



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра океанологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Исследование площади льда Белого моря в зависимости от
уровня зим.

Исполнитель Романюкина Софья Алексеевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)

Подrezова Надежда Алексеевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Густоев Дмитрий Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

«25» ИЮНЯ 2023 г.

Санкт-Петербург
2023



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра океанологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Исследование площади льда Белого моря в зависимости от суровости зим.

Исполнитель Романюкина Софья Алексеевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)

Подrezова Надежда Алексеевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой _____
(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Густоев Дмитрий Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

«___» _____ 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

Содержание	
Введение.....	3
Глава 1. Описание района исследования	5
1.1 Физико-географическое положение Белого моря	5
1.2 Гидрометеорологический режим Белого моря	8
1.3 Распределение солёности на акватории Белого моря	10
1.4 Циркуляция вод в Белом море	11
1.5 Ледовые условия в Белом море	13
Глава 2. Материалы и методы исследования	15
2.1 Метод анализа тренда временного ряда.	15
2.2 Гармонический анализ Фурье и спектр.	16
2.3 Функция автокорреляции.....	17
2.4 Метод кластерного анализа.....	19
2.5 Расчёт СГДМ.	19
Глава 3. Обработка результатов расчётной части	20
3.1 Обзор исходных данных для дальнейших расчётов.....	20
3.2 Выделение трендовой составляющей исходных данных	21
3.3 Расчет гармонического анализа Фурье и спектра для Белого моря.	25
3.4 Анализ остатков по АФК	27
3.5 Расчёт СГДМ для Белого моря.	30
3.6 Реализация кластерного анализа исходных данных	32
3.7 Общие выводы.....	35
Заключение	44
Список литературы	45
Приложения	46

Введение

Регионы России, которые располагаются дальше шестидесятой параллели, играют важную роль в экономике и обеспечении безопасности страны. Они обладают значительными запасами природных ресурсов, например таких как: нефть, газ, уголь, леса, минералы и многие другие. Благодаря этим ресурсам, северные регионы для России являются ключевыми производителями сырья для российской экономики. В силу этого наша страна всегда имела повышенный интерес к изучению северных районов. Однако у деятелей науки на пути могут вставать неожиданные препятствия. Одно из таких – «глобальное потепление». Из него следует значительное сокращение количества льда в Арктике. В следствие этого многие комплексы мер, направленных на изучение Арктического региона, например, такие как экспедиционная деятельность, разведка и добыча полезных ископаемых, развитие военной и гражданской инфраструктур, не могут быть изучены в полной мере. Для решения всех задач, описанных ранее, необходимы знания в области ледового режима морей Арктики с долговременным прогнозом ледовых условий на них, а также оперативная гидрометеорологическая информация для планирования работ в интересующих регионах.

Белое море является одним из важнейших объектов с точки зрения физических, климатических и экологических исследований. На его акватории каждый день происходит множество гидрологических, метеорологических и геологических процессов, поэтому многие исследователи уделяют особое внимание изучению этого моря.

Резюмируя все вышеперечисленные факторы, мы можем сделать однозначный вывод о том, что изучение межгодового и межсезонного изменения ледового режима является необходимым исследованием всего арктического региона.

В данной дипломной работе будет рассмотрен анализ данных о площади льда на Белом море за период с 1978 по 2022 годы, а также изучены факторы, влияющие на этот процесс. Также будут рассмотрены методы прогнозирования изменения площади льда в зависимости от различных климатических изменений.

Цель работы: рассмотреть географические и физические особенности исследуемого района Белого моря исходя из исследований в различных источниках, сформировать персональный архив ледовитости по Белому морю, а также осуществить ряд статистических расчетов и комплексных анализов пространственно-временной изменчивости ледовитой.

Для выполнения работы выполним нижеперечисленные задачи:

1. Сортировка исходных данных по ледовитости и температуре воздуха;
2. Формирование и упорядочивание полученных временных рядов;
3. Анализ выбранных временных рядов, а именно:
 - 1) Выделить трендовую составляющую;
 - 2) Выполнить гармонический и спектральный анализы;
 - 3) Произвести анализ остатков по АФК;
 - 4) Рассчитать суммы градусо-дней мороза (СГДМ);
 - 5) Провести кластерный анализ полученных данных.
5. Общий анализ полученных расчётов и результатов, а именно:
 - 1) Определение трёх степеней зимы суровости для выбранного района (суровая, умеренная и мягкая);
 - 2) Сопоставление данных о ледовитости и температуре с целью нахождения зависимости между ними.

Глава 1. Описание района исследования

1.1 Физико-географическое положение Белого моря

К морям Северного Ледовитого океана принято относить Белое море. Оно принадлежит к внутренним морям России. Белое море сообщается с Северным Ледовитым океаном через Баренцево море. Акваторию Белого моря можно разделить на глубоководные и мелководные части. К первым можно отнести всего 3 района: Бассейн, Кандалакшский залив, исключая его вершины, а также Двинской залив. Ко второй группы относятся Онежский и Мезенский заливы. В зимний период на акватории Белого моря на нижней поверхности ледникового покрова накапливается такой объем льда, который в течение летнего сезона тает. Остатки же льда выносятся в акваторию Баренцево моря благодаря течениям.



Рисунок 1.1 Географическое положение района исследования.

Факт существования достаточно мелководного пролива в значительной степени препятствует водообмену между исследуемым Белым морем и связанным с ним Баренцевым морем. Водообмен между этими двумя

взаимосвязанными морями всё равно играет в достаточной степени большую роль в формировании гидрофизических, гидрологических и гидрохимических районов Белого моря.

Площадь моря доходит примерно до 90000 км². При добавлении площади всех островов на акватории, то цифра увеличится до 90800 км². Максимальная глубина акватории составляет 350 м – это территория находится в Бассейне. Средняя глубина Белого моря составляет 67 м, а его объем равен 6000 км³. Береговая линия Белого моря равняется 5093 км.

Белое море стандартно разделено всего на три части: северную, среднюю и южную. Границы Белого моря и его районирование можно увидеть на рисунке 1.2. Северная оконечность включает в себя Мезенский залив и Воронку. Последняя зона является представляет собой воронку, где расширенная часть направлена в сторону Баренцева моря, вершина же обращена к устью реки Мезень. В этой части, на севере Воронки, глубина обычно не превышает 60 м или 70 м. Далее идёт внутренняя зона северной части, которая образует Мезенский залив, в которой глубина не достигает больше 20 м.



Рисунок 1.2 Гидрографические границы и районирование Белого моря, а также названия его берегов согласно «Люции Белого моря», 1983 г.

Наиболее мелководная частью моря можно назвать северную оконечность. Благодаря результатам исследований и экспериментальным данным мы знаем, что в этой части Мезенского залива сложный рельеф дна, который представляет собой обширное мелководье, где на юге наблюдаются с ложбинообразные понижения на протяжении русла р. Мезени.

За северной частью следует средняя, которая включает в себя Кандалакшский залив и Бассейн. Бассейн является наиболее глубоководной частью исследуемой акватории. Это центральная ложбина простирается с северо-запада до юго-востока от Кандалакшского в Двинской залив. Существенная часть этого участка достигает глубины более 100 м. В пределах акватории Бассейна глубина превышает отметку в 250 м. Среди всех заливов исследуемой акватории наиболее глубоководными являются Кандалакшский и Двинской заливы. В одной из котловин Бассейна находится максимальная глубина Белого моря – 343 м.

Самой мелководной частью изучаемой акватории по праву можно считать Онежский залив. Он разделен с центральной частью акватории Соловецкими островами. Глубины в этом заливе могут разниться от 5 до 25 м.

В Бассейне, Кандалакшском и Двинском заливах рельеф дна ровный. Исключительно неоднородный рельеф дна наблюдается в нескольких местах: в дельте р. Северной Двины и у её западного побережья и вершине Кандалакшского залива. Как нам стало известно по результатам исследований, описанных в [2] «в Онежском заливе также преобладает сложный рельеф дна. Оно усеяно многочисленными каменистыми банками, «коргами», «лудами», мелями. Неровности донного рельефа в надводной части мы можем наблюдать в виде большого количества островов, разбросанных почти по всей поверхности залива, особенно в его западной половине».

Во всех приполярных районах, и в Белом море в частности, наблюдается эффект рефракции. Это явление позволяет видеть предметы, находящиеся на большом расстоянии от наблюдателя, могут быть видны с ещё большим

расстоянием, чем при стандартных условиях наблюдения. При этом берег представляется так отчетливо.

Миражи также часто встречается на акватории Белого моря. Кажущееся дрожание горизонта, а также наличие мглы являются основными признаками наступления миража и чрезвычайно сильной рефракции.

1.2 Гидрометеорологический режим Белого моря

Климатический режим данной акватории является промежуточным между морским и континентальным из-за того, что Белое море относится к внутренним морям России. С Атлантического океана поступают воздушные массы, которые ответственны за климатообразующие факторы. В следствие этого в исследуемом регионе наблюдаются прохладное непродолжительное лето, длинная теплая зима, что является признаком морского климата. Также присутствует существенная облачность, активная циклоническая деятельность и неустойчивые погодные явления круглогодично. Можно обозначить несколько значений средних температур воды акватории: ниже 1°C в феврале, когда вода может замерзнуть на целых 6 месяцев иногда и более, 6 - 15°C в августе.

По результатам многолетней обработки данных [3] «средняя годовая температура воздуха в районе Карельского побережья Белого моря колеблется от -0.4°C в северной части до 1.3°C в южной части. Самый холодный месяц года - январь ($-10.1...-12.8^{\circ}\text{C}$). В отдельные годы минимальные годовые температуры воздуха могут отмечаться в любой из зимних месяцев. Так понижение температуры до -47°C , отмеченное на МС Колежма, было зарегистрировано в феврале (1946 г.). ... Самым теплым месяцем в году является июль, со средней суточной температурой воздуха $13.9-14.7^{\circ}\text{C}$. Абсолютный максимум температуры воздуха составляет $+35^{\circ}\text{C}$ (МС Колежма, Кемь). Годовая амплитуда температуры воздуха в рассматриваемом районе $24-27^{\circ}\text{C}$ ». Изменчивость температуры поверхностного слоя (ТПС) на севере

Белого моря непосредственно находится под влиянием процессов, происходящих в Баренцевом море.

Толстиков А.В в своём автореферате говорит, что [4] «в южной части Белого моря сильнее сказывается «влияние материка», так как гидрологический режим Онежского и Двинского залива во многом определяется стоком крупных рек: Онега и Северная Двина». Температура поверхностных вод в разных районах моря сильно варьируется в зависимости от сезона в разных частях моря. В летние месяцы температура поверхностных вод центральной части Белого моря прогревается до 15°C до 16°C . Однако в это время в Онежском заливе и Горле температура никогда не превышает 9°C . Зимой же температура поверхности воды понижается до диапазона от -1.3°C до 1.7°C . В свою очередь в заливах диапазон колеблется от $-0,5^{\circ}\text{C}$ до $-0,7^{\circ}\text{C}$. Глубинные слои, что ниже глубины 50 метров, всё время имеют температуру вне зависимости от сезона года и составляют от -1.0°C до $+1.5^{\circ}\text{C}$.

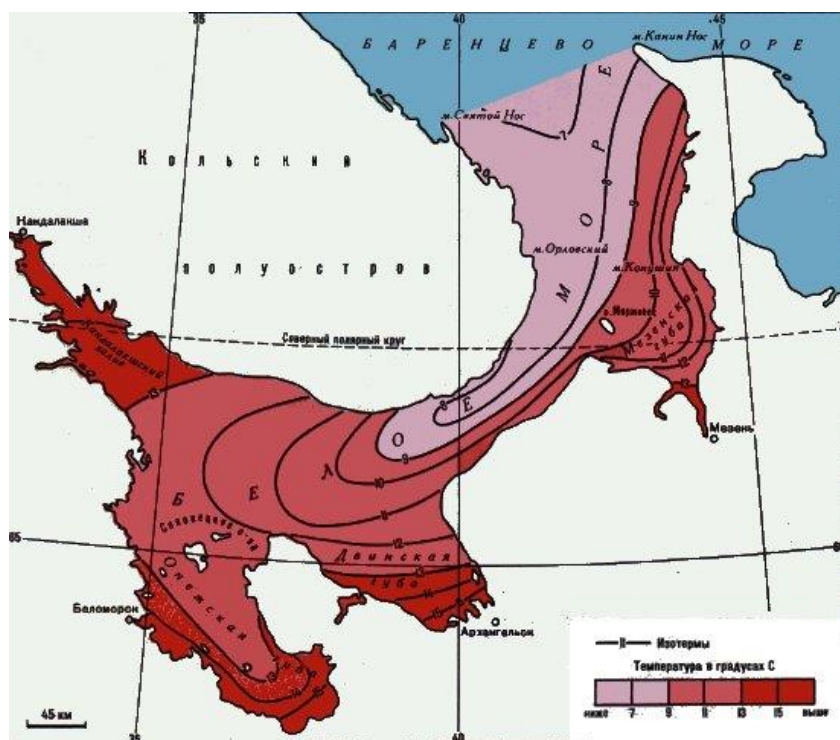


Рисунок 1.3. Температура на поверхности в летний период.

1.3 Распределение солёности на акватории Белого моря

Белое море одно из самых солёных внутренних морей России. Его средняя солёность вод составляет 29‰. Солёность воды различных районах изучаемой акватории варьируется. В Воронке солёность составляет 34.0-34.5‰, в Горле 30.5‰, в центральной части 24-26‰.

Необходимо отметить, что, рассматривая взаимосвязь солёности и суммы градусо-дней мороза (СГДМ), подмечается слабое влияние на процесс осолонения его глубинных вод при льдообразовании в Белом море.

Далее с глубиной солёность резко скачкообразно уменьшается, а далее плавно и постепенно увеличивается до самого дна моря. Опреснение морской воды происходит до глубины 10-20 м. Горизонтальное распределение солёности очень неравномерное, минимумы приурочены к заливам и колеблются в пределах 10-12‰. Максимумы это 34.5‰, фиксируют обычно в Бассейне. На большей части морской акватории исключается развитие конвекции (это ниже горизонтов 50-60 м) из-за устойчивой вертикальной стратификации. До отметки в 80 м вертикальная циркуляция доходит в района Горла, усиливается интенсивной турбулентностью. От горизонта равным 100 м и до самого дна акватории, находятся глубинные воды с температурой близкой к замерзанию, около -1.45°C и достаточно высокой солёностью около 29.8‰.

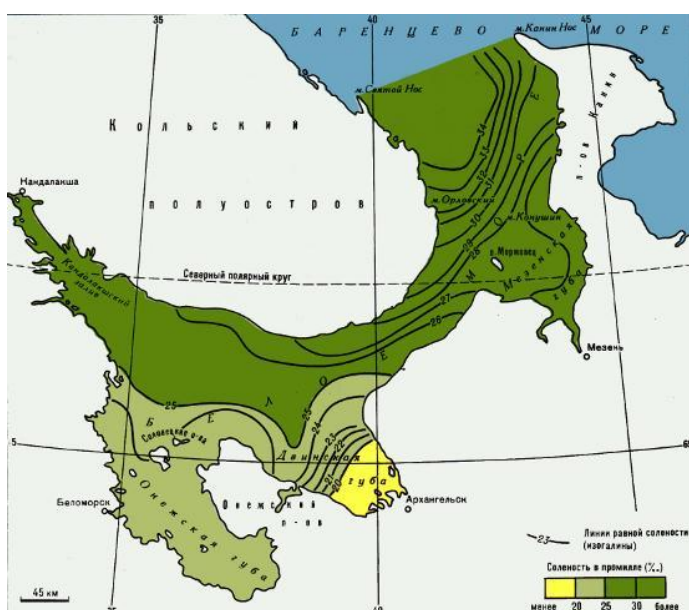


Рис 1.4. Распределение солёности на поверхности Белого моря летом.

1.4 Циркуляция вод в Белом море

Циркуляция исследуемой акватории формируется вследствие множества факторов, из которых необходимо выделить наиболее значимые. Речной сток, процессы в атмосфере, водообмен с Баренцевым морем, а также влияние приливов и отливов, неровный рельеф морского дна и берегов в своей совокупности образуют общую картину циркуляции вод.

Формирование глубинных вод исследуемой акватории Белого моря определяется целым рядом различных факторов. Одним из наиболее значимых является водообмен Белого моря с Баренцевым. Из него течет теплая и соленая вода.

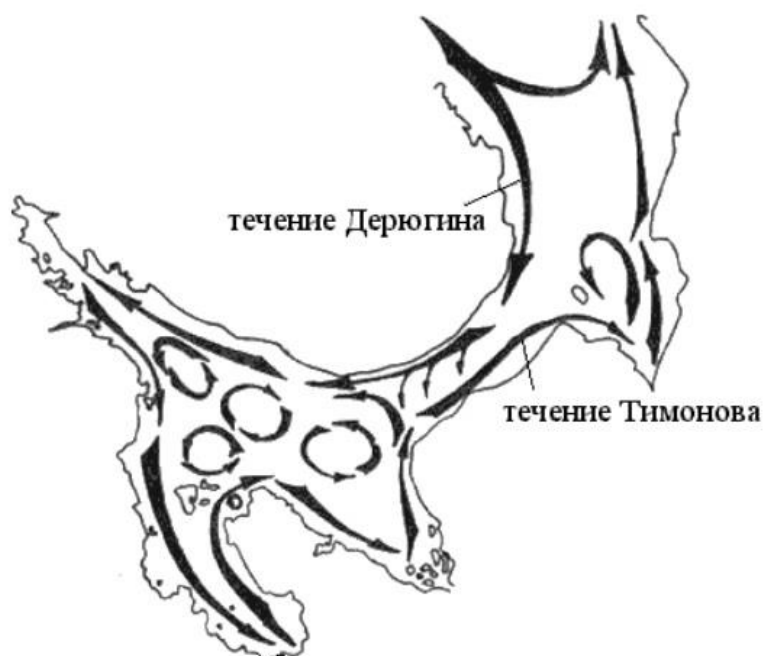


Рисунок 1.6 Схема, отражающая циркуляции беломорских вод.

Как мы видим из рисунка 1.6 из Баренцева моря в Горло поступает солёная вода. Донное течение достаточно сильно меняется, особенно это хорошо прослеживается во время смены сезона. В начале весны баренцевоморское донное течение, поступившее в Горло, резко меняет своё направление и устремляется в Кандалакшский залив. В начале лета этот же поток меняет свою ориентацию на Двинской залив. Такая необычная смена направления, отчасти связана с колебанием уровня стока р. Северная Двина.

Благодаря исследованиям мы знаем, что [3] «течение из Двинского залива в летнее время разделяется на две ветви, первая из которых следует в Горло вдоль Зимнего Берега, а вторая проникает в Бассейн, включаясь в циклонический круговорот. При этом придонные течения в марте и июле имеют компенсационную природу, т.е. направлены в сторону, противоположную поверхностному течению».

Тержевик А.Ю., Толстикова А.В., Филатов Н.Н. выделяют одним из важнейших фактором приливные движения, которые описывают циркуляцию беломорских вод. В своём труде [3] они сказали, что эти течения «доминируют среди этих движений полусуточные и суточные приливы. Приливная составляющая сказывается и на водообмене с Баренцевым морем. В случае учета приливных движений расход баренцевоморских вод существенно меньше, чем без их учета, что естественно, т. к. формировании приливного придонного пограничного слоя приводит к существенному увеличению диссипации энергии. В период полной воды течения направлены из Горла в Бассейн, отмечается отток из Онежского залива в Бассейн и вдольбереговая циркуляция в Двинском заливе циклонического характера».

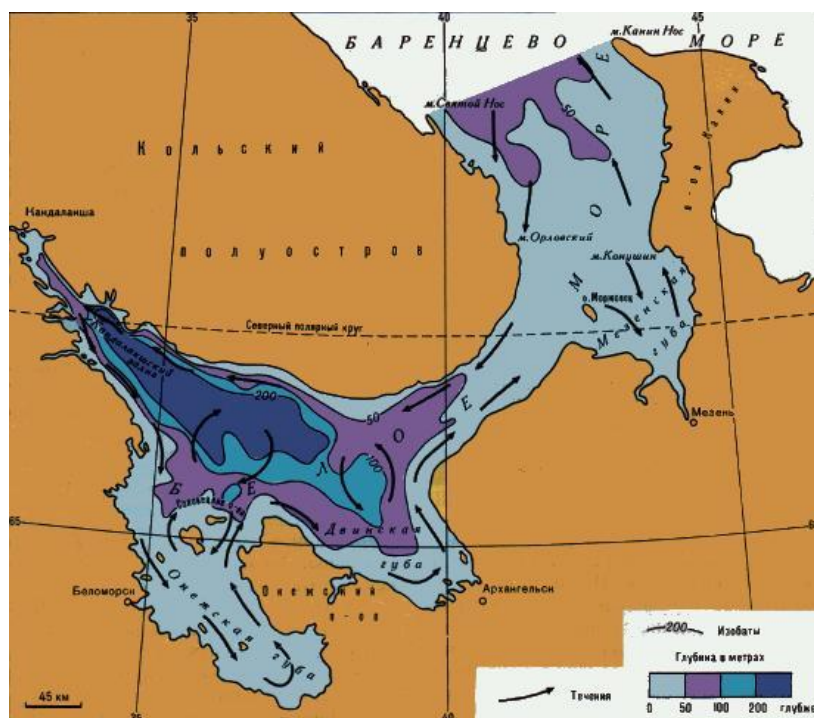


Рисунок 1.5 Постоянные поверхностные течения Белого моря, а также рельеф дна.

1.5 Ледовые условия в Белом море

Стабильно каждый год лёд покрывает акваторию Белого моря. В некоторых случаях в зимний период с сентября по май акватория полностью скрыта льдом. В весенний период обычно лёд полностью растаивает, поэтому мы можем отнести Белое море к морям с сезонным ледяным покровом.

Из ранее изложенных фактов мы знаем, что Белое море находится в непосредственной близости от Баренцевым морем. Сообщение этих море создают благоприятные условия для океанического влияния. Влияние баренцевоморских вод может смягчить климатические условия на акватории Белого моря, а также осолонить и увеличить температуру вод благодаря эффекту благодаря водообмена. Белое море глубоко врезано в сушу. Обособленность заливов, значимый материковый сток и мелководность отдельных районов моря описывают большой эффект материковых воздействий.

Тепловой баланс важен для изучения ледового режима моря. Следует отметить особое значение адвекции тепла вследствие течения из акватории Баренцева моря. Из него в беломорские воды поступает до трети от общего числа получаемого морем тепла за год.

Солёность также определяет ледовый режим. Из нам известно, что [1] «несмотря на значительное опреснение в мае и июне, ... к осени солёность поверхностных вод на большей части акватории выше 24.7‰. Солоноватые (менее 24,7 ‰) воды остаются только в вершинах заливов и главным образом на устьевых взморьях». Исходя из этого, центральным территориям акватории присущ морской тип ледового режима. Характерно, что образование льда не начнётся до тех пор, пока деятельный слой не охладится до определенной температуры, близкой к замерзанию.

Самый ранний лед наблюдается в устье р. Мезень (в конце октября). Позднее всего лёд образуется в Воронке и Горле (в январе). В исследуемой акватории преобладают плавучие льды. Постоянный вынос льда в акваторию

Баренцево море является отличительной чертой ледового режима Белого моря. С ним также связано такое явление, как постоянное образование полыньи среди зимы, которая очень быстро затягиваются молодым льдом.

На территории Белого моря процесс ледообразования доминирует над таянием льда, в силу различного распределения температуры над акваторией. Как правило, толщина плавучего льда доходит до 40 см. В особенно суровые периоды года толщина льда может достигать 135-150 см. Припай же в Белом море занимает незначительную площадь на мелководьях и берегах.

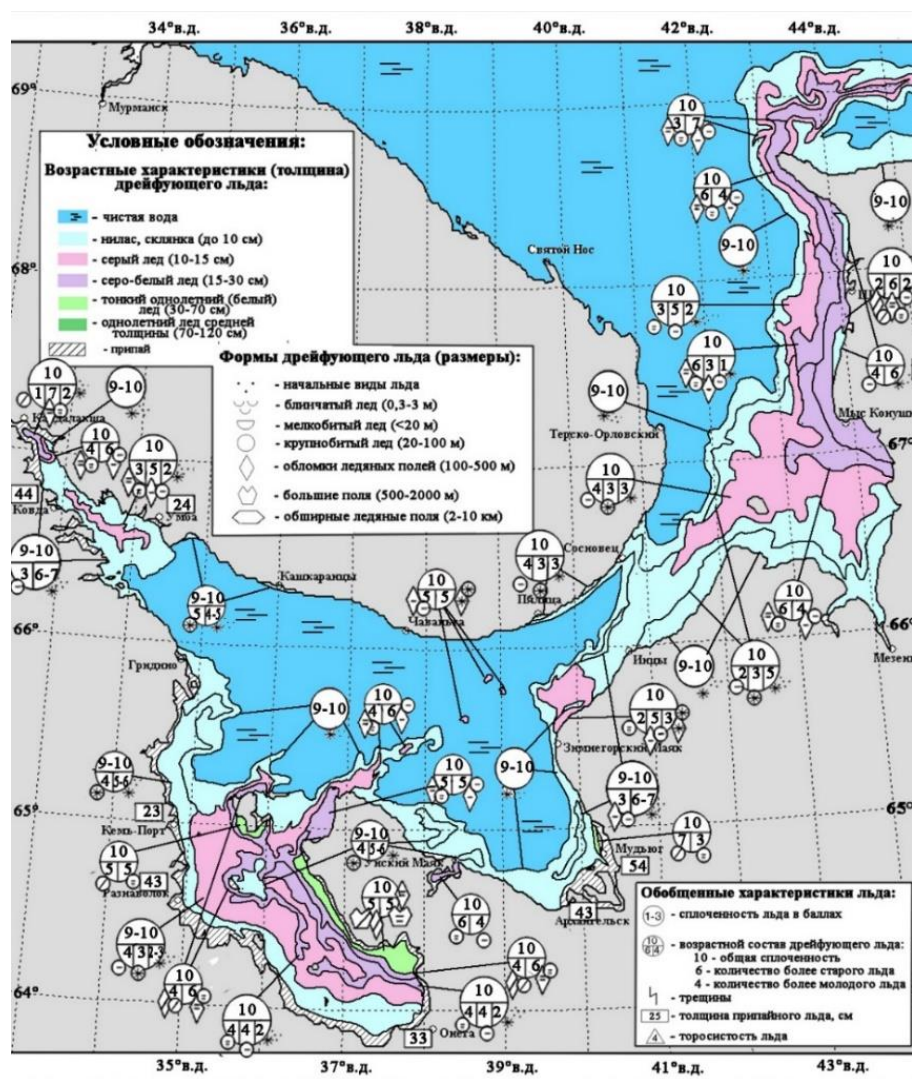


Рисунок 1.6. Пример карты ледовых условий в Белом море за 2 февраля 2023г.

Глава 2. Материалы и методы исследования

2.1 Метод анализа тренда временного ряда.

Многие методы анализа временных рядов могут быть использованы только в том случае, если мы определяем статистически исследуемый нами ряд как стационарный. Стационарность ряда означает, что основные статистические характеристики из исследуемой серии должны оставаться неизменными с течением определенного времени. Для этого на начальном этапе анализа ряда оценивается его стационарность. В случае если это свойство не выявлено, то ряд приводят к стационарному различными способами.

В случае не стационарности исследуемой последовательности, среднее значение и дисперсия частей нашей выборки могут изменяться скачкообразно.

Значит, что тренд говорит о наличии колебаний в долгосрочном изменении функции во времени с периодом, значительно превышающим длину выборки. Поэтому тренд может быть линейным или же квадратичным.

Уравнение линейного и нелинейного трендов записываются таким образом:

$$y = a_1t + a_0 + \varepsilon. \quad (2.1)$$

$$y = a_2t^2 + a_1t + a_0 + \varepsilon \quad (2.2)$$

где t - время.

Основные особенности трендовой составляющей:

1. Коэффициент детерминации r^2 (для линейного тренда). Аналог для квадратичного тренда является n^2 . Этот коэффициент характеризует вклад тренда в общее отклонение ряда. Вклад делится на значимый и незначимый. Проверка на значимость происходит на основе анализа важности коэффициента корреляции или же с помощью n^2 .

2. Величина тренда характеризуется изменяется в линейном тренде в течение определенного периода. Для среднегодового ряда величина тренда рассчитывается за 10 лет.

Величина тренда равна коэффициенту линейного тренда a_1 . Если оба тренда в рассматриваемой выборке значительны, то лучше использовать для

дальнейшего анализа нелинейный тренд, если он более чем на 5% вносит изменение в выборку. Для дальнейшего статистического анализа тренд следует исключить из временного ряда.

2.2 Гармонический анализ Фурье и спектр.

Во внутренней структуре ряда, изменяющегося по времени, наблюдаются одна или несколько циклических составляющих. Наиболее важные и более заметные из них отражены в АФК.

Если задача состоит в том, чтобы идентифицировать только циклические компоненты в исследуемом процессе, то необходимо использовать спектральный или гармонический анализы без предварительных расчетов АФК.

С помощью гармонического анализа можно разложить имеющийся раз без остатка на конечное число гармоник.

Формула разложения в ряд Фурье:

$$G_k = A_k \cos(\omega_k t - \varphi_k) \quad (2.3)$$

$$\omega_k = 2\pi/T_k \quad (2.4)$$

Ряд Фурье предполагает определение гармоник количеством $N/2$. Характеристики гармоники определяются на основании коэффициентов Фурье a_k b_k :

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \sin(\bar{\omega}_k * t_i)] \quad (2.5)$$

$$b_k = \sum_{i=1}^N [x_i \cos(\bar{\omega}_k * t_i)] \quad (2.6)$$

где x_i - исходный ряд; N - длина ряда; $\bar{\omega}_k$ - частота k -той гармоники; t_i - ряд времени $t_i = i$, где $i = 1, 2, 3, \dots, N$.

Некоторые характеристики гармоники:

$$\text{Амплитуда гармоники } A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad (2.7)$$

Она даёт представление о наибольшем отклонении характеристики от среднего на заданном периоде.

$$\text{Фаза гармоники } \varphi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k} \pm \pi; \quad (2.8)$$

$$\text{Дисперсия гармоники } D_k = \frac{A_k^2}{2}; \quad (2.9)$$

$$\text{Вклад гармоник в общую дисперсию ряда: } V_k = \frac{D_k}{D_y}, \quad (2.10)$$

где D_y -дисперсия исходного ряда.

Современные статистические ПО рассчитывают разложение Фурье методом БПФ (быстрого преобразования Фурье) при этом теряя информацию о некоторых характеристиках гармонических составляющих. Гармоники, имеющие большую дисперсию (и соответственно, амплитуду), будут представлены «пиками» на соответствующем графике спектра.

Вклад дисперсии гармоник в общую дисперсию исследуемого ряда тоже необходимо проверить на значимость. При данной проверке можно прийти к заключению, что вносит ли та или иная гармоника значительный вклад в рассеяние. Или же эта гармоника незначительна в данном ряду значений и её можно не учитывать при дальнейших расчётах.

В наше время программы, направленные на статистический анализ вычисляют разложение ряда Фурье по методу быстрого преобразования Фурье. Гармоники с большой дисперсией отображаются на рисунке «пиками». Эти вершины на графике, по большей части, могут дать информацию по аналогичным им значениям частот, а также периодам.

Восстановить ряд исследуемого процесса можно по вкладу значимых гармоник этого явления. С этим нам может помочь гармонический анализ вычисленного с помощью с помощью периодограммы.

2.3 Функция автокорреляции

Автокорреляция – это корреляционная связь выбранного статистического ряда с самим собой при разных сдвигах во времени, отличных от 0. Если все коэффициенты корреляции нанести на график зависимости и соединить кривой, получим автокорреляционную функцию (АКФ).

Графически это можно изобразить нанесением всех коэффициентов на графическую шкалу зависимости r от τ (сдвига). Далее соединим все точки в кривую и получим необходимую нам автокорреляционную функцию (АКФ).

Коэффициент автокорреляции на каждом сдвиге рассчитываем по формуле:

$$r(\tau) = \frac{1}{\sigma^2(N-1-\tau)} \sum_{i=1}^{N-\tau} (x_i - \bar{x})(x_{i+1} - \bar{x}) \quad (2.11)$$

Где N – длина реализации, τ – сдвиг, который меняется от 1 до максимума.

Максимальное количество сдвигов в первую очередь зависит от длины ряда – если ряд короткий, то есть N имеет до 30 значений, то $\tau_{\max} = N/3$; если ряд длинный, N включает в себя порядка 1000 значений, то $\tau_{\max} = N/10$.

Для того, чтобы узнать критическое значение r ($r_{\text{кр}}$) и соответствующее $t_{\text{кр}}$ необходимо решить квадратного уравнения относительно r .

$$r_{\text{кр}}(\tau) = \frac{-\sqrt{N-\tau-1} + \sqrt{N-\tau-1+4t_{\text{кр}}^2}}{2t_{\text{кр}}} \quad (2.12)$$

где N – длина реализации, τ – сдвиг АКФ; $t_{\text{кр}}(\alpha, v = N-\tau-1)$ – критерий Стьюдента. Последний необходим для решения нулевой гипотезы $H_0: r = 0$.

Вычисленные для каждого сдвига отличного от 0 значения $r_{\text{кр}}$ необходимо нанести на график АКФ в положительной и отрицательной области r . Тогда все значения АКФ, превышающие $r_{\text{кр}}$, являются значимыми.

При анализе АКФ можно сделать следующие выводы:

1. Какова инерция процесса

Инерционность явления определяется радиусом корреляции. Радиус корреляции $\tau_{\text{кр}}^2$ – это смещение в первой точке пересечения нулевой функции. Инерция процесса – это показатель то, как долго функция сохраняет свое состояние на предыдущем шаге. Существуют малоинерционные ($\tau_{\text{кр}}^2 = 1-2$) или инерционные ($\tau_{\text{кр}}^2 > 4-5$) процессы.

2. Каков период процесса

Если в процессе работы с временным рядом наблюдаются циклические колебания, они выражаются на графике АКФ пиками. Чем важнее локальный максимум, тем больше периодических компонентов будет присутствовать в процессе. Затем период циклических колебаний определяется по отклонению

АКФ, соответствующему локальному максимуму. Если важные локальные максимумы обнаруживаются в АКФ во время повторяющихся пересечений, то в этом случае на этом сдвиге кривой графика присутствует гармоника, период которой равен прохождению порядковому номеру этого локального максимума.

2.4 Метод кластерного анализа

Кластерный анализ (КА) – это набор взаимосвязанных методов моделирования и алгоритмов, предназначенных для решения задачи по классификации группы определенных признаков или объектов в многомерном пространстве свойств через самообучение программы. Следовательно, мы можем предположить, что такая классификация — это один из эффективнейших способов вычлениить наиболее важные свойства исходных объектов или явлений и объединить их по нескольким группам (признакам).

В этой работе мне довелось воспользоваться пакетом анализа PAST4 для расчета кластерного анализа.

2.5 Расчёт СГДМ.

Сумма градусо-дней мороза (далее СГДМ) с сентября по май (исследуемый зимний период) рассчитывалась по формуле:

$$\Sigma(-T)_a - \text{СГДМ за зимний период}, \quad (2.13)$$

где T_a – температура атмосферы.

Глава 3. Обработка результатов расчётной части

3.1 Обзор исходных данных для дальнейших расчётов.

Районом изучения мы обозначим Белое море. Для получения результата необходимо проследить тенденции изменения площади льда в Белом море, если таковые имеются, выделить трендовую составляющую, выполнить два вида анализа: гармонический и спектральный анализы Фурье, а также провести автокорреляционный анализ для получения полного объема информации.

Данные по ледовитости взяты с архивного сайта ААНИИ. Данные по температуре были взяты со специализированного массива данных aisor1.meteo.ru и представлены в таблице 3.1:

Таблица 3.1. Прибрежные метеорологические станции на Белом море, выбранные для исследования.

№ п/п	Индекс	Название пункта
1.	22500	г. Архангельск
2.	22217	г. Кандалакша
3.	22165	м. Канин Нос
4.	22520	Кемь-порт
5.	22471	г. Мезень
6.	22641	г. Онега
7.	22140	м. Святой нос
8.	22324	<u>пгт.</u> Умба

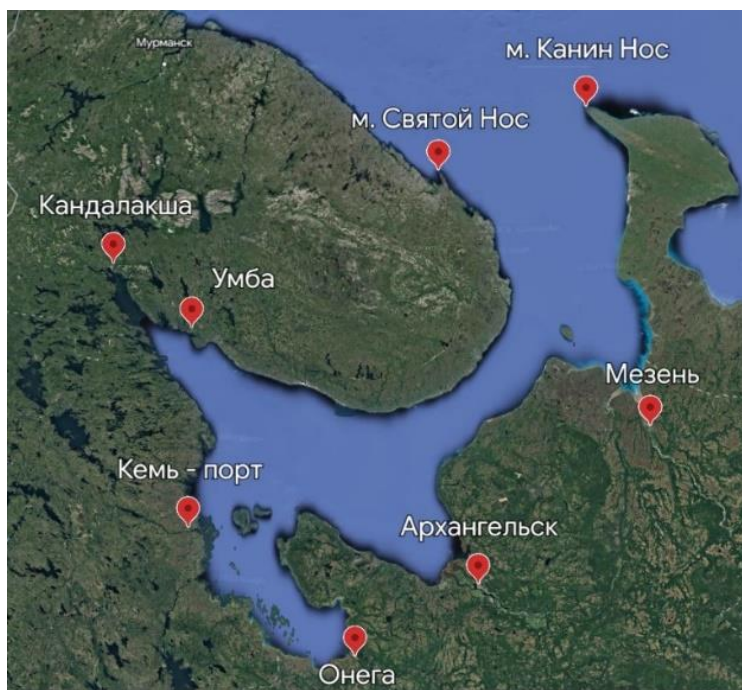


Рисунок 3.1 Станции на карте исследуемой акватории.

3.2 Выделение трендовой составляющей исходных данных

Для выполнения следующей задачи расчётов выразим уравнение линейного тренда для ледовитости (К) и времени (t): $K = -0.3304t + 28.958$

Следующим шагом нам необходимо произвести проверку коэффициентов регрессии а и b на значимости, а также коэффициента детерминации r^2 .

Таблица 3.2 Характеристики линейного тренда среднегодового ряда.

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0.704
R-квадрат	0.495
Нормированный R-квадрат	0.483
Стандартная ошибка	228.123
Наблюдения	44

Дисперсионный анализ				
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	1	2143609.656	2143609.656	2143609.656
Остаток	42	2185675.512		
Итого	43	4329285.168		

	<i>Коэффициент</i> <i>ы</i>	<i>Стандартная</i> <i>ошибка</i>	<i>t-</i> <i>статистика</i>	<i>P-</i> <i>Значение</i>
У-пересечение	562.729	129.916	4.331	9.016E-05
Переменная X1	37.357	5.8206	6.418	9.94E-08

<i>t</i> [*] <i>a</i>	<i>t</i> [*] <i>b</i>	<i>t</i> _{кр}	σ	<i>t</i> [*]
4.331	6.418	4.41	0.079	8.815

Проверим значимость коэффициентов t^*a и t^*b .

Для данной проверки производится на основе проверки нулевой гипотезы, которую необходимо сформулировать таким образом:

Нулевая гипотеза: $H_0: a = 0; b = 0$ и альтернативная ей: $H_1: a_i \neq 0; b \neq 0$.

Также нужно рассчитывается критерий Стьюдента для коэффициента регрессии и свободного члена:

$$t_a^* = \frac{|a|}{\sigma_a}; t_b^* = \frac{|b|}{\sigma_b}$$

$$t^*a = 4.331; t^*b = 6.418.$$

Для проверки гипотезы выбираем подходящий нам критерий Стьюдента, рассчитываем критическое значение критериев t^* и $t_{кр}$ (по модулю).

Далее производим расчёт средней квадратической погрешности расчёта σ_r . После рассчитываем эмпирическое значение критерия Стьюдента ($t^*=8.815$) для коэффициента корреляции. Коэффициент значим ($t_{кр} < t^*$). Трендовая составляющая присутствует, а его величина = -0.33 тыс. км²/10 лет.

Далее нам необходимо сформулировать уравнение для нелинейного тренда, чтобы проверить его значимость. Уравнение нелинейного тренда для ледовитости и времени:

$$K = 0.0024t^2 - 0.4403t + 29.8,$$

где K – ледовитость, t – время.

Производим проверку коэффициентов регрессии a_1, a_2 и b и коэффициента детерминации r^2 на его значимость.

Таблица 3.3 Характеристики нелинейного тренда среднегодового ряда.

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0.7038
R-квадрат	0.4954
Нормированный R-квадрат	0.471
Стандартная ошибка	230.824
Наблюдения	44

Дисперсионный анализ				
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	2144813.031	20.127	8.12964E-07

Остаток	41	2184472.137		
Итого	43	4329285.168		

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t- статистика</i>	<i>P- Значение</i>
Y-пересечение	620.461	406.017	1.529	0.134
Переменная X1	31.679	38.231	0.828	0.412
Переменная X2	0.129	0.861	0.151	0.881

t*a1	t*a2	t*b	t _{кр}	σ	t*
1.528	0.829	0.151	4.51	0.077	9.04

Необходимо проверить на значимость коэффициенты t^*a и t^*b .

Для данной проверки производится расчёты на основе проверки гипотезы: нулевая гипотеза: $H_0: a=0; b=0$ и альтернативная ей: $H_1: a_i \neq 0; b \neq 0$.

Также нужно рассчитывается критерий Стьюдента для коэффициента регрессии и свободного члена:

$$t_a^* = \frac{|a|}{\sigma_a}; t_b^* = \frac{|b|}{\sigma_b}$$

$$t^*a_1 = 1.528; t^*a_2 = 0.829; t^*b = 0.151.$$

Необходимо проверить нулевую и отличную ей гипотезы с помощью критерия Стьюдента и рассчитываем его критическое значение t^* и сравниваем с $t_{кр}$ по модулю.

После расчётов средней квадратическую погрешности σ_r коэффициента корреляции и эмпирического значения критерия Стьюдента ($t^*=9.04$), мы делаем вывод, что коэффициент значимым, так как $t_{кр} < t^*$. Это значит, что тренд присутствует и равен $0.0024 \text{ км}^2/\text{год}$.

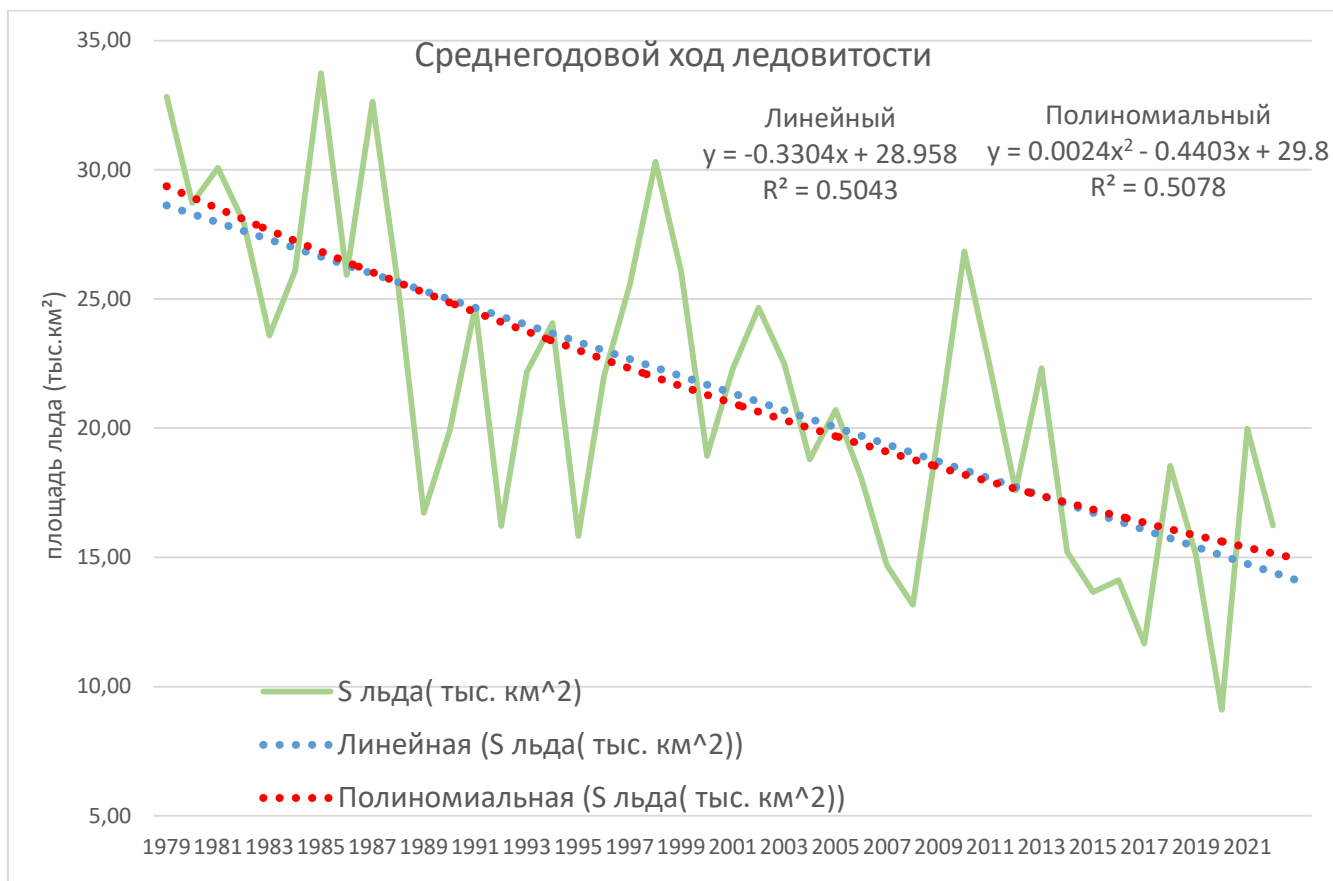


Рисунок 3.2 Среднегодовой ход ледовитости и её линейный и нелинейный тренды.

По графику видно, что площадь льда на акватории с долгого течением времени уменьшается. Наименьшее значение ледовитости наблюдается в 2020 г. (9.100 тыс. км²). Наибольшее значение ледовитости наблюдается в 1985 г. (33.742 тыс. км²)

3.3 Расчет гармонического анализа Фурье и спектра для Белого моря.

Далее для расчётов необходимо удалить тренд из исходного ряда, если он значим. Так как в нашем варианте тренд значим, то мы не рассматриваем удаление среднее значение. Далее нам предстоит работать с полученным рядом отклонений. В специальной программе «PAST 4» строится периодограмма для ряда отклонений от тренда.

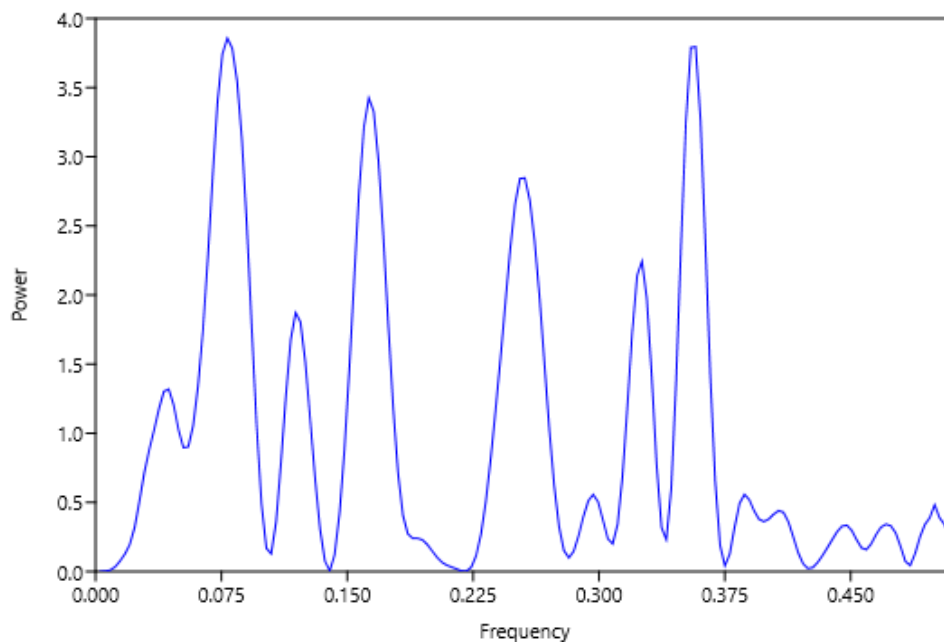


Рисунок 3.3 Спектр для среднегодового ряда ледовитости.

Программа выдает нам изображение периодограммы и соответствующую ему таблицу. В ней мы определяем периоды, которые соответствуют «пикам» на полученной ранее периодограмме.

Для каждого из данных периодов отдельно рассчитываем характеристики гармоники: амплитуду, фазу, дисперсии гармоник, вклад в дисперсию исходного ряда.

Таблица 3.4 Характеристика гармоник.

	ГАРМ.1	ГАРМ.2	ГАРМ.3	ГАРМ.4	ГАРМ.5
Пар-ры	0.079	0.1628	0.256	0.326	0.358
Частота (1/год)	12.74	6.1428	3.909	3.071	2.796
Период (год)	0.493	1.023	1.607	2.045	2.247
Частота (рад/год)	12.741	6.143	3.909	3.071	2.797
К-т Фурье a_k	-0.690	0.627	-0.389	0.428	0.251
К-т Фурье b_k	0.636	0.2224	-0.227	-0.25	0.6738
A (км ²)	0.939	0.667	0.453	0.496	0.719
Фаза (рад)	2.315	4.3719	4.183	2.098	3.498
Фаза (год)	0.182	0.711	1.07	0.683	1.251
Дисперсия гармоник (км ²)	0.4403	0.222	0.104	0.1231	0.259
Дисперсия исх.ряда (км ²)	17.71				
Вклад гармоник в ряд отклонения от исходного	0.024868	0.012526	0.005725	0.00695	0.014598
N	44				
σ	0.1505	0.1524	0.153	0.153	0.1525
t^*	1.048	0.735	0.493	0.544	0.794
R	0.1577	0.112	0.0756	0.0833	0.1208

Далее проводим оценку значимости выбранных гармоник. Восстановим ряд по сумме всех значимых гармоник.

Производим проверку гармоник на значимость. Рассчитываем критическое значение критерий Стьюдента. Из расчётов следует, что значимыми оказались только две гармоники:

1. Гармоника №1: $G_1 = 0.9385 \cdot \cos(12.741 \cdot t - 2.315)$

Период равен 0.493 года, амплитуда 0.939 км².

$\sigma = 0.1505$, $t^* = 1.048$.

2. Гармоника №5: $G_5 = 0.719 \cdot \cos(2.797 \cdot t - 3.498)$

Период равен 2.24 года, амплитуда 0.719 км².

$\sigma = 0.1525$, $t^* = 0.794$.

По данным таблицы 3.4 мы делаем вывод, что только G_1 и G_5 вносят наибольший вклад в $G_{\text{общ}}$. Хотя G_1 и G_5 и меньше, чем $t_{\text{кр}} = 4.41$, но её значения являются одним из максимальных среди всех t^* гармоник.

Далее строим совместный график исходных и восстановленных значений исследуемого ряда.

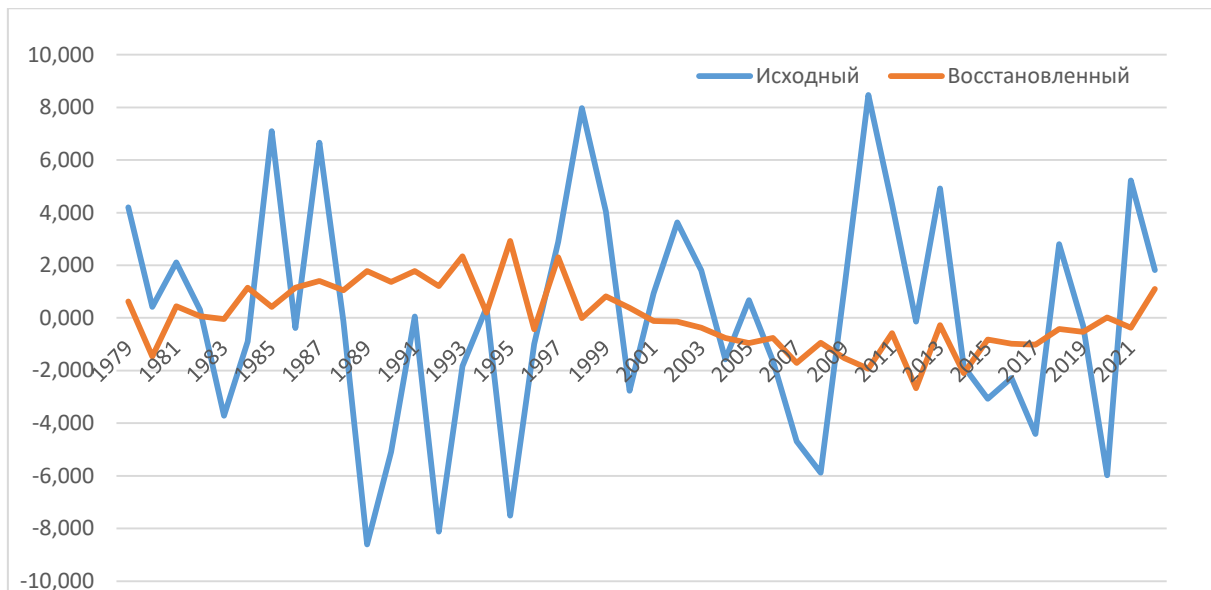


Рисунок 3.4 Совмещенный график исходных значений ледовитости и восстановленных по формулам гармоник.

По рисунку 3.4. мы можем сделать вывод, что восстановленный ряд недостаточно хорошо описывает ход. Видна противофаза. Максимумы и минимумы стали сглажены.

3.4 Анализ остатков по АФК

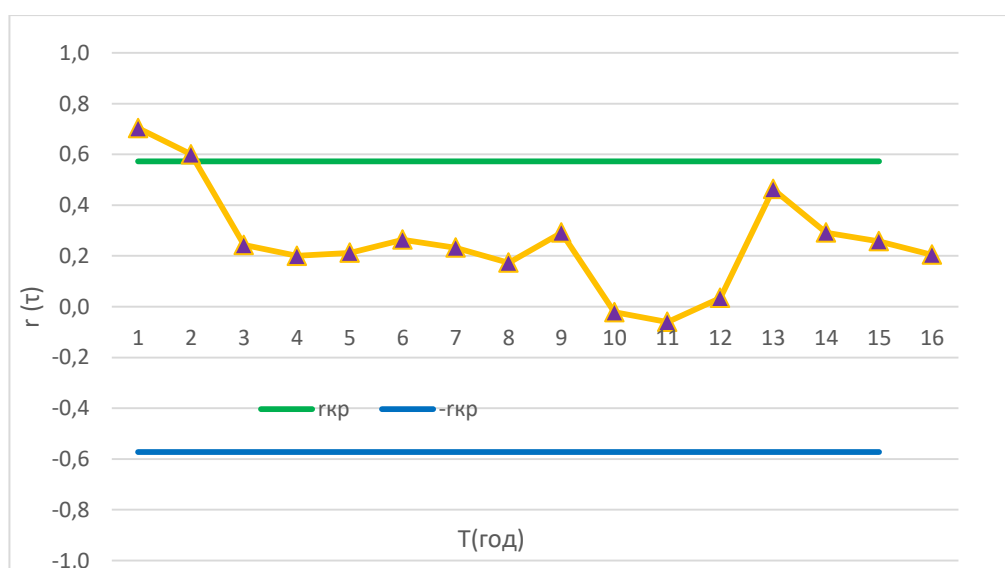


Рисунок 3.5 Автокорреляционная функция межгодовой изменчивости.

При сравнении 2-х зависимостей и можем видеть, что зависимость S от СГДМ прогнозируется лучше, чем СГДМ от S . Мы можем судить об этом по коэффициенту корреляции. Поэтому в дальнейшем мы будем прогнозировать S от СГДМ. На графике видны колебания, что свидетельствует о наличии циклического процесса. Зелёным и синим линиями на рисунке изображены критические значения коэффициента корреляции. Процесс малоинерционный, радиус корреляции ($\tau^2_{кор}$) = 1.

На ВКФ присутствует значимый коэффициент корреляции на сдвиге, отличный от нуля, значит характеристики связаны асинхронно. У нас один значимый коэффициент при $S = f(\text{СГДМ})$, на сдвиге в 1 год.

В общем виде уравнение для прогноза формулируется как:

$$y_{i+k} = a_1 x_1 + a_0 + \varepsilon$$

Производим автопрогнозирование:

Ряд делим на зависимую с 1979 по 2015 г и независимую с 2015 по 2022. При этом расчет модели исключает независимую часть, в нашем случае с 2015 по 2022 г.

Автопрогнозирование выполняется с заблаговременностью 1 год, т.к. наибольший коэффициент автокорреляции находится на сдвиге 1:

$$L_{i+1} = 0.0133 * L_i + 3.41$$

Таблица 3.5 Расчёт модели

ВЫВОД ИТОГОВ	
<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0.188
R-квадрат	0.035
Нормированный R-квадрат	0.007
Стандартная ошибка	5.295
Наблюдения	36

Дисперсионный анализ				
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	1	35.035	1.25	0.271
Остаток	34	953.431		
Итого	35	988.467		

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>
Y-пересечение	16.53	5.401	3.061
Переменная X1	0.264	0.236	1.118
t*a	t*b	tкр	
1.118	3.061	2.03	

Произвели проверку на значимость коэффициентов регрессии a и b . Оба коэффициента являются незначимыми ($t^*a=1.118$; $t^*b=3.061$; $t_{кр}=2.03$). Коэффициент детерминации равен 3.5%, что меньше 70%. Независимых переменных недостаточно для описания дисперсии исходного ряда.

Также необходимо произвести проверку модели на адекватность, с помощью критерия Фишера. Из расчётов понятно, что $F^*>F_{кр}$, модель считается адекватной для дальнейшего анализа.

Рассчитываем стандартную ошибку независимого прогноза ($\sigma_{\text{ен}} = 4.297$ тыс. км²), и производим сравнение со стандартной ошибкой модели ($\sigma_{\text{м}} = 4.072$ тыс. км²). Это необходимо для оценки изменчивости внутренней структуры во времени. Т.к. $\sigma_{\text{ен}} > \sigma_{\text{м}}$, то внутренняя структура изменения выбранной нами характеристики меняется со временем. Модель пригодна для прогноза.

Так же было рассчитано стандартное отклонение исходного ряда для проверки модели на качество. $\sigma = 5.977$ тыс. км² и сравнено с ошибкой модели, $\Sigma_m < \sigma$, выполняется условие качества модели.

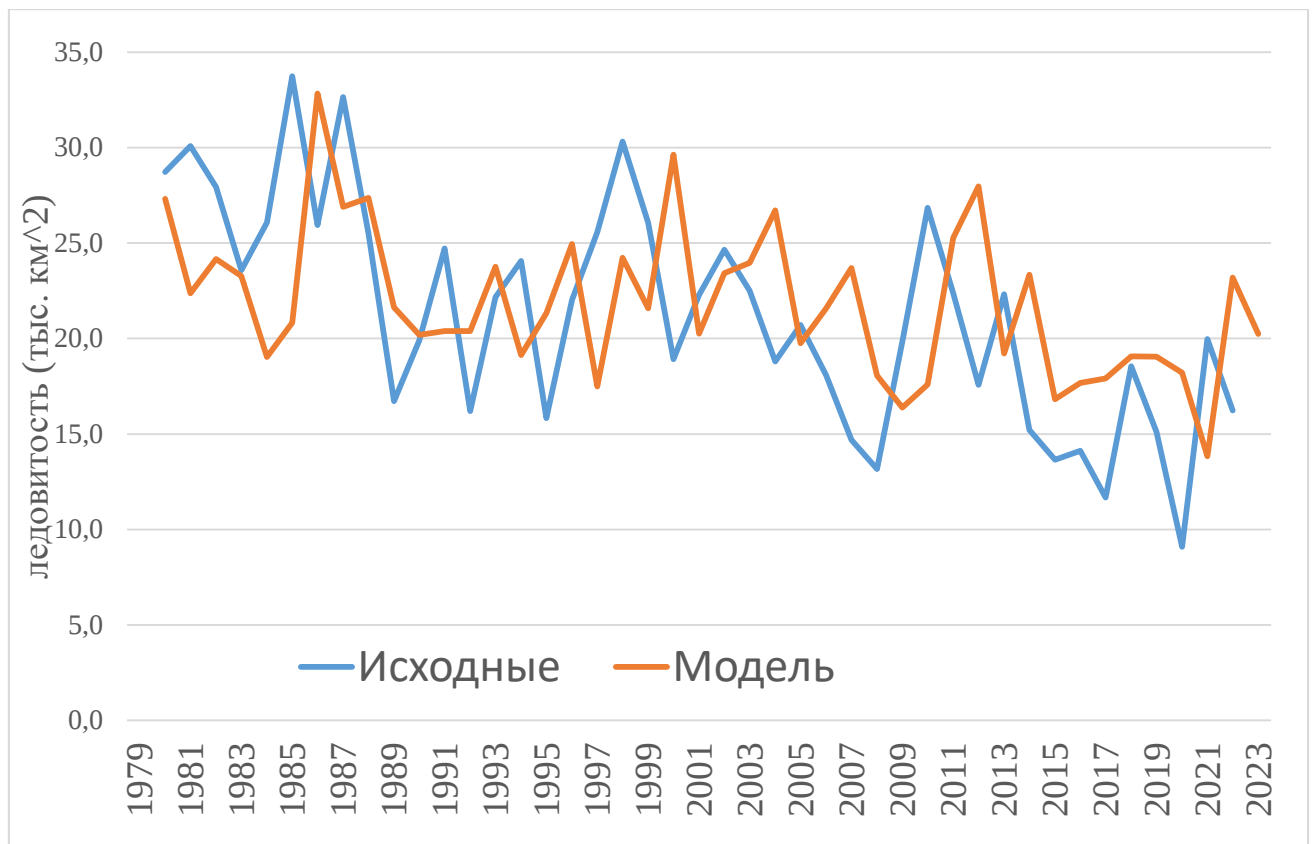


Рисунок 3.6 Совмещенный график исходных данных и вычисленной модели.

Из графика видно, что модель повторяет ход исходных данных. Модель достаточно хорошо описывает поведение исходных данных. Однако всё равно имеются несостыковки с исходными данными.

3.5 Расчёт СГДМ для Белого моря.

Для определения критерия суровости зим, необходимо рассчитать сумму градусо-дней мороза (СГДМ). После этого произвести кластерный анализ по этим данным с 1977 по 2022 год.

Таблица 3.5 СГДМ на выбранных восьми станциях с 1977 по 2022 гг.

Год	Святой нос	Канин нос	Кандалакша	Кемь порт	Умба	Архангельск	Мезень	Онега
1977-1978	1085.5	1340.5	1652.2	1427.6	1563.7	1548	1887	1507.6
1978-1979	1478.5	1839.7	2135.1	1729.3	1965.7	1810	2342.2	1793.5
1979-1980	1077.3	1343.9	2062.3	1636.9	1830.1	1408	1959.9	1515.4
1980-1981	1129.6	1413.2	2028.4	1531.1	1817	1554.1	1789.8	1433.3
1981-1982	932.6	1317.2	1613.8	1215.8	1456.4	1482.1	1731.5	1344.7
1982-1983	643.7	980.5	1262.6	921.7	1066.3	1136.9	1364.7	949.2
1983-1984	796.8	941.6	1653.5	1251.7	1428.2	1282.4	1455.7	1174.5
1984-1985	-	-	-	-	-	2259.6	-	-
1985-1986	751.8	1333.7	1786.4	1595.1	1672.4	1775.8	1943.3	1615.5
1986-1987	1134.4	1603.8	1936.6	1658.3	1788.2	1814.6	2027.5	1741.6
1987-1988	583.4	1274.2	1752	1496.6	1385.4	1347.5	1838.3	1513.3
1988-1989	478	1004.8	1370	1015	1012.8	1229.9	1519.5	1021.7
1989-1990	744.4	1066.6	1310	1038.1	867.5	1247	1457.1	1090
1990-1991	784.2	1153.3	1553.5	1282.9	1365.2	1247	1726.2	1335.4
1991-1992	531.7	988.5	1142.7	827.8	697.6	1521.4	1544.4	902.1
1992-1993	771.7	1020.3	1401.3	1024.6	1161.6	1144.8	1568.3	1106.5
1993-1994	884.3	1181.3	1566.8	1448.9	1361.9	1322.7	1665.4	1495.2
1994-1995	585.5	765.3	1017.2	774.2	864.3	1617.9	1171.8	859.7
1995-1996	791.9	992.9	1690.2	1400	1451.9	1010.9	1697.4	1425.4
1996-1997	886.5	1169.9	1438.3	1084.6	1261.6	1559.9	1625.1	1178.1
1997-1998	1211.7	1773.1	1916.5	1579.5	1772.5	1344.2	2385.4	1719.4
1998-1999	1298.9	1898.3	1780.5	1452.6	1646.7	1999.2	2290.4	1560.8
1999-2000	701	1062.1	1261.9	989.3	1064.1	1236	1448.7	1058.3
2000-2001	906.1	1292.5	1291.3	1052.8	1185.1	1494.4	1873.2	1270.1
2001-2002	883	1287.4	1571	1179.6	1381.1	1538	1903.9	1274.6
2002-2003	860	895.8	1739.3	1458.8	1597.8	1761	1960.5	1641.5
2003-2004	710.9	956.9	1369.4	1092.8	1205.9	1195.5	1486.5	1027.1
2004-2005	928.7	1101.3	1263.5	1063	1090.3	1344.1	1650	1104.1
2005-2006	786.5	939.1	1326.4	1214.5	1124.1	1515.1	1590.9	1423.3
2006-2007	613.8	858.2	1323	916	1145.4	1057.3	1243.9	920.2
2007-2008	548.5	772.9	1011.1	692.1	810.6	921.2	1264.9	726.9
2008-2009	668	924.4	1130.4	924.9	982.5	1019.4	1326.7	914.8
2009-2010	965.2	1399	1532.8	1315	1396.2	1643.5	1860.8	1459.9
2010-2011	881.4	884.1	1674.9	1489.6	1510	1864	1917.7	1692.2
2011-2012	657.2	748.1	1177	985.6	941.3	1151.7	1326.7	1044.9
2012-2013	839.2	1072.5	1573.7	1244.1	1334.5	1486.9	1708.9	1350.2
2013-2014	577.2	834.2	1115.7	663.4	902.9	956.4	1271.9	754
2014-2015	585.2	845.6	1118.6	706.9	919.2	1025.1	1277.9	779.1
2015-2016	652.4	722.6	884.9	716.2	783.2	1045	1042.6	816.6
2016-2017	562.4	776.4	1126.3	799.3	934.4	1139.3	1404.2	989.9
2017-2018	-	852.4	1303.3	909.9	1123.6	1137.7	1266.7	1011.2
2018-2019	571.1	773.5	1252.6	874.4	1016.7	1068.9	1232.8	888.7
2019-2020	526.6	718.6	1026.4	567.8	785.8	713.4	905.1	533.2
2020-2021	818	1146.9	1245.5	1074.6	1140.5	1475.2	1705.1	1266.9
2021-2022	678.4	-	1337.7	890.4	1139	1233.9	1482.7	1044.4

3.6 Реализация кластерного анализа исходных данных

По рассчитанным выше данным СГДМ мы провели кластерный анализ для определения трех классов суровости зим (суровая, умеренная и мягкая) по выбранным возьми станциям. В силу того, что на некоторых метеорологических станциях нет данных по температуре, а соответственно невозможно посчитать СГДМ корректно, необходимо выбрать только три станции. В дальнейшем мы будем работать со станциями: г. Архангельск, г. Кандалакша и Онега. Святой нос, Канин нос, Кемь-порт, Умба и Мезень будут представлены в приложении А (дендрограммы) и приложении Б (СГДМ по степеням суровости на станциях).

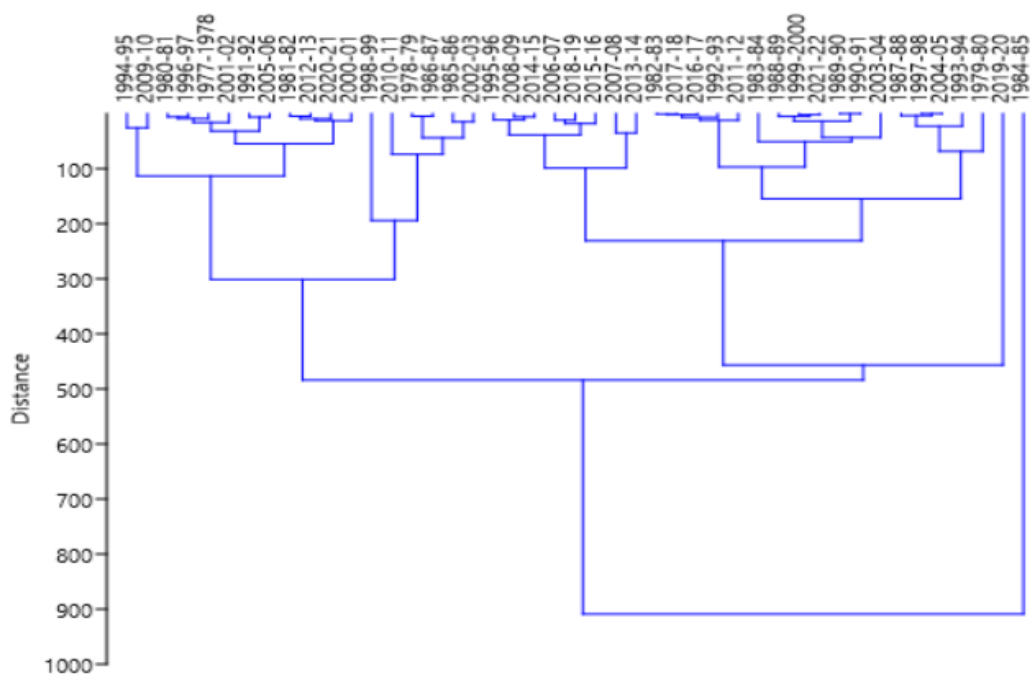


Рисунок 3.6 Дендрограмма станции Архангельск.

Таблица 3.6 СГДМ по степеням суровости на станции Архангельск.

Суровые		Умеренные		Мягкие	
1977-1978	1652.2	1982-1983	1262.6	1994-1995	1017.2
1978-1979	2135.1	1988-1989	1370	2007-2008	1011.1
1979-1980	2062.3	1989-1990	1310	2015-2016	884.9
1980-1981	2028.4	1991-1992	1142.7	2019-2020	1026.4
1981-1982	1613.8	1992-1993	1401.3		
1983-1984	1653.5	1996-1997	1438.3		
1985-1986	1786.4	1999-2000	1261.9		
1986-1987	1936.6	2000-2001	1291.3		
1987-1988	1752	2003-2004	1369.4		
1990-1991	1553.5	2004-2005	1263.5		
1993-1994	1566.8	2005-2006	1326.4		
1995-1996	1690.2	2006-2007	1323		
1997-1998	1916.5	2008-2009	1130.4		
1998-1999	1780.5	2011-2012	1177		
2001-2002	1571	2013-2014	1115.7		
2002-2003	1739.3	2014-2015	1118.6		
2009-2010	1532.8	2016-2017	1126.3		
2010-2011	1674.9	2017-2018	1303.3		
2012-2013	1573.7	2018-2019	1252.6		
		2020-2021	1245.5		
		2021-2022	1337.7		

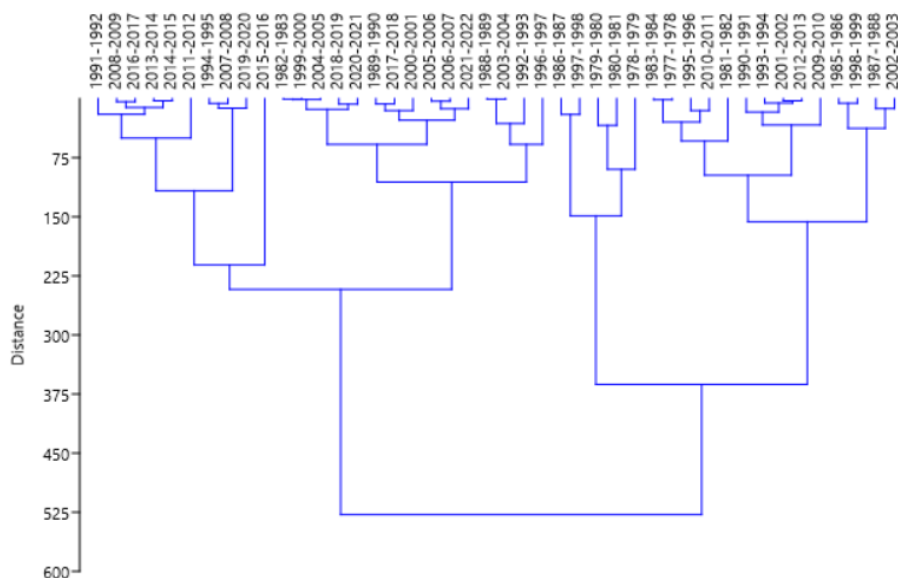


Рисунок 3.7. Дендрограмма станции Кандалакша

Таблица 3.7 СГДМ по степеням суровости на станции Кандалакша.

Суровые		Умеренные		Мягкие	
1978-79	1810	1977-78	1548	1982-83	1136.9
1984-85	2259.6	1979-80	1408	1992-93	1144.8
1985-86	1775.8	1980-81	1554.1	1995-96	1010.9
1986-87	1814.6	1981-82	1482.1	2003-04	1195.5
1998-99	1999.2	1983-84	1282.4	2006-07	1057.3
2002-03	1761	1987-88	1347.5	2007-08	921.2
2009-10	1643.5	1988-89	1229.9	2008-09	1019.4
2010-11	1864	1989-90	1247	2011-12	1151.7
		1990-91	1247	2013-14	956.4
		1991-92	1521.4	2014-15	1025.1
		1993-94	1322.7	2015-16	1045
		1994-95	1617.9	2016-17	1139.3
		1996-97	1559.9	2017-18	1137.7
		1997-98	1344.2	2018-19	1068.9
		1999-2000	1236		
		2000-01	1494.4		
		2001-02	1538		
		2004-05	1344.1		
		2005-06	1515.1		
		2012-13	1486.9		

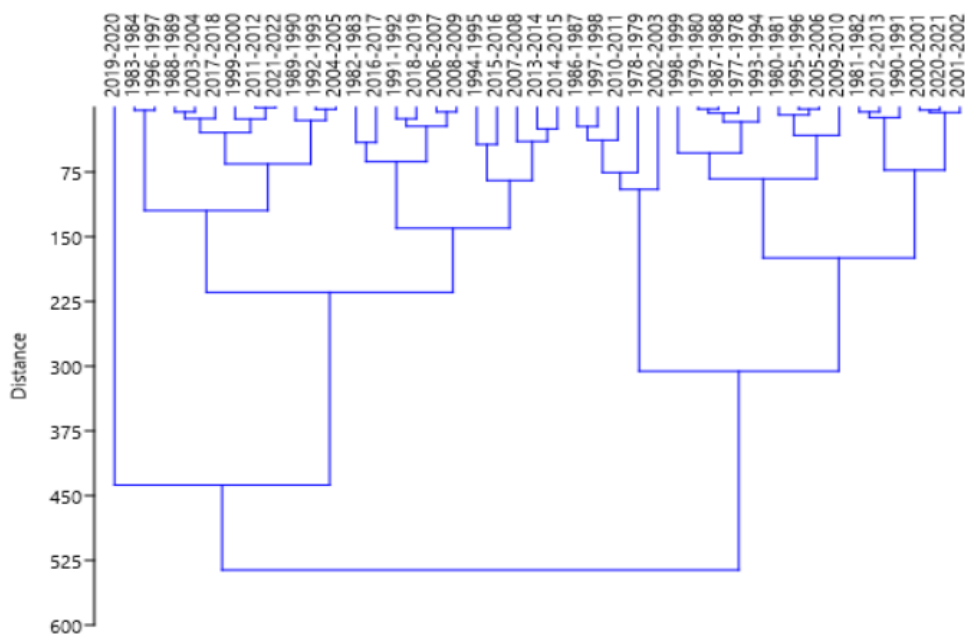


Рисунок 3.8 Дендрограмма станции Онега.

Таблица 3.8 СГДМ по степеням суровости на станции Онега

Суровые		Умеренные		Мягкие	
1977-1978	1507.6	1982-1983	949.2	2007-2008	726.9
1978-1979	1793.5	1983-1984	1174.5	2013-2014	754
1979-1980	1515.4	1988-1989	1021.7	2014-2015	779.1
1980-1981	1433.3	1989-1990	1090	2015-2016	816.6
1981-1982	1344.7	1991-1992	902.1	2019-2020	533.2
1985-1986	1615.5	1992-1993	1106.5		
1986-1987	1741.6	1994-1995	859.7		
1987-1988	1513.3	1996-1997	1178.1		
1990-1991	1335.4	1999-2000	1058.3		
1993-1994	1495.2	2000-2001	1270.1		
1995-1996	1425.4	2001-2002	1274.6		
1997-1998	1719.4	2003-2004	1027.1		
1998-1999	1560.8	2004-2005	1104.1		
2002-2003	1641.5	2006-2007	920.2		
2005-2006	1423.3	2008-2009	914.8		
2009-2010	1459.9	2011-2012	1044.9		
2010-2011	1692.2	2016-2017	989.9		
2012-2013	1350.2	2017-2018	1011.2		
		2018-2019	888.7		
		2020-2021	1266.9		
		2021-2022	1044.4		

3.7 Определение взаимосвязи между СГДМ и площадью льда.

Таблица 3.9 Степени суровости на каждый год на всех станциях.

Год	Святой нос	Канин нос	Кандалакша	Кемь порт	Умба	Архангельск	Мезень	Онега
1977-1978	сур	сур	сур	сур	сур	умерен	сур	сур
1978-1979	сур	сур	сур	сур	сур	сур	сур	сур
1979-1980	сур	сур	сур	сур	сур	умерен	сур	сур
1980-1981	сур	сур	сур	сур	сур	умерен	умерен	сур
1981-1982	мяг	сур	сур	умерен	умерен	умерен	умерен	сур
1982-1983	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен	мяг	мяг	умерен
1983-1984	мяг	умерен	сур	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен
1984-1985	-	-	-	-	мяг	сур	-	мяг
1985-1986	мяг	сур	сур	сур	сур	сур	сур	сур
1986-1987	сур	сур	сур	сур	сур	сур	сур	сур
1987-1988	умерен	сур	сур	сур	умерен	умерен	сур	сур
1988-1989	умерен	умерен	умерен	умерен	мяг	умерен	умерен	умерен
1989-1990	мяг	умерен	умерен	умерен	мяг	мяг	умерен	умерен
1990-1991	мяг	умерен	сур	сур	умерен	умерен	умерен	сур
1991-1992	умерен	умерен	умерен	мяг	мяг	умерен	умерен	умерен
1992-1993	мяг	умерен	умерен	умерен	умерен	мяг	умерен	умерен
1993-1994	мяг	умерен	сур	сур	умерен	умерен	умерен	сур
1994-1995	умерен	мяг	мяг	мяг	мяг	умерен	мяг	умерен
1995-1996	мяг	умерен	сур	сур	умерен	мяг	умерен	сур
1996-1997	мяг	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен
1997-1998	сур	сур	сур	сур	сур	умерен	сур	сур
1998-1999	сур	сур	сур	сур	сур	сур	сур	сур
1999-2000	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен
2000-2001	мяг	сур	умерен	умерен	умерен	умерен	сур	умерен
2001-2002	мяг	сур	сур	умерен	умерен	умерен	сур	умерен
2002-2003	мяг	умерен	сур	сур	сур	сур	сур	сур
2003-2004	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен	мяг	умерен	умерен
2004-2005	мяг	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен
2005-2006	мяг	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен	сур
2006-2007	умерен	мяг	умерен	умерен	умерен	мяг	мяг	умерен
2007-2008	умерен	мяг	мяг	мяг	мяг	мяг	мяг	мяг
2008-2009	умерен	умерен	умерен	умерен	мяг	мяг	мяг	умерен
2009-2010	мяг	сур	сур	сур	умерен	сур	сур	сур
2010-2011	мяг	умерен	сур	сур	сур	сур	сур	сур
2011-2012	умерен	мяг	умерен	умерен	мяг	мяг	мяг	умерен
2012-2013	мяг	умерен	сур	умерен	умерен	умерен	умерен	сур
2013-2014	умерен	мяг	умерен	мяг	мяг	мяг	мяг	мяг
2014-2015	умерен	мяг	умерен	мяг	мяг	мяг	мяг	мяг
2015-2016	умерен	мяг	мяг	мяг	мяг	мяг	мяг	мяг

2016-2017	умерен	мяг	умерен	мяг	мяг	мяг	мяг	умерен
2017-2018	-	мяг	умерен	умерен	умерен	мяг	мяг	умерен
2018-2019	умерен	мяг	умерен	умерен	мяг	мяг	мяг	умерен
2019-2020	умерен	мяг	мяг	мяг	мяг	мяг	мяг	мяг
2020-2021	мяг	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен
2021-2022	умерен	сур	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен	умерен

В ходе расчетов была сформирована общая таблица 3.9. Благодаря выполненному ранее кластерному анализу были определены степени суровости, соответствующие всем зимам на в промежутке с 1977 по 2022 для каждой выбранной ранее станций. В ходе дальнейшего анализа необходимо выбрать из этой таблицы три таких года, в которые на всех или большинстве станций совпадает степень суровости зимы. Зимы 1986-1987 года (суровая), 1999-2000 года (умеренная) и 2019-2020 года (мягкая) подошли под этот критерий.

Далее была сформирована таблица, описывающая зимний период, площадей льда за три года, выбранных ранее,

Таблица 3.10 Таблица площадей льда за три зимы разной суровости

	суровая	умеренная	мягкая
	1986-87 (тыс. км ²)	1999-2000 (тыс. км ²)	2019-20 (тыс. км ²)
сентябрь	0	0	0
октябрь	10	6.5	6.1
ноябрь	9.3	6.4	5.2
декабрь	26.7	11.2	6.4
январь	68.8	44.8	11.5
февраль	78.7	59.7	32.1
март	80	55.5	23.3
апрель	72.2	31.2	8.6
май	39.7	8	5.7
июнь	9.2	6	7.8

Следующий шаг — это построение графика площадей льда за три зимы. Каждая кривая на графике отвечает за определенную зиму, они все относятся разным степеням суровости.

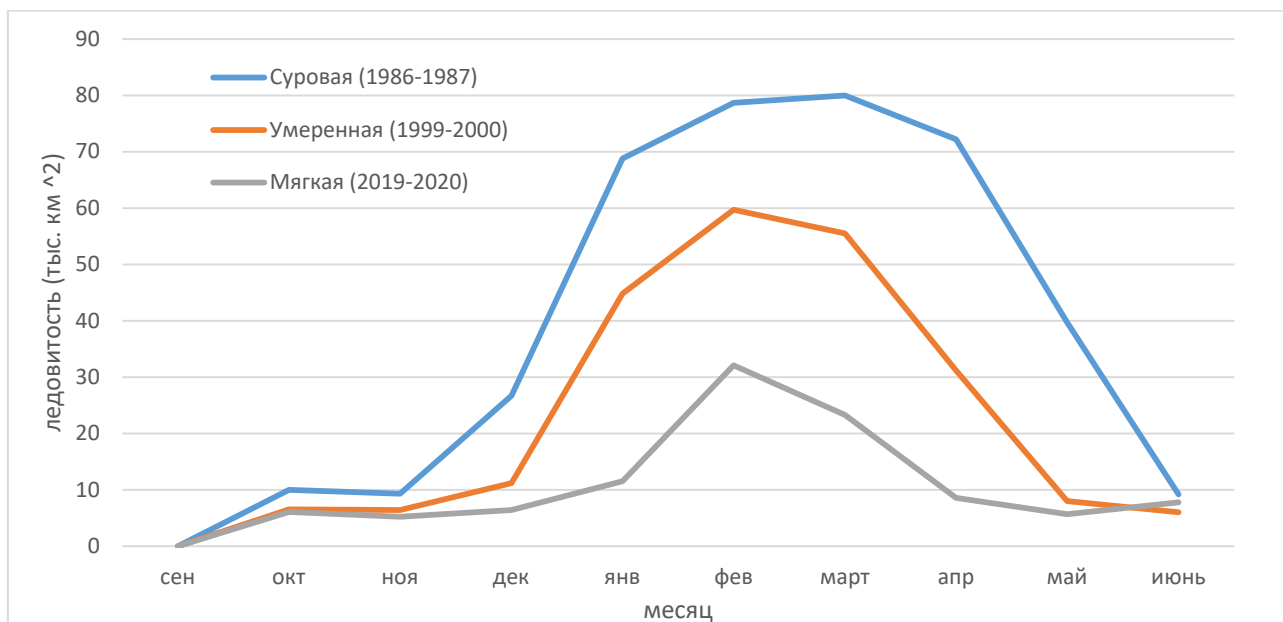


Рисунок 3.16 Годовой ход площади льда за три выбранные зимы.

На графике выше видно, что в суровую зиму 1986-1987гг максимальная площадь льда в феврале составила 78.7 тыс. км², в умеренную зиму 1999-2000 максимум присутствует в феврале и равен 59.7 тыс. км², а в мягкую зиму 2019-2020 максимум по площади также наблюдается в феврале и составляет 32 тыс.км².

В тот год, когда фиксировались самые суровые климатические условия, на графике 3.16 – синяя кривая, наблюдалась наибольшая площадь льда на протяжении всего времени года. В год с мягкими условиями, на графике 3.16 – серая кривая, площадь льда на исследуемой акватории наименьшая. Соответственно кривая умеренного года, на графике 3.16 – оранжевая кривая, находится между суровой и мягкой зимами.

Для дополнения вышесказанного обратимся к картам ледовой обстановки за указанные периоды. В каждом году был взят за основу февраль и ноябрь, так как в этих месяцах мы наблюдаем максимум и минимум соответственно по площади, занимаемой льдом.

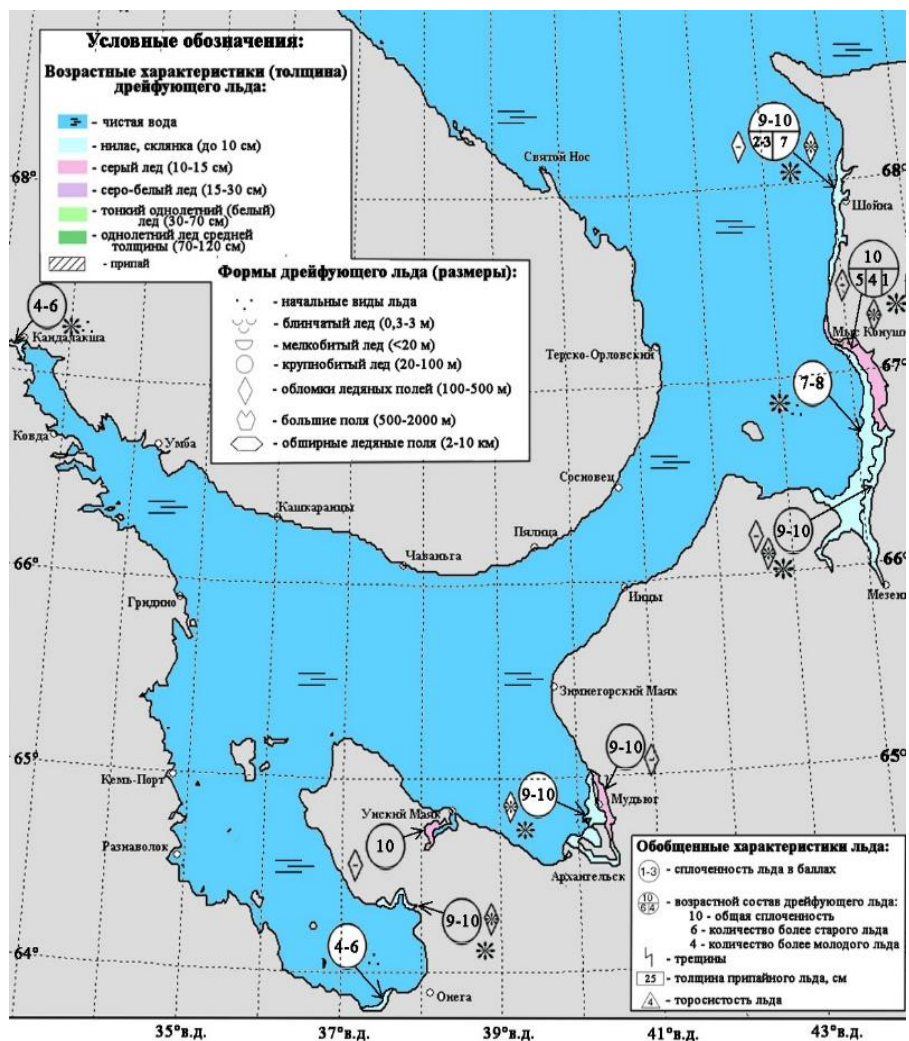


Рисунок 3.17. Ледовые условия в Белом море 25.11.1999г.

В вершине Кандалакшского залива в Онежском заливе на юге у побережья и нилас и лед начальных видов. В Двинской губе в районе устья р. Северная Двина светлый нилас и серый дрейфующий лед. В Мезенском заливе у побережья светлый нилас и серый дрейфующий лед. Вдоль Канинского берега узкая зона серого дрейфующего льда и светлого ниласа. На остальной акватории моря льда нет.

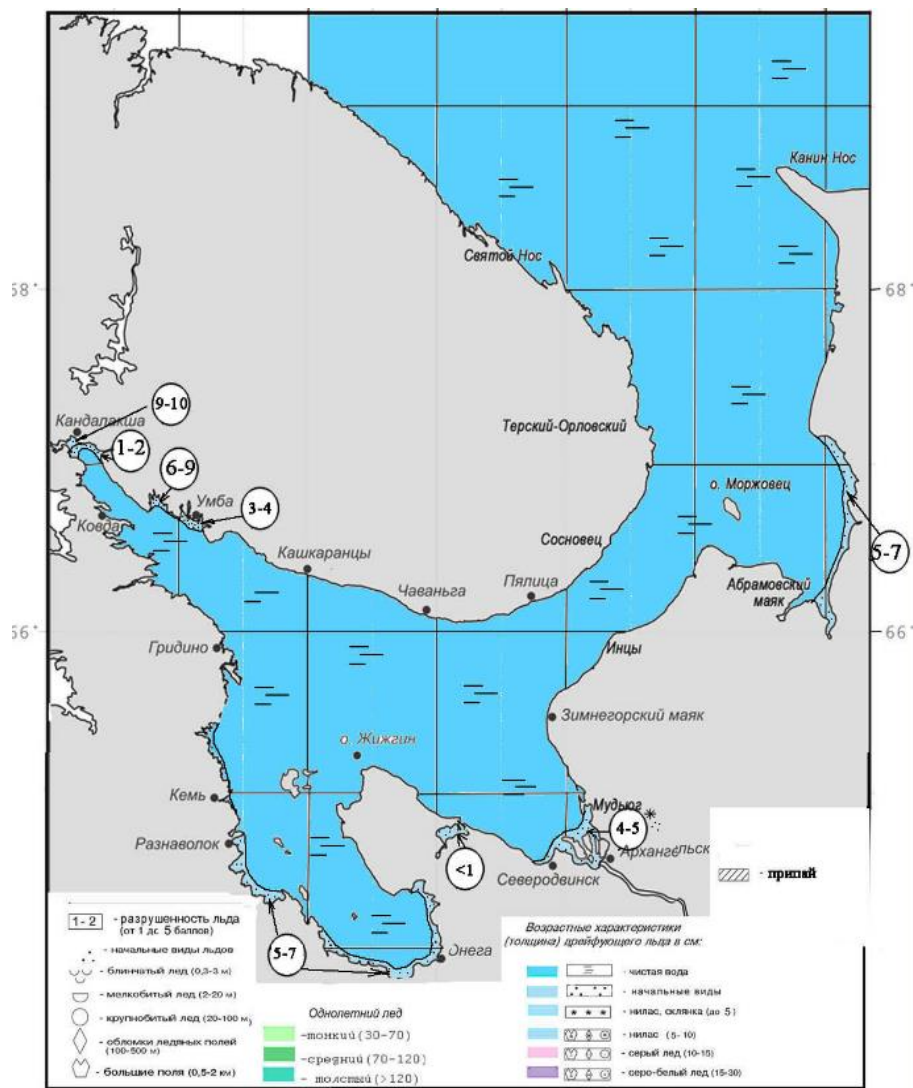


Рисунок 3.18. Ледовые условия в Белом море 25.11.1999г.

Обратим внимание на рисунок 3.18. Лед наблюдается в вершинах всех заливов. В вершине Кандалакшского залива – начальные виды льда и нилас сплоченностью 9-10 баллов. В вершине Онежского залива – дрейфующий лед сплоченностью 5-7 баллов, в вершине Двинского залива – сплоченностью 4-5 баллов. Открытая часть моря свободна ото льда.

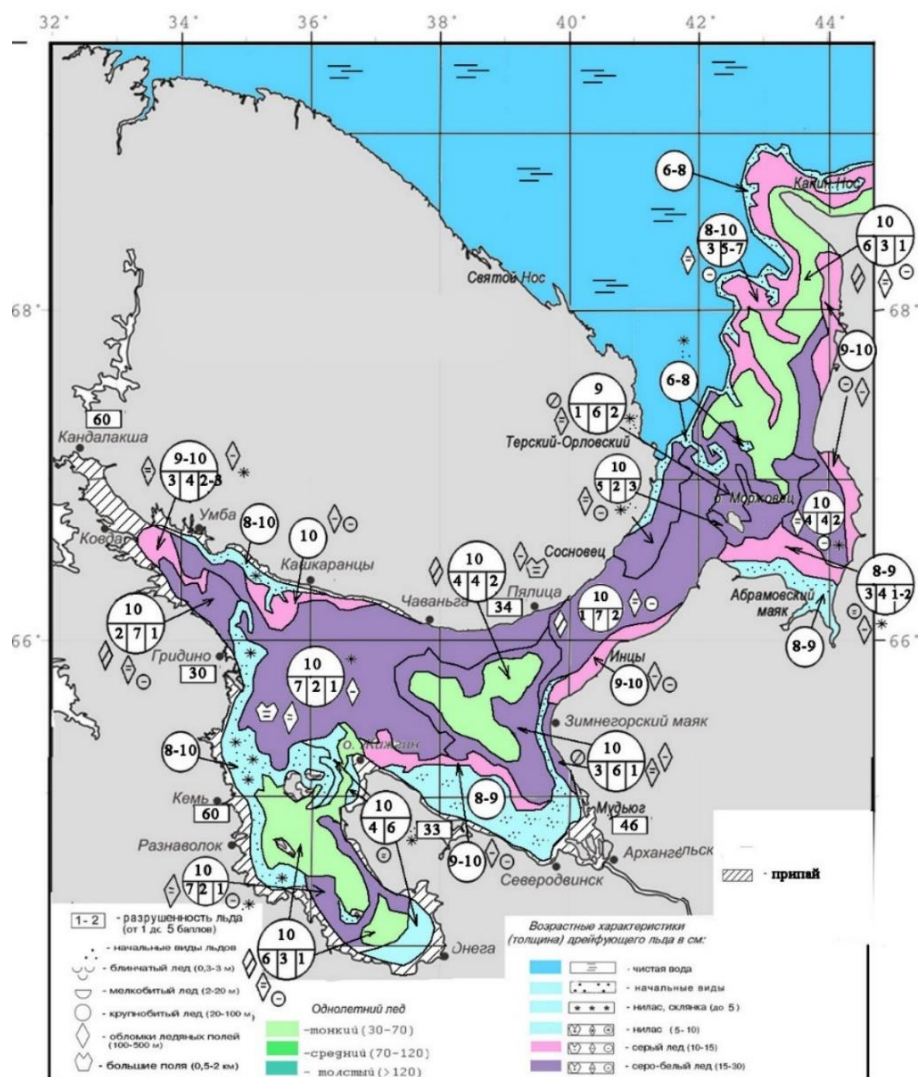


Рисунок 3.19 Ледовые условия в Белом море 19.02.2000 г.

Обратим внимание на рисунок 3.19. Вся акватория Белого моря занята льдом, по большей части мы наблюдаем серо-белый лёд. В настоящее время Бассейн и Горло, а также заливы Белого моря полностью покрыты льдом. Заприпайная полынья, наблюдавшаяся неделю назад у Терского берега Бассейна, закрылась. Полыньи, покрываемые начальными видами льда и ниласом, развиваются на юго-востоке Двинского, Онежского, Мезенского заливов, а также у западного побережья Бассейна моря. Сплоченный дрейфующий лёд (преимущественно в возрасте серо-белого) наблюдается в Кандалакшском заливе. В вершине залива припай толщиной 50-60 см. Полностью покрыт льдом Онежский залив, вдоль его побережья, в районе Соловецкого архипелага, а также в районе Онеги наблюдается припай

толщиной 45-60 см. В западной части Двинского залива и на входе в Горло с юго-запада – 10-балльный лед, преимущественно тонкий однолетний и серо-белый. В восточной части залива – начальные виды льда и нилас. В вершине залива – припай толщиной 45-65 см. В Мезенском заливе и у восточного побережья Воронки Белого моря наблюдается дрейфующий лед сплоченностью 9-10 баллов – преимущественно серо-белый и тонкий однолетний. Западная часть Воронки моря свободна ото льда. В Горле моря преобладает сплоченный, преимущественно серо-белый (с включением тонкого однолетнего) лед. В Бассейне моря наблюдается сплоченный, преимущественно серо-белый лед.

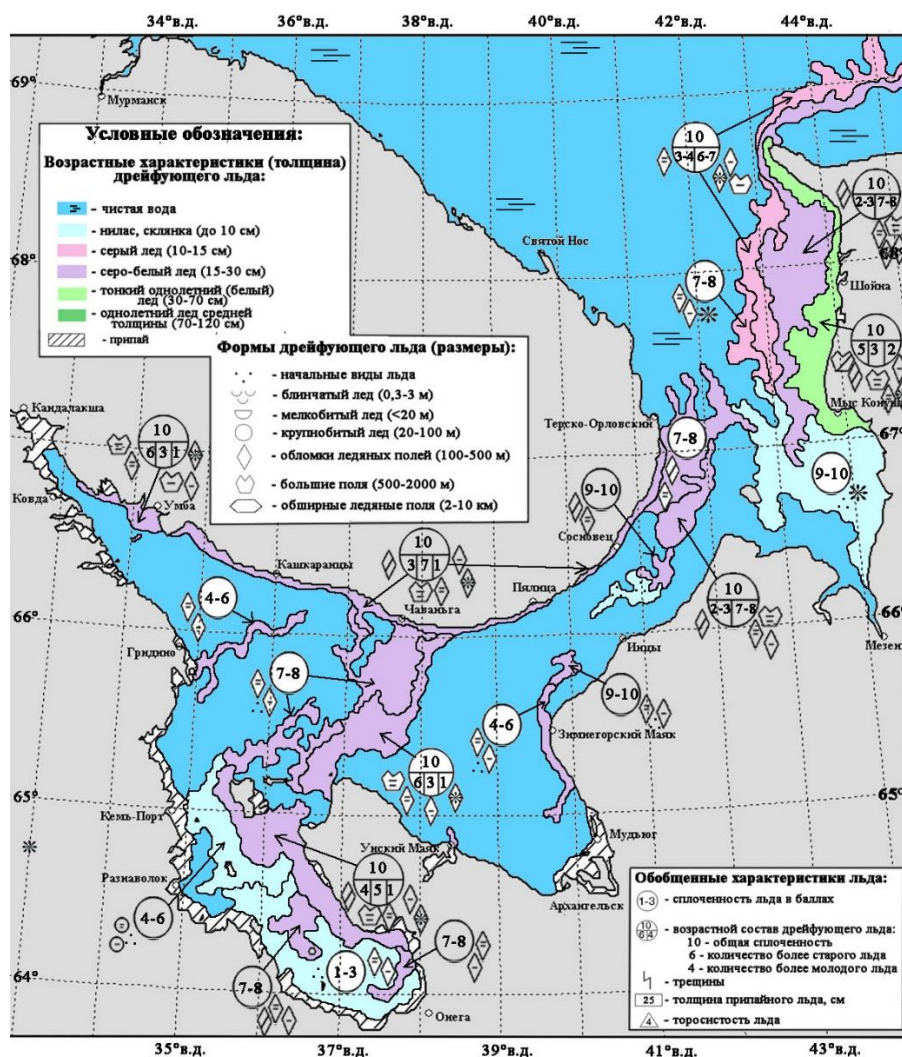


Рисунок 3.20 Ледовые условия в Белом море на 17.02.2020г.

Обратим внимание на рисунок 3.20. По процессам протекания эта зима относится к мягким. В Кандалакшском заливе на севере припай, за ним преобладает чистая вода. В районе Бассейна вытянута протяженная зона

дрейфующего серо-белого и серого льда. В Онежском заливе лёд на западном берегу наблюдается полынья за припаем, на восточном берегу же за припаем серо-белый и тонкий однолетний лед. В устье реки Северная Двина припай, за ним наблюдаем чистую воду. В Горле наблюдается чистая вода, однако в восточной части видим серо-белый и тонкий однолетний дрейфующий лед. В Воронке в южной и восточной частях наблюдается серо-белый и тонкий дрейфующий лед, в центральной части серо-белый и серый дрейфующий лед, на западной части – чистая вода.

Карт за 1986-1987 гг. не сохранилось. Однако даже на основе представленных выше рисунков ледовых условий и их описания формулируется вывод о правильности группировки кластерным анализом зим по СГДМ.

Заключение

По окончании работы были изучены данные по общей ледовитости Белого моря за период за 44 года с 1978 по 2022 год. Были взяты массивы данных по температуре атмосферы за тот же период на восьми прибрежных станциях: г. Архангельск, г. Кандалакша, м. Канин Нос, Кемь-порт, г. Мезень, г. Онега, м. Святой нос, пгт. Умба.

Для полной оценки вариаций площади льда Белого моря за определенный промежуток времени были выполнены некоторые расчёты, описанные выше. Была выделена трендовую составляющую ряда. Величина линейного тренда составляет $-0.33 \text{ км}^2/\text{год}$. Отрицательное значение указывает на то, что площадь льда имеет тенденцию к уменьшению с течением времени. Был выполнен гармонический и спектральный анализы. Проведенные анализы показали, что присутствует только две значимые гармоники с периодами 0.5 и 2.24 года. Произведен анализ остатков по АФК. Результаты автокорреляционного анализа показали, что модель и исходные данные имеют общий ход, однако у модели заметно сглажены максимумы и минимумы, что можно объяснить недостаточным количеством входных характеристик, ее формула

$$\text{Лед}_{i+1} = 0.0133 * \text{Лед}_i + 3.41.$$

Рассчитаны суммы градусо-дней мороза (СГДМ) на восьми взятых прибрежных метеорологических станциях. Также реализован кластерный анализ полученных данных, для оценки взаимосвязи между ледовитостью и степенью суровости зим по СГДМ. После него были отобраны три подходящие под анализ зимы: суровая зима 1978-1979 гг., умеренная 1999-2000 гг. и мягкая 2019-2020 гг. Как и ожидалось, площадь льда напрямую зависит от степени суровости зимы. Из расчётов видно, что в суровую зиму наибольшая площадь льда, в мягкую – наименьшая, а в умеренную – значения площади на графику на всем временном промежутке не выходит за пределы суровой и мягкой зим.

Список литературы

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том II Белое море/ под.ред. Б. Х. Глуховского [Текст]. – Л.: Гидрометиздат, 1991. – 240 с.
2. Артемьев Е. В. Количественные характеристики мелкомасштабной изменчивости термохалинной и динамической структуры вод Белого моря в различных по гидрологическим условиям районах. Дипломный проект [Текст].
3. Филатов Н.Н., Тержевик А.Ю. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007 – 226 с.
4. Толстиков А.В. Изменчивость температурного режима поверхностного слоя воды Белого моря : автореферат дис. канд. геогр. наук: 25.00.28 – Океанология. — Мурманск, 2006.
5. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации» – СПб.: РГГМУ, 2017. – 42-43с.
6. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник.– СПб.: изд. РГГМУ, 2008.
7. Вайновский П. А., Малинин В. П. Методы обработки и анализа океанологической информации. Многомерный анализ. Учебное пособие. СПб., изд. РГГМИ. 1992.— 60-78 с.
8. Оперативный модуль ЕСИМО. Ледовые условия в Белом море. – электронный источник – Режим доступа: http://193.7.160.230/web/esimo/beloe/ice/ice_bel.php?date=17.02.2020 Дата последнего обращения: 23.04.2023.
9. «PAST4» – электронный источник – Режим доступа: <https://past.en.lo4d.com/windows> Скачать программу – Дата последнего обращения – 20.05.2023.

Приложения

Приложение А - Дендрограммы рассматриваемых станций. (м. Святой нос, м. Канин нос, Кемь порт, пгт. Умба, г. Мезень)

Приложение Б - СГДМ по степеням суровости на выбранных станциях. (м. Святой нос, м. Канин нос, Кемь порт, пгт. Умба, г. Мезень).

Дендрограммы исследуемых станций.

Рисунок А.1 Дендрограмма станции м. Святой нос.

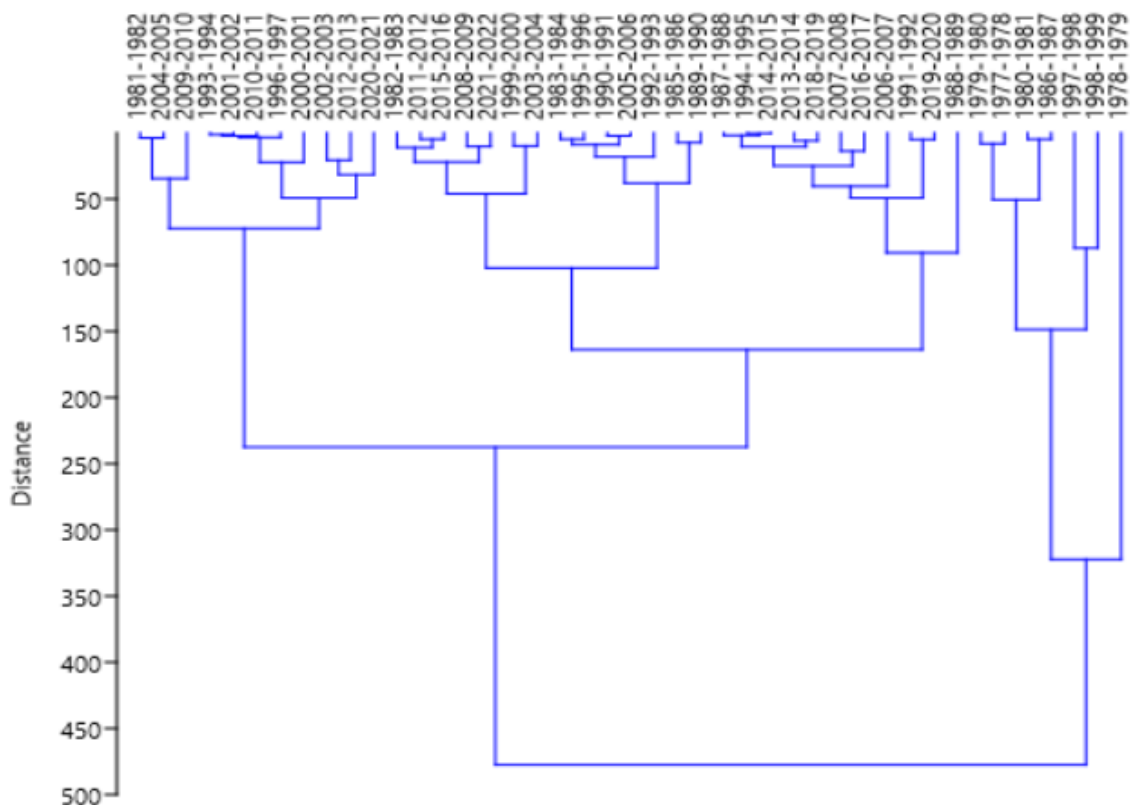


Рисунок А.2. Дендрограмма станции м. Канин нос.

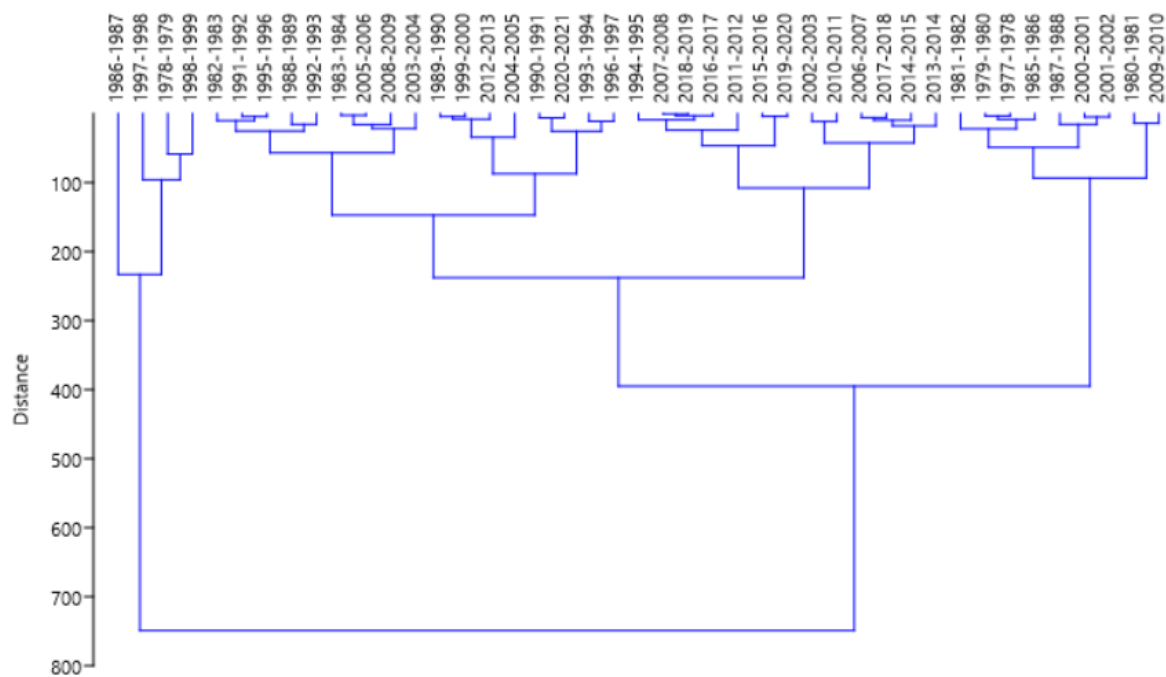


Рисунок А.3. Дендрограмма станции пгт. Умба.

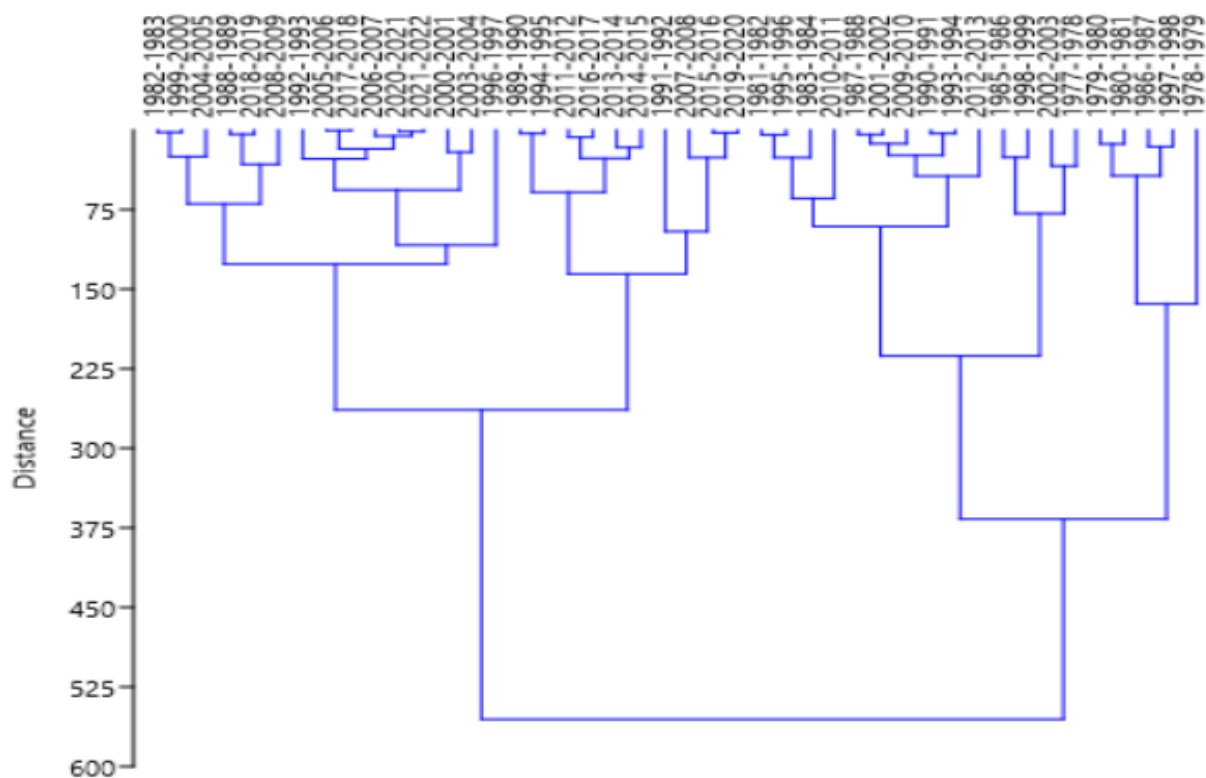
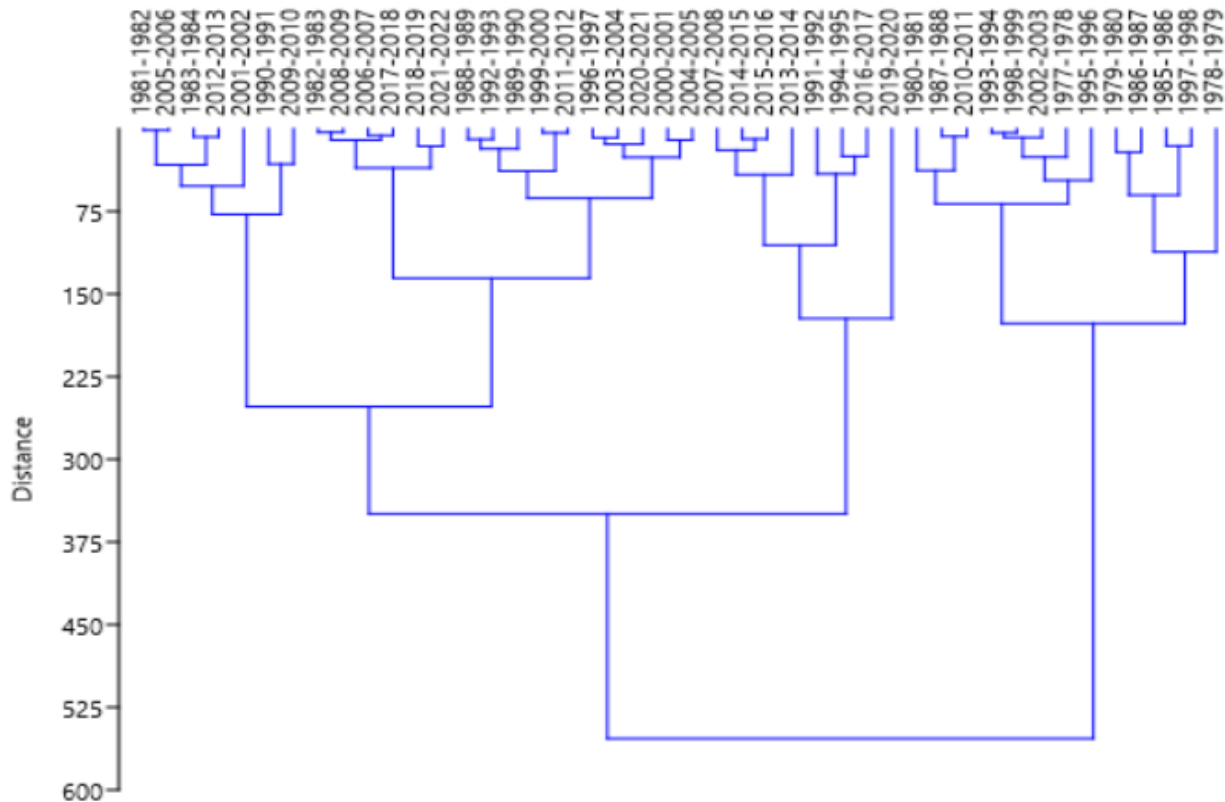
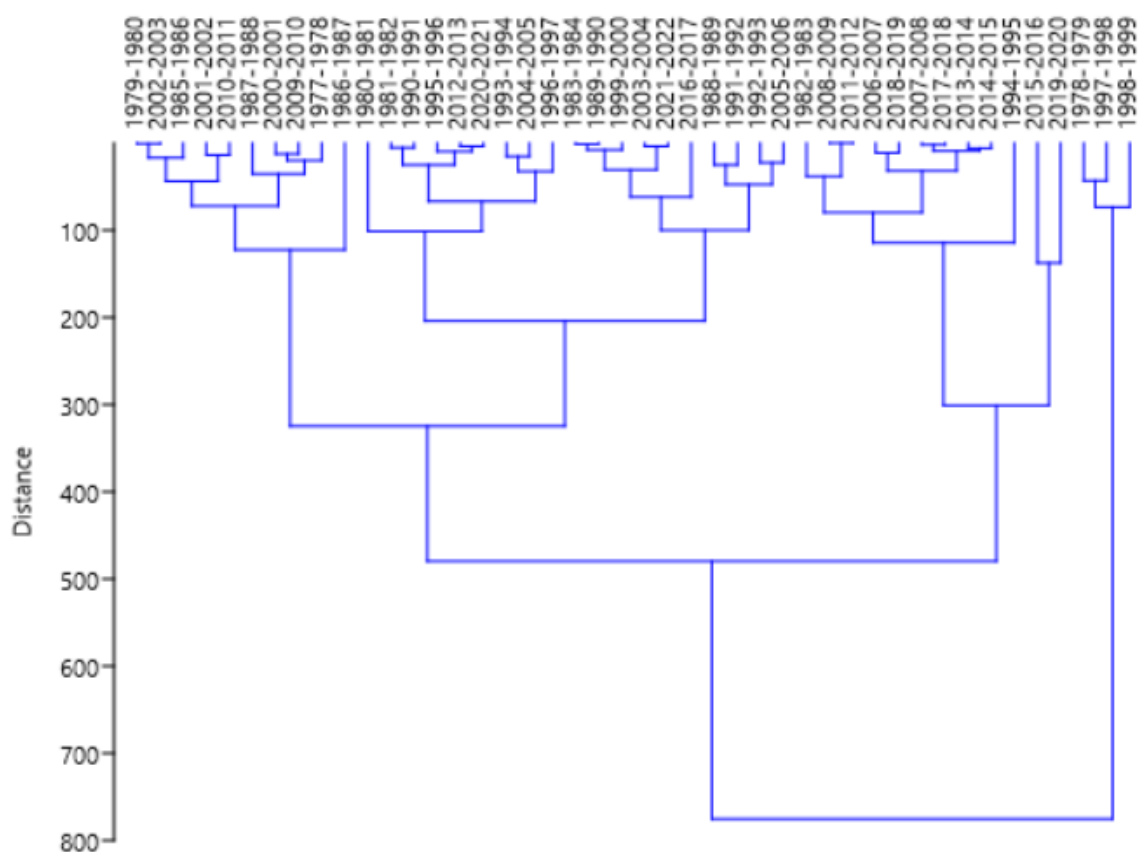


Рисунок А.4. Дендрограмма станции Кемь порт.



А.5. Дендрограмма станции г. Мезень.



СГДМ по степеням суровости на выбранных станциях.

Таблица Б.1 СГДМ по степеням суровости на станции м. Святой нос.

Суровые		Умеренные		Мягкие	
1977-1978	1085.5	1989-1990	744.4	1988-1989	478
1979-1980	1077.3	1985-1986	751.8	2019-2020	526.6
1980-1981	1129.6	1992-1993	771.7	1991-1992	531.7
1986-1987	1134.4	1990-1991	784.2	2007-2008	548.5
1997-1998	1211.7	2005-2006	786.5	2016-2017	562.4
1998-1999	1298.9	1995-1996	791.9	2018-2019	571.1
1978-1979	1478.5	1983-1984	796.8	2013-2014	577.2
		2020-2021	818	1987-1988	583.4
		2012-2013	839.2	2014-2015	585.2
		2002-2003	860	1994-1995	585.5
		2010-2011	881.4	2006-2007	613.8
		2001-2002	883	1982-1983	643.7
		1993-1994	884.3	2015-2016	652.4
		1996-1997	886.5	2011-2012	657.2
		2000-2001	906.1	2008-2009	668
		2004-2005	928.7	2021-2022	678.4
		1981-1982	932.6	1999-2000	701
		2009-2010	965.2	2003-2004	710.9

Таблица Б.2 СГДМ по степеням суровости на станции м. Канин нос.

Суровые		Умеренные		Мягкие	
1987-1988	1274.2	2010-2011	884.1	2019-2020	718.6
2001-2002	1287.4	2002-2003	895.8	2015-2016	722.6
2000-2001	1292.5	2008-2009	924.4	2011-2012	748.1
1981-1982	1317.2	2005-2006	939.1	1994-1995	765.3
1985-1986	1333.7	1983-1984	941.6	2007-2008	772.9
1979-1980	1343.9	2003-2004	956.9	2018-2019	773.5
2009-2010	1399	1982-1983	980.5	2016-2017	776.4
1980-1981	1413.2	1991-1992	988.5	2013-2014	834.2
1986-1987	1603.8	1995-1996	992.9	2014-2015	845.6
1997-1998	1773.1	1988-1989	1004.8	2017-2018	852.4
1978-1979	1839.7	1992-1993	1020.3	2006-2007	858.2
1998-1999	1898.3	1999-2000	1062.1		
1977-1978	1340.5	1989-1990	1066.6		
		2012-2013	1072.5		
		2004-2005	1101.3		
		2020-2021	1146.9		
		1990-1991	1153.3		
		1996-1997	1169.9		
		1993-1994	1181.3		

Таблица Б.3 СГДМ по степеням суровости на станции пгт. Умба.

Суровые		Умеренные		Мягкие	
1977-1978	1563.7	1999-2000	1064.1	1991-1992	697.6
2010-2011	1510	1982-1983	1066.3	2015-2016	783.2
2002-2003	1597.8	2004-2005	1090.3	2019-2020	785.8
1998-1999	1646.7	2017-2018	1123.6	2007-2008	810.6
1985-1986	1672.4	2005-2006	1124.1	1994-1995	864.3
1997-1998	1772.5	2021-2022	1139	1989-1990	867.5
1986-1987	1788.2	2020-2021	1140.5	2013-2014	902.9
1980-1981	1817	2006-2007	1145.4	2014-2015	919.2
1979-1980	1830.1	1992-1993	1161.6	2016-2017	934.4
1978-1979	1965.7	2000-2001	1185.1	2011-2012	941.3
		2003-2004	1205.9	2008-2009	982.5
		1996-1997	1261.6	1988-1989	1012.8
		2012-2013	1334.5	2018-2019	1016.7
		1993-1994	1361.9		
		1990-1991	1365.2		
		2001-2002	1381.1		
		1987-1988	1385.4		
		2009-2010	1396.2		
		1983-1984	1428.2		
		1995-1996	1451.9		
		1981-1982	1456.4		

Таблица Б.4 СГДМ по степеням суровости на станции Кемь порт.

Суровые		Умеренные		Мягкие	
1977-1978	1427.6	1981-1982	1215.8	1991-1992	827.8
1978-1979	1729.3	1982-1983	921.7	1994-1995	774.2
1979-1980	1636.9	1983-1984	1251.7	2007-2008	692.1
1980-1981	1531.1	1988-1989	1015	2013-2014	663.4
1985-1986	1595.1	1989-1990	1038.1	2014-2015	706.9
1986-1987	1658.3	1992-1993	1024.6	2015-2016	716.2
1987-1988	1496.6	1996-1997	1084.6	2016-2017	799.3
1990-1991	1282.9	1999-2000	989.3	2019-2020	567.8
1993-1994	1448.9	2000-2001	1052.8		
1995-1996	1400	2001-2002	1179.6		
1997-1998	1579.5	2003-2004	1092.8		
1998-1999	1452.6	2004-2005	1063		
2002-2003	1458.8	2005-2006	1214.5		
2009-2010	1315	2006-2007	916		
2010-2011	1489.6	2008-2009	924.9		
		2011-2012	985.6		
		2012-2013	1244.1		

		2017-2018	909.9		
		2018-2019	874.4		
		2017-2018	909.9		
		2021-2022	890.4		

Таблица Б.5 СГДМ по степеням суровости на станции г. Мезень.

Суровые		Умеренные		Мягкие	
1977-1978	1887	1980-1981	1789.8	1982-1983	1364.7
1978-1979	2342.2	1981-1982	1731.5	1994-1995	1171.8
1979-1980	1959.9	1983-1984	1455.7	2006-2007	1243.9
1985-1986	1943.3	1988-1989	1519.5	2007-2008	1264.9
1986-1987	2027.5	1989-1990	1457.1	2008-2009	1326.7
1987-1988	1838.3	1990-1991	1726.2	2011-2012	1326.7
1997-1998	2385.4	1991-1992	1544.4	2013-2014	1271.9
1998-1999	2290.4	1992-1993	1568.3	2014-2015	1277.9
2000-2001	1873.2	1993-1994	1665.4	2015-2016	1042.6
2001-2002	1903.9	1995-1996	1697.4	2016-2017	1404.2
2002-2003	1960.5	1996-1997	1625.1	2017-2018	1266.7
2009-2010	1860.8	1999-2000	1448.7	2018-2019	1232.8
2010-2011	1917.7	2003-2004	1486.5	2019-2020	905.1
		2004-2005	1650		
		2005-2006	1590.9		
		2012-2013	1708.9		
		2020-2021	1705.1		
		2021-2022	1482.7		