)

Периодичность исследуемых процессов различна – первая гармоника имеет период в 29 лет, вторая в 5 лет. В случае с первой гармоникой, такой квазивековой цикл присутствует у многих природных процессов, и авторы А.С. Монин и Д.М. Сонечкин [12] предположили, что причиной такого колебания может являться тройной солнечный цикл. В связи с этим меняется количество поступающей солнечной энергии.

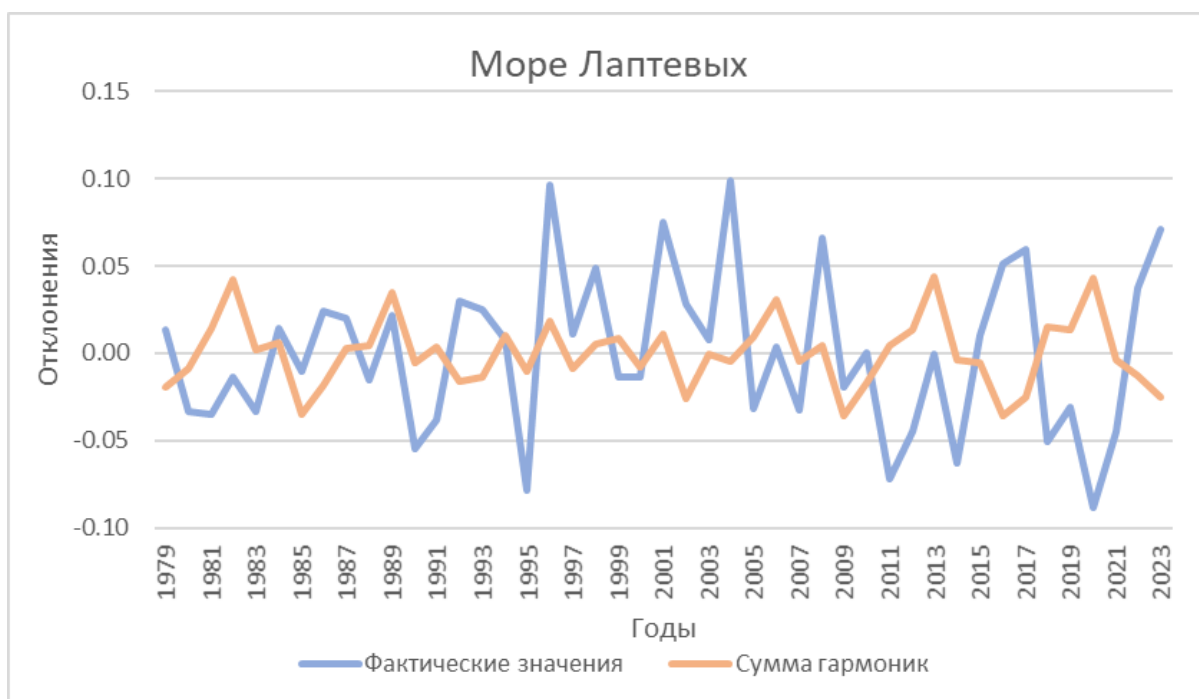


График 16. Совмещенный график отклонений и суммы гармоник моря Лаптевых.

График показывает значительные годовые колебания площади льда, видны периоды с резким уменьшением и увеличением площади льда, особенно в середине 1990-х и начале 2000-х годов.

Реальные данные демонстрируют как долгосрочные, так и краткосрочные изменения площади льда.

Таблица 5. Результаты расчета составляющих гармонического анализа для моря Лаптевых.

Период, год	7.49	6.29	2.39
Амплитуда	0.02	0.02	0.02
Фаза, год	4.32	3.60	1.35
Вклад гармоник (R^2)	0.07	0.06	0.06
t^*	1.69	1.69	1.70
$t_{кр}$	2.01	2.01	2.01

В случае моря Лаптевых гармоники не прошли проверку на значимость по критерию Стьюдента. Но, можно отметить небольшие периоды, которые могут указывать на небольшие изменения гидрометеорологических условий на Земле.



График 17. Совмещенный график отклонений и суммы гармоник Чукотского моря.

На графике можно увидеть несколько значительных отклонений, таких как резкое увеличение площади льда в 2021-2023 годах. Также присутствуют периоды с резким уменьшением и увеличением площади льда, особенно в середине 1990-х, начале 2000-х и в последние годы.

Таблица 6. Результаты расчета составляющих гармонического анализа для Чукотского моря.

Период, год	9.51	5.50
Амплитуда	0.02	0.01
Фаза, год	5.87	2.30
Вклад гармоник (R^2)	0.08	0.06
t^*	1.70	1.70
$t_{кр}$	2.01	2.01

В данном случае гармоники также не прошли проверку на значимость по критерию Стьюдента, что может указывать на недостаточное количество независимых переменных для гармонического анализа.

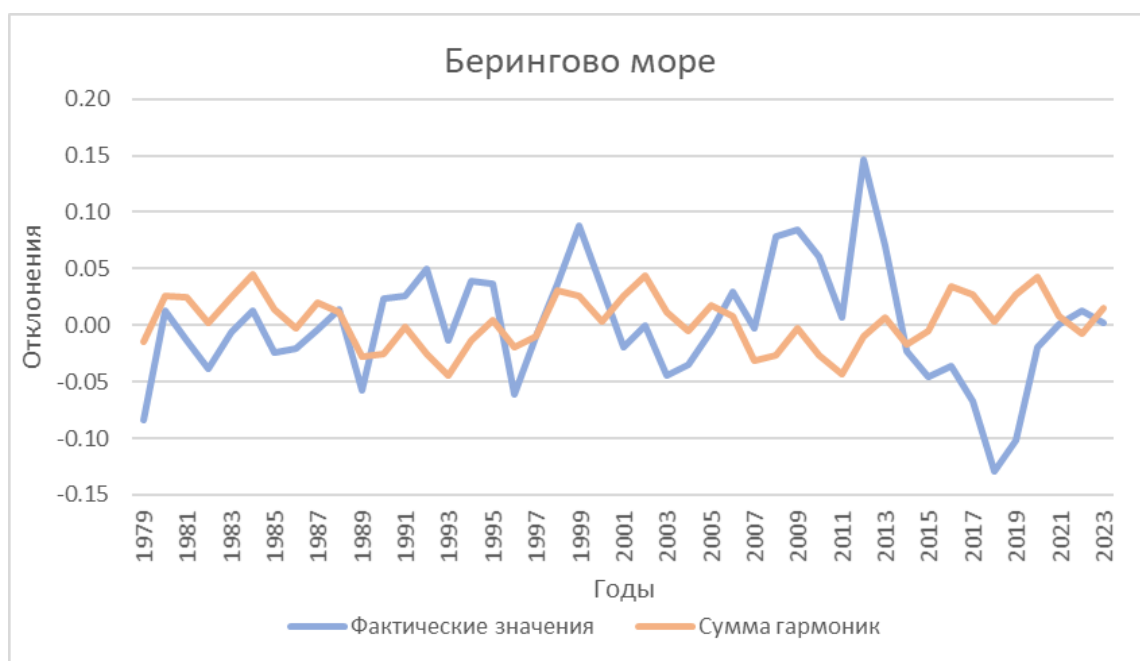


График 18. Совмещенный график отклонений и суммы гармоник Берингова моря.

Замечены несколько периодов с резкими изменениями площади льда, особенно заметные в начале 2010-х годов и в последние годы.

В последние годы в Беринговом море наблюдается тенденция к потеплению, но 2018 год особенно выделился на фоне этого явления по ряду гидрометеорологических показателей. Аномалии некоторых из них превысили стандартные отклонения многолетних изменений более чем в два раза. Потепление оказало влияние на структуру и циркуляцию вод, а также на ряд гидрохимических параметров. Основной причиной экстремальных условий стало доминирование южных ветров зимой, охватывающих весь акваторий Берингова моря, что привело к усиленной адвекции океанических вод, сохранявших тепло после аномального потепления в СВТО в 2014-2016 годах.

Таблица 7. Результаты расчета составляющих гармонического анализа для Берингова моря.

Период, год	17.60	3.59
Амплитуда	0.03	0.02
Фаза, год	5.42	2.32
Вклад гармоник (R^2)	0.12	0.08
t^*	2.11	2.11
$t_{кр}$	2.01	2.01

В Беринговом море были отобраны две гармоники, которые прошли проверку на значимость. Первая гармоника с периодом 17.60 лет указывает на долгопериодные колебания, которые глобально влияют на климатическую систему в целом. Вторая гармоника, имеющая период в 3.59 лет, показывает квазидвухлетнюю изменчивость. Она указывает на самостоятельное функционирование гидрометеорологических и атмосферных показателей. К примеру, аномалия 2018 г. связано с преобладанием южных ветров зимой, охватывающих всю акваторию Берингова моря. Что в итоге приводит к высокой адвекции вод, которые сохраняют тепло после аномальных потеплений, о чем говорится выше.

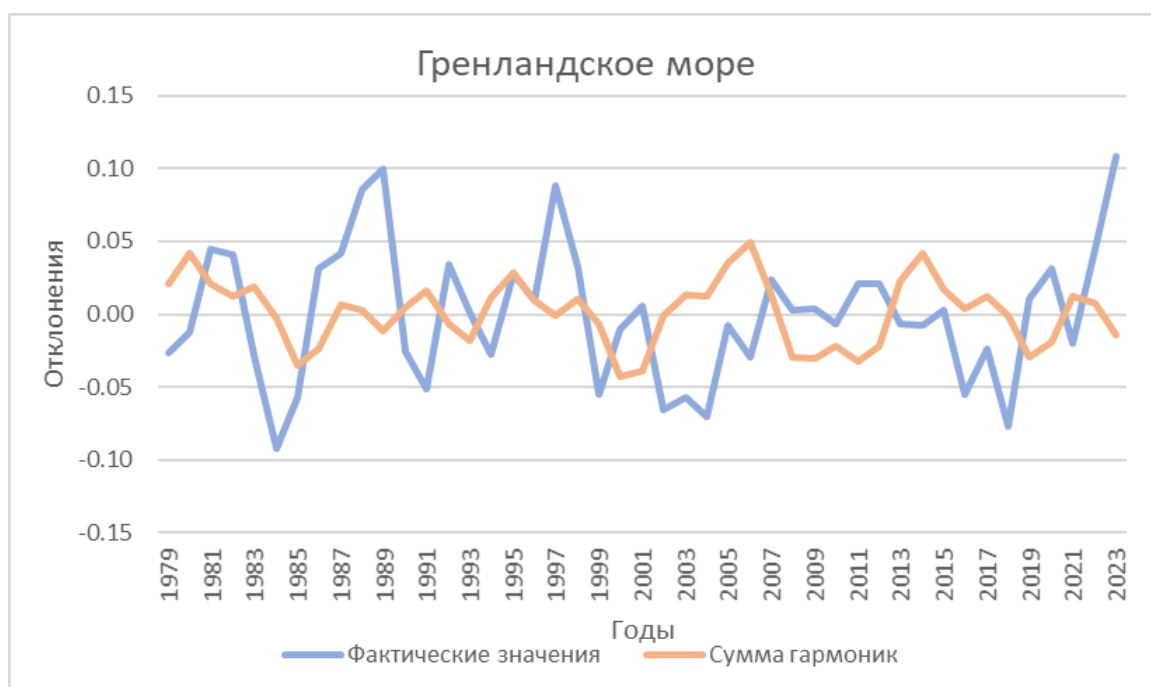


График 19. Совмещенный график отклонений и суммы гармоник Гренландского моря.

В случае с Гренландским морем наблюдаются как пик минимума в 1984г., так и пики максимумов в 1988, 1998. Также необходимо отметить увеличение площади морского льда с 2022 по 2023г.

В годы с экстремальными изменениями фактические значения могут значительно отличаться от гармонических компонент, что подчеркивает важность учета как реальных данных, так и гармонических трендов.

Таблица 8. Результаты расчета составляющих гармонического анализа для Гренландского моря.

Период, год	11.35	8.38	3.79
Амплитуда	0.02	0.02	0.02
Фаза, год	4.00	2.19	1.58
Вклад гармоник (R^2)	0.08	0.10	0.07
t^*	2.39	2.39	1.86
$t_{кр}$	2.01	2.01	2.01

Проверку на значимость прошли две гармоники из трех, третья гармоника не прошла проверку по критерию Стьюдента $t^* < t_{кр}$. Первая гармоника с периодом 11.35 лет может быть связана с Североатлантическим колебанием (индекс NAO), которое, в свою очередь, влияет на климатические условия в Северной Атлантике и оказывает заметное воздействие на ледовый покров в Арктике и самой Северной Атлантике. Положительная фаза NAO часто приводит к снижению объема льда, тогда как отрицательная фаза способствует его нарастанию.



График 20. Совмещенный график отклонений и суммы гармоник моря Баффина.

Ледовитость моря Баффина сильно варьируется: сначала исследуемого периода она растет, в середине 2000-х ледовитость постепенно уменьшается и начинает снова расти. В 2020-х наблюдается снова снижение.

Таблица 9. Результаты расчета составляющих гармонического анализа для моря Баффина.

Период, год	27.08	8.00
Амплитуда	0.04	0.04
Фаза, год	13.12	5.70
Вклад гармоник (R^2)	0.17	0.14
t^*	2.97	2.97
$t_{кр}$	2.01	2.01

В случае моря Баффина были выявлены две значимые гармоники – первая гармоника с долгопериодным колебанием в 27 лет, говорит нам о более глобальных климатических колебаниях (например, колебания, связанные с Тихоокеанской декадной осцилляцией, которая влияет на климатические условия в Тихом океане и прилегающих регионах, что отражается на ледовитости в этих областях). Вторая гармоника с периодом в 8 лет указывает на менее глобальные колебания и может быть связана с различными течениями, циркуляцией океанических вод и т.д.



График 21. Совмещенный график отклонений и суммы гармоник моря Бофорта.

Изменчивость ледовитости моря Бофорта очень резкая – тут у нас и минимумы в 1998, 2008, 2012 и 2016 годах, и резкий рост в 1996, 2001 и 2014 годах.

Таблица 10. Результаты расчета составляющих гармонического анализа для моря Бофорта.

Период, год	9.26	4.19	2.35
Амплитуда	0.02	0.02	0.01
Фаза, год	6.20	1.82	1.03
Вклад гармоник (R^2)	0.06	0.07	0.05
t^*	1.88	1.88	1.55
$t_{кр}$	2.01	2.01	2.01

Все три гармоники не прошли проверку на значимость по критерию Стьюдента, что говорит нам о недостаточном количестве независимых переменных, либо о том, что данные предикторы не совсем подходят для построения модели и что в этом случае надо рассматривать более локальные характеристики.

3.4 Множественная линейная регрессия

Для построения прогноза была выбран метод множественной линейной регрессии (в дальнейшем тексте будет использоваться обозначение МЛР).

Для расчета модели, в качестве зависимой переменной, служит площадь морского льда для каждого из исследуемых морей и, соответственно, в качестве предикторов (это переменные, которые используются для прогнозирования или объяснения зависимой переменной в статистическом анализе. В множественной линейной регрессии предикторы являются переменными, влияющими на зависимую переменную и используемыми для построения прогноза) использовались индексы АМО и значения приповерхностной температуры воздуха в Северном полушарии.

Также, все регрессионные модели были проверены на значимость и результат показал, что модели значимы во всех исследуемых морях, кроме Берингова моря, что может говорить о недостаточном количестве предикторов, или что выбранные в данной работе предикторы никак не влияют на ледовитость данного моря.

В модели рассчитан прогноз на 2 года – 2024 и 2025 г.

Далее рассмотрим получившиеся графики:

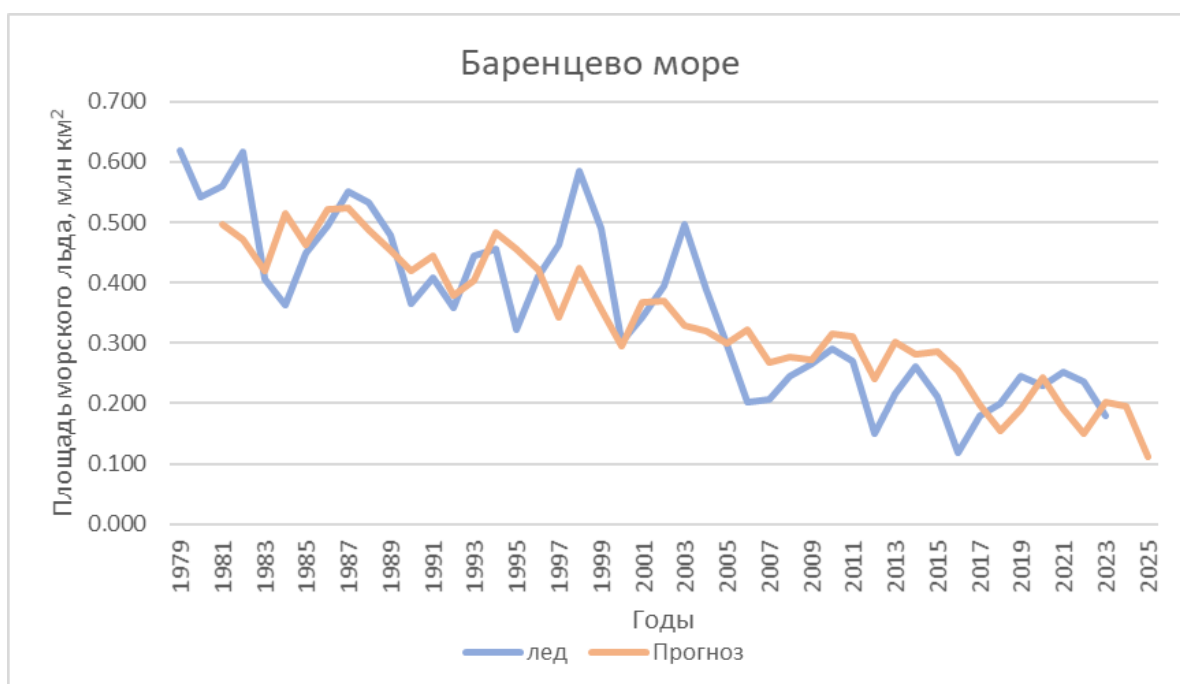


График 22. Модель множественной линейной регрессии для Баренцева моря.

В начале периода (1979-1995) наблюдаются колебания площади морского льда в пределах 0.4 - 0.6 млн км². С середины 1990-х годов до 2023 года отмечается общее снижение площади морского льда с сильными годовыми вариациями.

Прогнозируемые данные показывают дальнейшее снижение площади морского льда до менее чем 0.1 млн км² к 2025 году. Прогнозируемая линия следует параллельно историческим данным, но с явной тенденцией к уменьшению.

Как итог, график демонстрирует четкую тенденцию к сокращению площади морского льда в Баренцевом море с 1979 по 2023 годы.

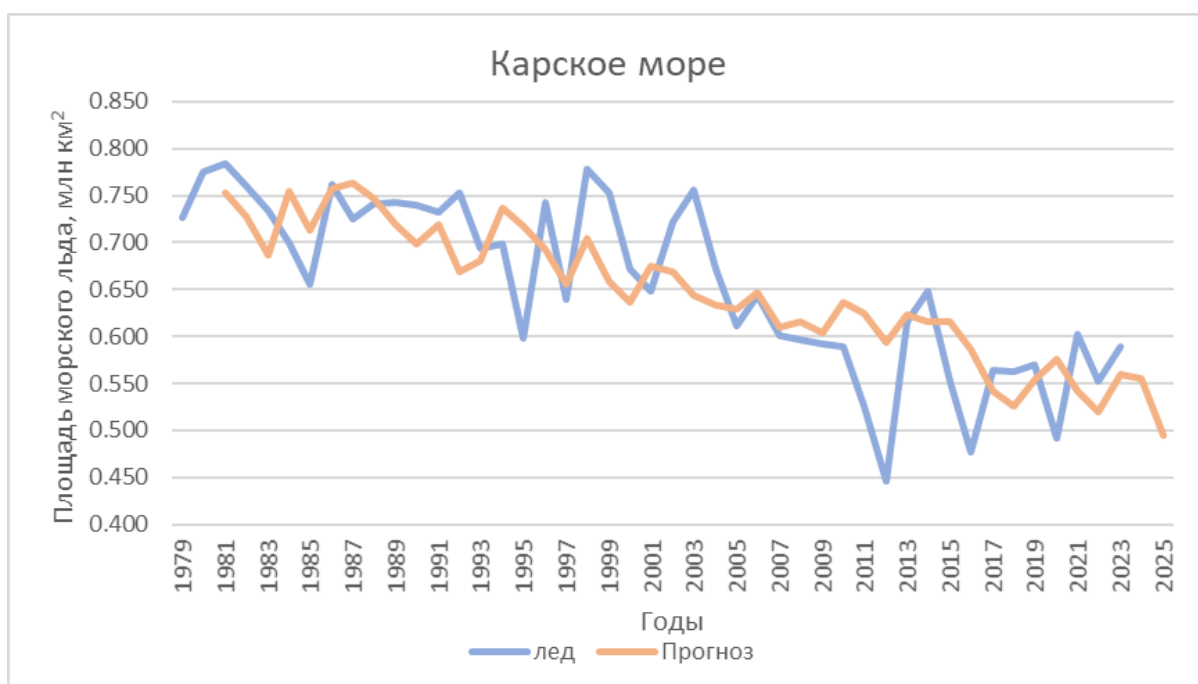


График 23. Модель множественной линейной регрессии для Карского моря.

В начале периода (1979-2005) площадь морского льда колеблется в диапазоне от 0.6 до 0.8 млн км². С 2005 года наблюдается снижение площади льда, особенно резкий спад происходит около 2011 года. С 2011 по 2023 годы происходит значительная вариация площади льда, с общей тенденцией к уменьшению. Прогнозируемая линия показывает дальнейшее снижение площади морского льда, достигая приблизительно 0.45 млн км² к 2025 году. График демонстрирует тенденцию к уменьшению площади морского льда в Карском море с 1979 по 2023 годы, с особенно резким спадом около 2011 года.

Прогноз: если текущие тенденции сохранятся, площадь морского льда продолжит уменьшаться, возможно, достигая минимальных значений к 2025 году.

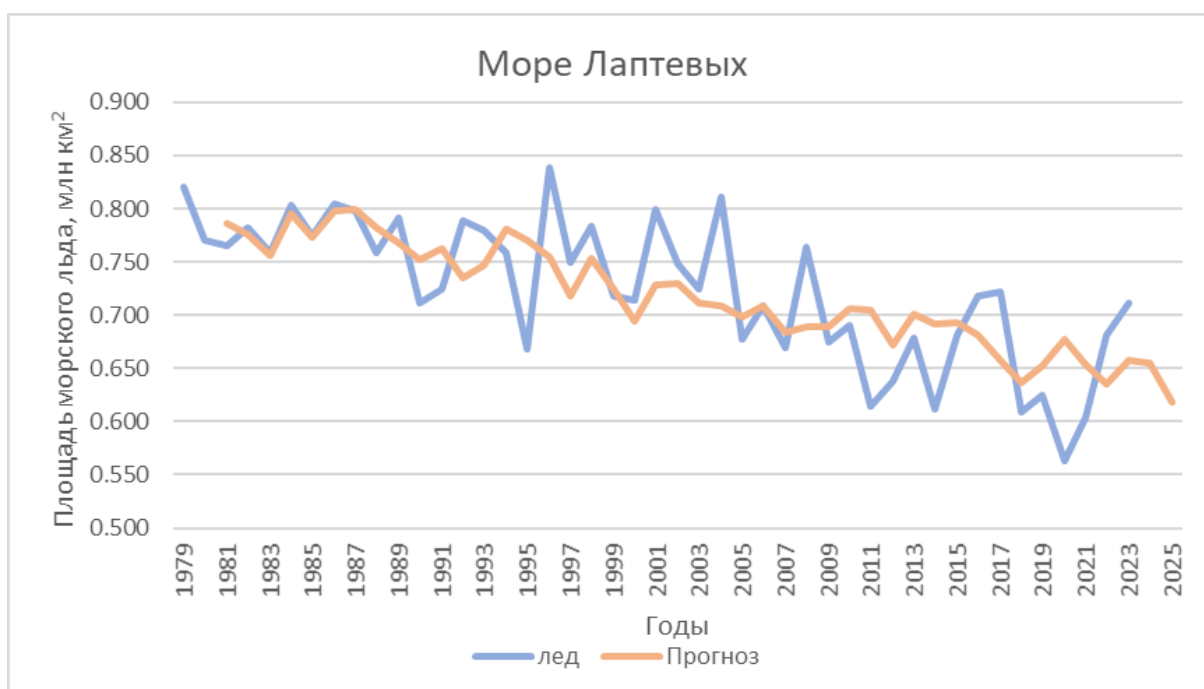


График 24. Модель множественной линейной регрессии для моря Лаптевых.

С начала исследуемого периода по 1990-е годы наблюдаются небольшие колебания площади морского льда – в районе 0.75-0.8 млн км², далее межгодовые колебания начинают расти, а уже с 2000-х годов начинается видимое снижение ледовитости моря Лаптевых. Прогноз на 2024,2025 г. также показывает уменьшение (примерно 0.6 млн км²)

В некоторых годах фактические данные отклоняются от прогнозных значений. Например, в 2010-2015 годах фактические значения площади льда были ниже прогнозируемых.

Морской лед в море Лаптевых постепенно уменьшается, что соответствует глобальным тенденциям изменения климата.

Прогнозы указывают на дальнейшее уменьшение площади льда в будущем, что может повлиять на местную экосистему и климатические условия.



График 25. Модель множественной линейной регрессии для Восточно-Сибирского моря.

Начиная с 1900-х годов, ледовитость Восточно-Сибирского моря начинает сильно колебаться, к примеру, после относительно стабильного времени, 1989 г. начинается резкое уменьшение площади морского льда (с 1.250 до 1.00 млн км²) всего за пару лет. После такого резкого снижения начинается период увеличения ледовитости, и остальной период до 2000-х годов выглядит довольно стабильным, что не скажешь о дальнейшем периоде резкого уменьшения общей ледовитости, начиная с 2000-х по настоящее время.

Прогноз показывает уменьшение площади льда Восточно-Сибирского моря до 0.950 млн км².

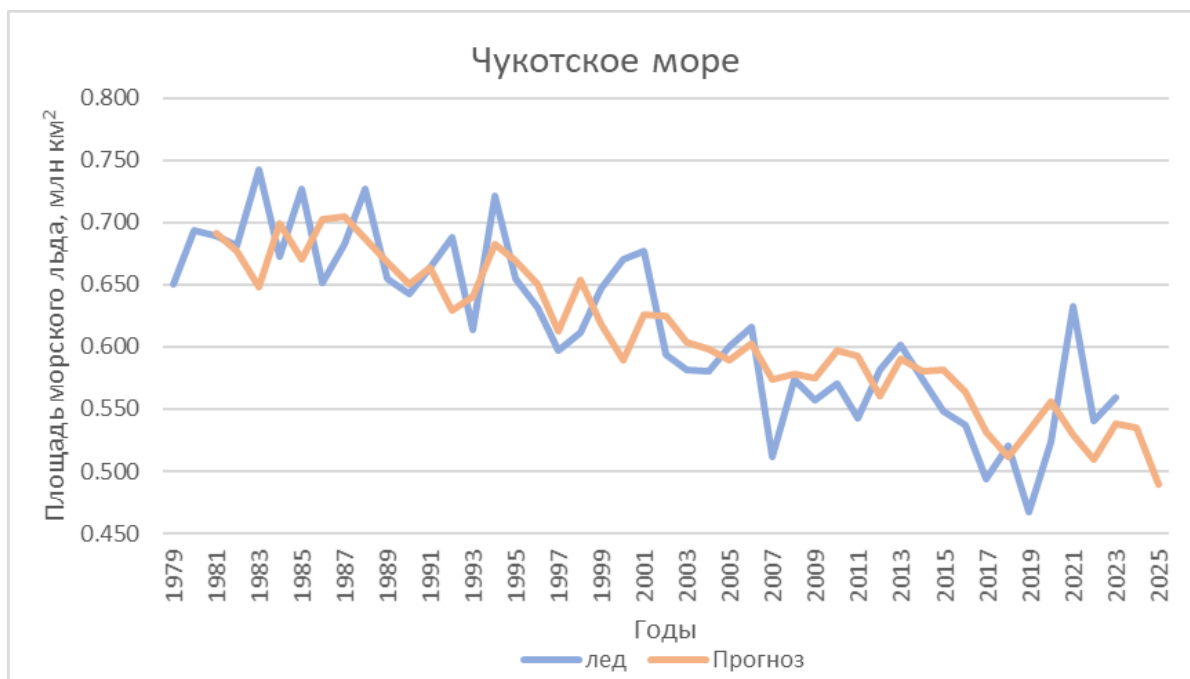


График 26. Модель множественной линейной регрессии для Чукотского моря.

Чукотское море начало снижение ледовитости примерно с 1900-х годов и продолжает относительно равномерно снижаться и по настоящее время. Фактические данные показывают резкий рост ледовитости в 2021 г. после минимума в 2019 г. Прогноз указывает на дальнейшее снижение площади морского льда, до 0.500 млн км².

Площадь морского льда в Чукотском море постепенно уменьшается с 1979 года, что отражает глобальные климатические изменения.

Прогнозы указывают на дальнейшее уменьшение площади льда в будущем, что может повлиять на экосистему региона и климатические условия.

Значительная изменчивость данных требует более детального анализа и учета при разработке климатических моделей.

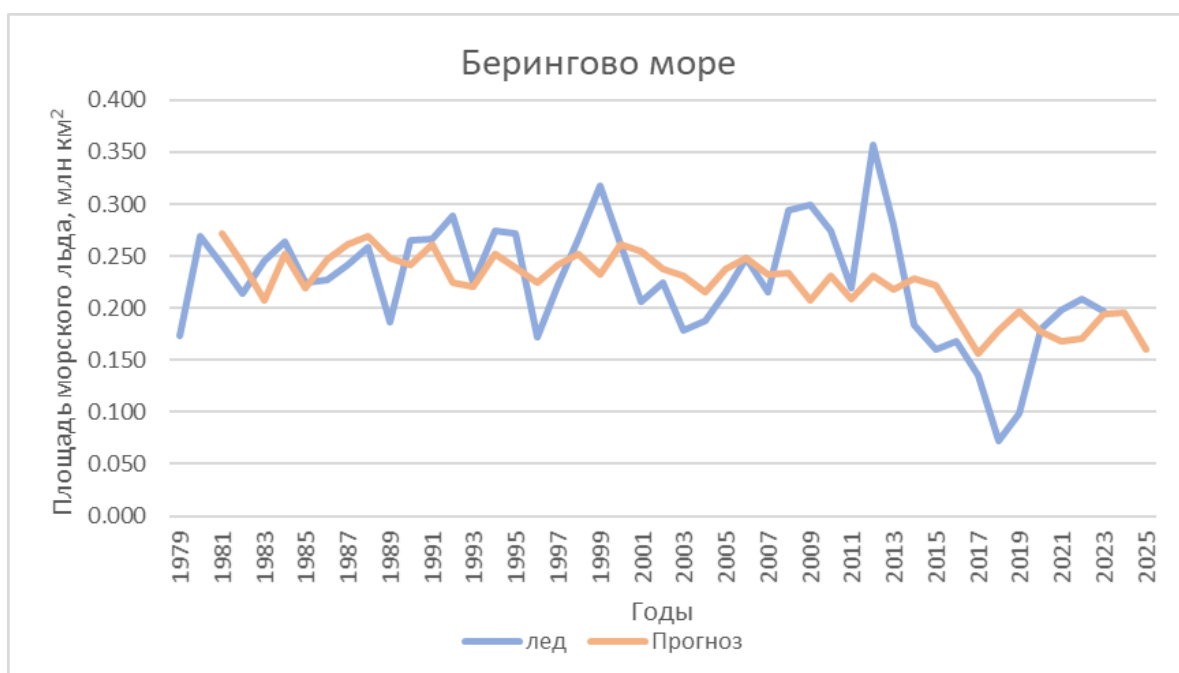


График 27. Модель множественной линейной регрессии для Берингова моря.

Площадь морского льда Берингова моря меняется не так сильно, как в случае с остальными морями. Межгодовые колебания небольшие, можно отметить резкое увеличение ледовитости в 2012, и минимум в 2018 г., о причинах которого говорилось в прошлой главе. Прогноз показывает небольшое уменьшение площади морского льда в 2024 и 2025 гг.

В некоторых годах фактические данные отклоняются от прогнозных значений. Как, например в период 2007-2013 гг., когда прогнозные значения не повторили резкое повышение фактических значений ледовитости.

Прогноз также указывает на уменьшение льда в дальнейшем, что будет влиять на климатические условия и экосистему в целом.



График 28. Модель множественной линейной регрессии для Гренландского моря.

Ледовитость Гренландского моря снижается довольно равномерно, большие колебания наблюдаются в начале исследуемого периода (с 1979 г. по 1990-е г.), дальше, начиная с 2000-х годов начинается видимое уменьшение площади морского льда до 2018 г., после которого исследуемая характеристика начинает увеличиваться.

Фактические значения показывают увеличение площади морского льда в 2023 г., в отличие от получившегося прогноза, который указывает на уменьшение ледовитости в 2024-2025 гг.

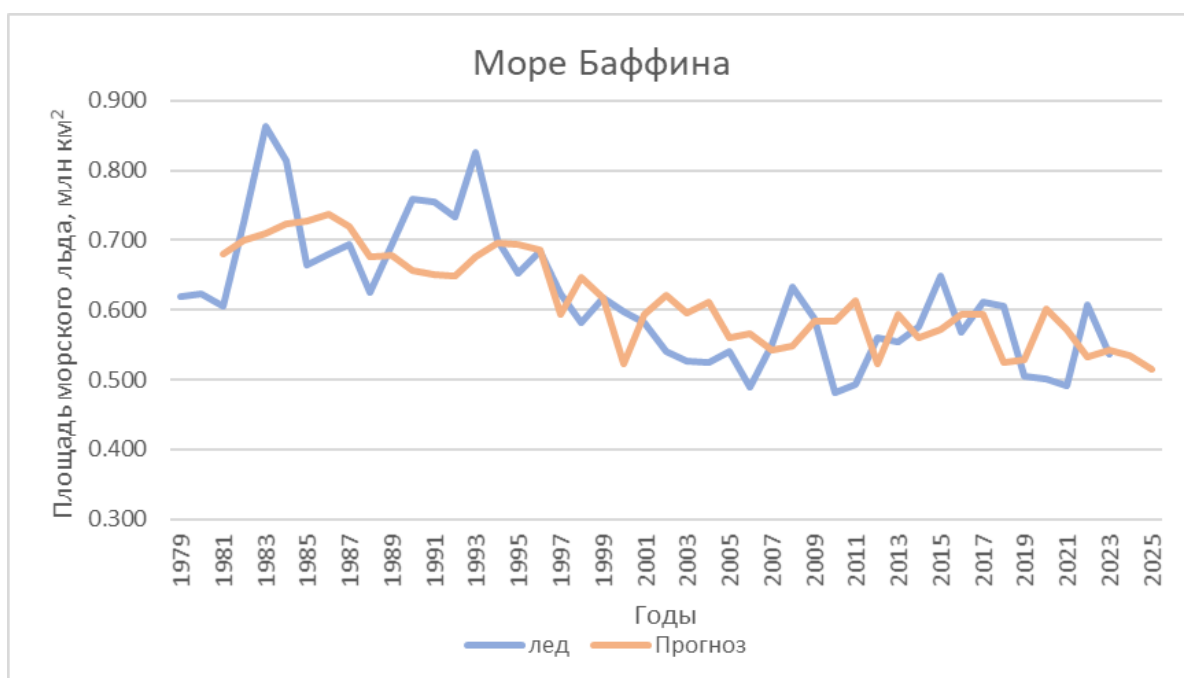


График 29. Модель множественной линейной регрессии для моря Баффина.

Ледовитость моря Баффина претерпевала значительные колебания в начале исследуемого периода и по начало 2000-х годов. Тогда началось снижение площади морского льда. В период 2011-2019 гг. площадь морского льда моря Баффина начала немного увеличиваться.

Прогноз указывает на возможное незначительное уменьшение ледовитости и дальше.

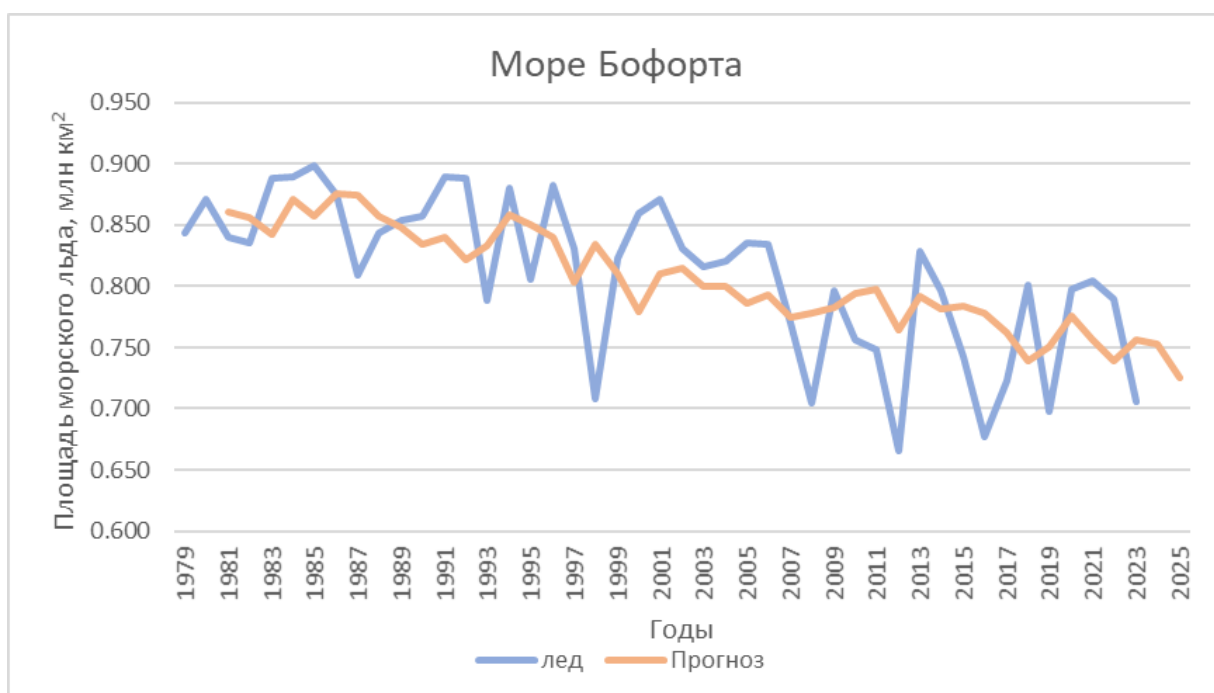


График 30. Модель множественной линейной регрессии для моря Бофорта.

Море Бофорта имеет отрицательную тенденцию с 1979 года и по настоящее время. Прогноз также показал дальнейшее уменьшение площади морского льда.

Обеспеченность получившихся моделей для всех исследуемых морей хорошая и достаточно высокая – выше 80%, кроме, соответственно, Берингова моря, чья модель не прошла проверку на значимость, у него обеспеченность получилась 68%.

Обеспеченность показывает, насколько хорошо получившаяся модель описывает фактические данные.

Также можно отметить, что получившийся прогноз на 2024 и 2025 г. указывает на дальнейшее уменьшение площади морского льда во всех морях Северного Ледовитого океана. Наблюдаемое сокращение площади льда и количества многолетних льдов хорошо моделируется, однако сильно подвержено межгодовой изменчивости.

На фоне общих тенденций климатических изменений в Арктике наблюдаются особенности температурной, ледовой и циркуляционной изменчивости в разных регионах, включая атлантический сектор Арктики,

бассейны Баренцева и Карского морей и район пролива Вилькицкого. Климатические аномалии в Арктике связаны с погодно-климатическими аномалиями в других широтных зонах, включая российские регионы. В последние годы это проявляется в аномально холодных зимах в различных регионах Северного полушария. Баренцево море, с его сильной изменчивостью теплообмена между океаном и атмосферой, играет особую роль в формировании аномальных погодно-климатических режимов в российских регионах. Подобные региональные сезонные аномалии не только не противоречат тенденции глобального потепления, но и подтверждают результаты модельных расчетов, указывая на увеличение их вероятности, особенно зимой над континентами, при общем потеплении.

Можно отметить, что весь исследуемый период можно разделить на три части:

1. Первая часть (1979-2000 гг.) – это устойчивый режим, в это время состояние ледовитости наиболее стабильное, межгодовая изменчивость незначительная;
2. Вторая часть (2000-2005 гг.) – в этот период начинается видимое уменьшение площади морского льда;
3. Третья часть (2006 г. и по настоящее время) – в это время начинается резкое уменьшение ледовитости Арктических морей.

Заключение

Проведённый анализ, результаты которого следует рассматривать как предварительные, позволяет сделать следующие выводы:

- во всех исследуемых в данной работе морях, наблюдается значительная годовая изменчивость площади льда, что указывает на сильное влияние сезонных и краткосрочных климатических факторов. Это проявляется в резких пиках и спадах на графиках. Особенно в последние десятилетия наблюдается значительное сокращение площади морского льда в Арктике. Это особенно заметно в летние месяцы, когда площадь льда достигает своих минимальных значений. Согласно данным NASA и Национального центра данных по снегу и льду (NSIDC), минимальная площадь льда в сентябре уменьшается на 13% за десятилетие.

- среднегодовая температура в Арктике растет примерно в два раза быстрее, чем в среднем по планете. Это явление называют арктическим усилением (Arctic amplification). Повышение температуры способствует таянию морского льда, а так как лед Арктики играет важную роль в регулировании глобального климата, отражая солнечную радиацию, то уменьшение ледового покрова будет приводить к увеличению поглощения солнечного света океанами, что способствует дальнейшему нагреванию воды и воздуха. Это, в свою очередь, усилит таяние льдов. Как результат этой взаимосвязи - еще более значительное сокращение площади морского льда на всей акватории Северного Ледовитого океана.

- вклад Атлантической мультидекадной осцилляции в уменьшение ледовитости Арктических морей основательный, на это указывают высокие коэффициенты корреляции всех исследуемых в данной работе морей. А так как замечен тренд на увеличение индексов АМО, то и ледовитость также будет продолжать уменьшаться со временем. Корреляционная связь между площадью морского льда и АМО отрицательная, что, в общем, не удивительно, поскольку увеличение индекса АМО будет через соответствующее время приводить к

повышению температуры воды, а это в итоге ускоряет процесс таяния морского льда. Также АМО влияет на интенсивность и направление океанических течений, например, таких как Северо-Атлантическое течение. В положительную фазу АМО усиливается приток теплой атлантической воды в Арктику через Фрамский пролив, что также способствует таянию льдов. Атлантическая мультideкадная осцилляция оказывает влияние на атмосферные циркуляционные паттерны, включая положение и интенсивность атмосферных фронтов и штормовых путей. Это может приводить к изменению ветрового режима и температуры воздуха в Арктике, влияя на состояние морского льда. Периоды положительной фазы АМО в 20-м и начале 21-го века совпадают с периодами значительного сокращения площади морского льда. Однако стоит отметить, что АМО является только одним из факторов, влияющих на ледовитость Арктики. Другие факторы, такие как глобальное потепление, антропогенные выбросы парниковых газов и внутренние климатические вариации, также играют важную роль.

- Связь между ледовитостью Арктических морей и температурой воздуха в Северном полушарии является важным аспектом климатической системы Земли. Потепление воздуха приводит к таянию льдов, а сокращение ледового покрова, в свою очередь, усиливает потепление воздуха через различные механизмы обратной связи. Понимание этой взаимосвязи критично для прогнозирования будущих климатических изменений и разработки стратегий по их смягчению и адаптации.

Да, связь приповерхностной температуры воздуха Северного полушария и площади морского льда имеет не такие хорошие результаты, как в случае с АМО. Вероятно, для получения более лучшей корреляционной связи необходимо использовать более локальные значения температуры воздуха над каждым морем Северного Ледовитого океана, либо же рассматривать температуру поверхности океана. Можно сказать, что температура воздуха в Северном полушарии растет, увеличение тренда составил $0.28^{\circ}\text{C}/10$ лет. Также, некоторые

авторы [16] считают, что уменьшение арктических льдов связано с переносом адвекции тепла в атмосферу в направлении к полюсу.

- гармонический анализ указал на периоды резких изменений площади льда, которые в основном начинаются в период с 2010-х г.. Также было замечено резкое уменьшение ледовитости Берингова моря в 2018 г. Основным фактором экстремальных условий стало преобладание южных ветров зимой, охватывающих всю акваторию Берингова моря, что привело к усиленной адвекции океанических вод, сохранявших тепло после аномального потепления в СВТО в 2014-2016 годах.

- прогноз модели множественной линейной регрессии на ближайшие два года (2024,2025г) показал неплохие результаты, на это указывает довольно высокая обеспеченность расчётов для всех исследуемых Арктических морей, не считая Берингова моря – это единственное море, расчеты которого не прошли проверку на значимость. В целом, модель показала, что на всей исследуемой акватории Северного Ледовитого океана продолжится таяние льдов.

Необходимо отметить, что уменьшение ледового покрова оказывает значительное воздействие на арктическую экосистему, включая изменение местообитаний для различных видов животных, таких как белые медведи, тюлени и моржи, а также на морские организмы, которые зависят от льда.

Таким образом, сокращение ледового периода приводит к уменьшению популяции организмов, в частности отдельных видов фитопланктона, жизнедеятельность которых тесно связана с наличием ледяных полей. Примером является криль, который служит основой питания почти всех морских птиц и млекопитающих, чье благополучие и сама жизнь также оказываются под угрозой. В то же время, в последние годы, из-за ускоренного сокращения площади ледяного покрова, наблюдается миграция тысяч моржей на берег как в России, так и в США (Аляска) [18].

Есть и положительные аспекты уменьшения площади морского льда - уменьшение ледовитости открывает новые морские пути для судоходства и облегчает доступ к природным ресурсам, таким как нефть и газ. Однако это

также связано с экологическими рисками и возможными геополитическими напряжениями.

Как отмечают некоторые авторы [20], особо следует отметить опасность усиления системного (синергического) эффекта совокупности воздействий. Примером является усугубление антропогенных рисков и угроз хрупким экосистемам Арктики вследствие облегчения доступа и интенсификации освоения региона, что включает загрязнение окружающей среды и уничтожение видов флоры и фауны. Специфика российской Арктики по сравнению с Аляской, севером Канады, Гренландией и арктическими территориями скандинавских стран заключается в повышенной значимости социальных рисков (по сравнению с природно-экологическими), учитывая значительно большую численность населения.

Основной вывод, к которому приводит обсуждение затронутых вопросов, заключается в том, что причинно-следственные связи между морскими льдами и климатическими условиями имеют более сложный характер, чем принято считать. Представление о том, что морские льды лишь "откликаются" на изменения климата и являются их следствием, верно лишь частично, как говорится в [19]

В целом, состояние ледовитости Арктических морей является важным индикатором изменений климата, и его текущее ухудшение подчеркивает необходимость усиления усилий по борьбе с глобальным потеплением.

Список литературы

1. Захаров В.Ф. Морские льды в климатической системе. - СПб: 1996. – 213 с.
2. Северный Ледовитый океан // Википедия
3. Г.В. Алексеев, В.Ф. Радионов, Е.И. Александров, Н.Е. Иванов, Н.Е. Харланенкова Изменения климата Арктики при глобальном потеплении // Проблемы Арктики и Антарктики. - 2015. - №1. - С. 32-34.
4. Ostenso, Ned Allen. "Arctic Ocean". Encyclopedia Britannica, 14 May. 2024, <https://www.britannica.com/place/Arctic-Ocean>.
5. Michael Winton Sea Ice-Albedo Feedback and Nonlinear Arctic Climate Change. - Princeton: 2008. - 48 с.
6. РЕЛЬЕФ ДНА СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА Е.П. Дубинин, А.В. Кохан, А.Н. Филаретова
7. Ю. С. Цатуров, А. В. Клепиков Современное изменение климата Арктики: результаты нового оценочного доклада Арктического совета // Современное изменение климата Арктики. - 2012. - С. 78.
8. Camila Campos, Myriel Horn The Physical System of the Arctic Ocean and Subarctic Seas in a Changing Climate. - Kiel: 2018. - 259 с.
9. База данных об изменениях индекса Атлантической мультидекадной осцилляции [Электронный ресурс].
10. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации». – СПб, изд. РГГМУ, 2017.
11. Jakobsson M., Mayer L., Coakley B., et al. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 // Geophysical Res. Letters. 2012. V. 39, L12609. DOI 10.1029/2012GL052219.
12. Монин А.С., Сонечкин Д.М. Колебания климата по данным наблюдений: тройной солнечный и другие циклы. – М.: Наука, 2005. – 191 с.

13. Met Office // Sea ice in the climate system: сайт. – URL: <https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/cryosphere-oceans/sea-ice/index>
14. Saeed, Ng Naima, Adolf K.Y. Opportunities and challenges of the opening o the Arctic Ocean for Norway / Naima, Adolf K.Y. Saeed, Ng // Maritime Transport and Regional Sustainability. – 2020. – No . – С. 209-221.
15. Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O.M. The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic — a Possible Mechanism // J. Climate. 2004. V. 17. P. 4045—4057.
16. Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике / Г.В. Алексеев // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2015. – N1. – С. 11-26.
17. Полонский А.Б. Атлантическая мультидекадная осцилляция и ее проявления в Атлантико-Европейском регионе // Морской гидрофизический журнал. 2008. No 4. С. 69—79.
18. National Research Council of the National Academies, 2011: Frontiers in Understanding Climate Change and Polar Ecosystems: Summary of a Workshop. Washington D.C., National Academies Press, 78 p.
19. Захаров В.Ф., Малинин В.Н. Морские льды и климат. СПб: Гидрометеоиздат, 2000. 91 с.