



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Кафедра Информационных технологий и систем безопасности
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

**На тему Исследование ледовитости Баренцева моря в условиях современного
изменения климата**

Исполнитель _____ Бушля Полина Алексеевна _____
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель _____ профессор кафедры ИТСБ, доктор технических наук _____
(ученая степень, ученое звание)
_____ Завгородний Владимир Николаевич _____
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

доктор технических наук
(ученая степень, ученое звание)

Бурлов Вячеслав Георгиевич
(фамилия, имя, отчество)

« ____ » _____ 2025г.

Санкт-Петербург

2025г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Информационных Технологий и Систем Безопасности

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой

(подпись)

(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ года

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу

студенту _____ Бушля Полине Алексеевне
(фамилия, имя, отчество)

1. Тема Исследование ледовитости Баренцева моря в условиях современного изменения климата

закреплена приказом ректора Университета от «__» _____ 20__ года, № _____.

2. Срок сдачи законченной работы «__» _____ 20__ года.

3. Исходные данные к работе

3.1 Нормативно-правовые документы

3.2 Нормативно-технические документы

3.3. Объекты исследования и условия их функционирования: Баренцево море, метеорологические станции: Мурманск, Малые Кармакулы, Баренцбург, Индига, обсерватория им. Э.Т. Кренкеля, среднемесячные показатели площади льда, ежедневные метеорологические данные, ледовые карты ААНИИ, программные инструменты: Python, PAST4

4. Основные вопросы, подлежащие разработке (краткое содержание ВКР)

- Анализ библиографических источников по теме изменений ледового покрова в Арктике (в частности, Баренцева моря).
- Изучение и анализ инструментов и методов статистического анализа.
- Анализ временных рядов данных о площади льда и температурах.
- Кластерный анализ.
- Предложения по использованию результатов для совершенствования морских информационных систем.
- Подготовка рукописного труда в соответствии с требованиями ГОСТ.
- Обоснование результатов на защите, включая ответы на вопросы комиссии.

5. Перечень материалов, представляемых к защите:

- ВКР (пояснительная записка);
- отзыв руководителя;
- рецензия;
- заключение о проверке работы в системе «Антиплагиат»
- иллюстративный материал (плакаты, слайды, таблицы, схемы, графики...)

6. Консультант по работе с указанием разделов работы:

_____ доцент кафедры океанологии, кандидат географических наук, Шевчук О.И.

(должность, фамилия, имя, отчество)

7. Дата выдачи задания: «__» _____ 20__ года

Руководитель выпускной квалификационной работы

_____ профессор кафедры ИТСБ, д. т. н. Завгородний В.Н.

(должность, ученая степень, ученое звание, фамилия, имя, отчество)

(подпись)

Задание принял к исполнению «__» _____ 20__ года

Студент а _____ Бушля П.А., МД-М23-1

(фамилия, имя, отчество, учебная группа)

(подпись)

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: 77 страниц, 42 рисунка, 7 таблиц, 42 источника литературы.

Объект исследования: Баренцево море.

Предмет исследования: анализ изменений ледовитости Баренцева моря в условиях современного изменения климата, включая влияние температурных аномалий, гидрологических характеристик и климатических параметров.

Цель работы: изучение пространственно-временных изменений ледяного покрова Баренцева моря и их связи с климатическими факторами.

Задачи работы:

- Описать физико-географические и гидрологические характеристики Баренцева моря.
- Проанализировать изменения площади ледяного покрова за период с 1979 по 2024 год.
- Исследовать влияние температуры воздуха на ледовитость с использованием данных метеорологических станций.
- Провести классификацию зим по степени суровости с применением кластерного анализа и расчёта суммы градусо-дней мороза (СГДМ).
- Сопоставить ледовые карты для разных типов зим (суровых, умеренных, мягких).

Методы исследования:

- Анализ временных рядов;
- Линейный и нелинейный регрессионный анализ;
- Кластерный анализ (метод k-средних);
- Расчёт суммы градусо-дней мороза (СГДМ);
- Визуализация данных с использованием программных инструментов (Python, PAST4).

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	7
1.1. Физико-географическое положение.....	7
1.2. Гидрологическая характеристика	9
1.3. Ледовитость.....	20
1.4. Влияние ледовых процессов на судоходство и добычу углеводородов в Баренцевом море	24
2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА 27	
2.1. Исходные данные.....	27
2.2. Методы анализа исходных данных	28
2.2.1 Анализ тренда временного ряда и его расчет	29
2.2.2 Кластерный анализ	32
2.2.3 Расчет СГДМ.....	33
3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ	35
3.1. Расчет трендовой составляющей Баренцева моря.....	35
3.2. Анализ трендов площади льда по месяцам.....	37
3.2. Анализ среднегодовых температур воздуха	43
3.4. Расчет СГДМ	49
3.6. Сравнение ледовых карт	60
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	70
Список литературы	74

ВВЕДЕНИЕ

Арктика — стратегически важный регион для России, обладающий огромным экономическим и геополитическим потенциалом. Баренцево море, часть Северного Ледовитого океана, играет ключевую роль в обеспечении безопасности страны, развитии судоходства, рыболовства и добычи природных ресурсов.

Северный морской путь, проходящий через Баренцево море, — важнейший транспортный коридор, связывающий Европу и Азию. Однако изменение климата, сопровождающееся ускоренным потеплением в Арктике, значительно влияет на ледовые условия в регионе. Это требует тщательного изучения и прогнозирования для эффективного использования природных ресурсов и обеспечения безопасности в арктических широтах [1-6].

В условиях глобального потепления Баренцево море становится местом, где происходят наиболее заметные изменения в состоянии ледяного покрова. Уменьшение площади и толщины льда, а также сдвиги в сроках его формирования оказывают прямое влияние на экосистемы региона, экономическую активность и инфраструктуру. В связи с этим изучение состояния льда в Баренцевом море в контексте современных климатических изменений приобретает особую важность [7-13].

Цель исследования — изучить пространственно-временные изменения ледяного покрова в Баренцевом море. Для этого мы проанализируем многолетние данные о площади льда, температуре воздуха и других климатических показателях, чтобы определить ключевые тенденции и отклонения от нормы.

Для достижения цели мы ставим перед собой следующие задачи:

1. Описать физико-географические характеристики Баренцева моря, включая его гидрологический режим и климатические условия.

2. Провести анализ изменений площади ледяного покрова в период с 1979 по 2024 год. Основная задача исследования — определить основные тенденции и отклонения от нормы.
3. Определить, как температура воздуха влияет на состояние ледяного покрова. Для этого использовались данные с метеорологических станций, расположенных в исследуемом регионе.
4. Провести классификацию зим по степени суровости использовался показатель суммы градусо-дней мороза (СГДМ) в сочетании с кластерным анализом.
5. Сопоставлены ледовые карты, соответствующие разным климатическим условиям: суровой, умеренной и мягкой зиме.

В ходе исследования была проанализирована динамика изменений ледяного покрова в течение зимнего сезона, а также выявлены тенденции изменения площади льда в зависимости от месяца.

В процессе исследования исследовались данные, которые были предоставлены Национальным управлением океанических и атмосферных исследований (NOAA) и Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ). Также мы анализируем информацию, полученную с метеорологических станций, расположенных в акватории Баренцева моря.

Чтобы лучше понять, как меняется ледовый покров Баренцева моря, были применены современные статистические методы, такие как расчёт линейных трендов, кластерный анализ и визуализация данных.

Результаты исследования помогут лучше понять, как ледовый покров Баренцева моря реагирует на изменения климата. Это важно для планирования хозяйственной деятельности, обеспечения безопасности судоходства и разработки эффективных мер адаптации к изменениям климата в Арктическом регионе.

1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1. Физико-географическое положение

Баренцево море – западная часть Северного Ледовитого океана длиной 1300 км и шириной 1050 км, занимающая 1 405 000 км², средняя глубина оценивается в пределах от 180 до 230 км. Границы моря проходят по линии архипелага Шпицберген – о. Медвежий – мыс Нордкап на западе, на юге – по берегу Евразии, на востоке – по западному берегу архипелага Новая Земля [14-17].

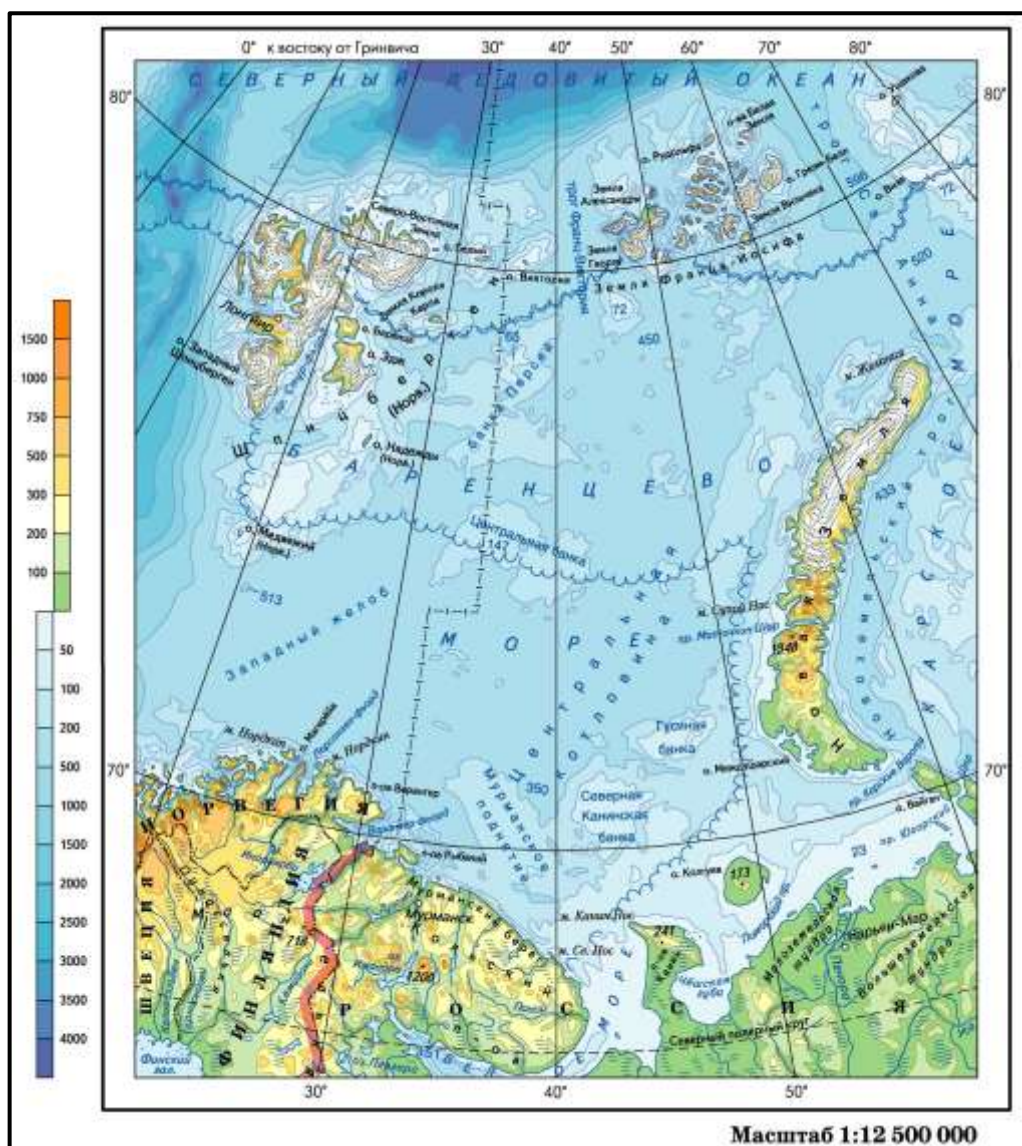


Рисунок 1.1. – Физическая карта Баренцева моря

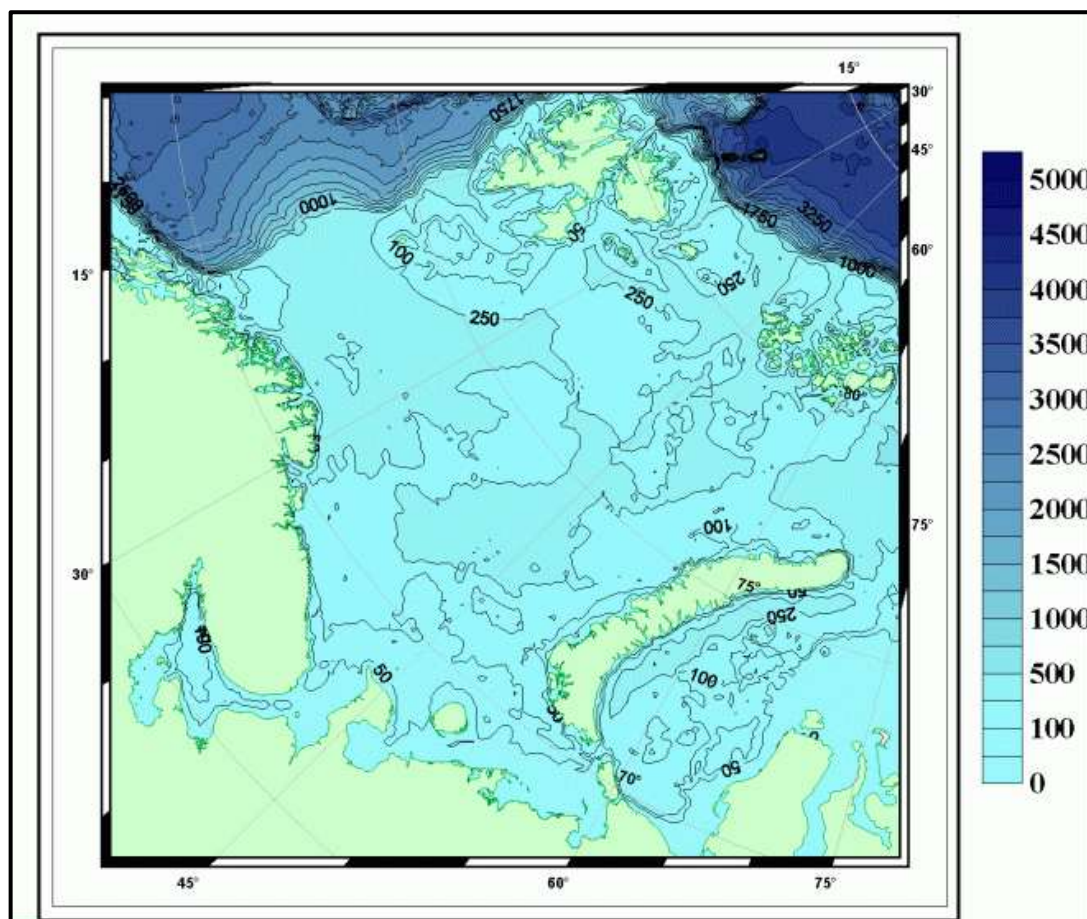


Рисунок 1.2. – Карта глубин Баренцева моря [2]

Баренцево море представляет собой относительно мелководный шельф, который окружает значительную часть Евразийского материка. Дно моря покрыто песчано-илистыми отложениями. С востока на запад море пересекает Медвежий желоб, а также более мелкие желоба у Южного, Северного и Северо-Восточного мысов. В северной части моря расположены возвышенности Центральная и Персей. Юго-восточное направление характеризуется наличием рыболовных отмелей и мелководья. Также в этой части находится остров Колгуев. Баренцево море относится к типу континентальных окраинных морей.

Дно Баренцева моря представляет собой сложный рельеф с равниной, которая имеет небольшой уклон к западу и северо-востоку.

Самые глубокие участки находятся в западной части моря, где зафиксирована максимальная глубина.

Топография дна отличается чередованием крупных элементов, таких как подводные холмы и впадины, которые имеют различное направление. Кроме

того, на дне можно встретить множество мелких неровностей высотой до 3–5 метров, а также террасообразные уступы на склонах. Различия в глубине в открытой части моря могут достигать 400 метров.

Карта Баренцева моря показывает (рисунок 1.1.), что оно расположено в высоких широтах за пределами Полярного круга и связано с Атлантическим океаном и Центральным Арктическим бассейном. Это определяет основные черты его климата.

Климат моря можно описать как полярный морской. Для него характерны продолжительная зима, короткое холодное лето, незначительные годовые колебания температуры воздуха и высокая относительная влажность.

В северной части моря господствует арктический воздух, а в южной — воздух умеренных широт. Граница между этими основными воздушными массами проходит через атмосферный арктический фронт, который тянется от Исландии через Медвежий остров к северной оконечности Новой Земли.

В этом регионе часто возникают циклоны и антициклоны, оказывающие значительное влияние на погоду в Баренцевом море.

1.2. Гидрологическая характеристика

Бассейн Баренцева моря представляет собой обширную территорию (рисунок 1.3.). Однако объём речного стока по отношению к площади и объёму самого моря невелик и составляет в среднем 163 кубических километра в год.

Большая часть речного стока приходится на юго-восточную часть моря. Здесь протекают крупнейшие реки бассейна Баренцева моря, в том числе Печора, которая ежегодно сбрасывает около 130 кубических километров воды, что составляет примерно 70% от общего годового стока в море. Кроме того, здесь протекают несколько небольших рек.

На северное побережье Норвегии и побережье Кольского полуострова приходится всего около 10% стока. Здесь в море впадают небольшие горные реки.

Максимальный объём речного стока наблюдается весной. Осенью и зимой он минимален.

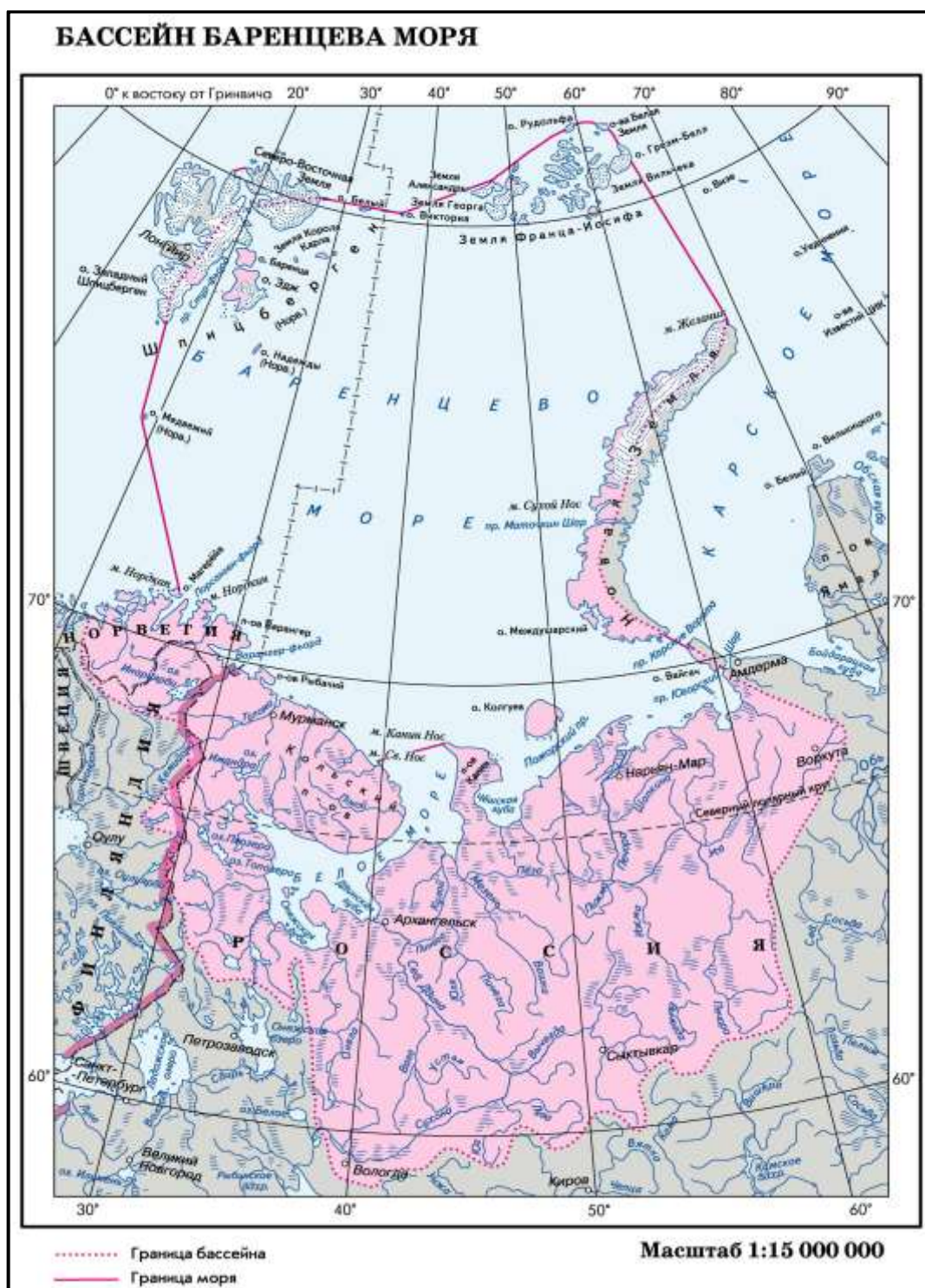


Рисунок 1.3. – Бассейн Баренцева моря [4]

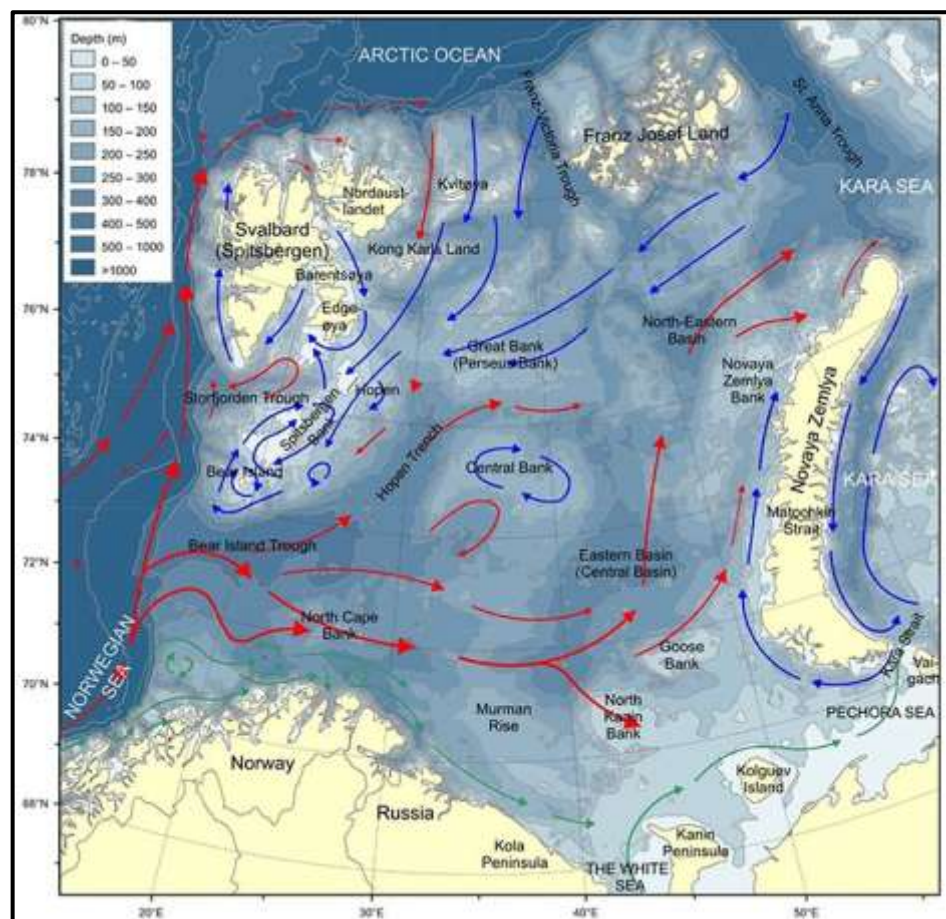


Рисунок 1.4. – Карта течений Баренцева моря [5]

В акватории Баренцева моря арктические воды поступают двумя основными маршрутами:

- Между Шпицбергом и Землёй Франца-Иосифа;
- Через пролив между Землёй Франца-Иосифа и Новой Землёй.

Восточно-Шпицбергенское течение, направленное вдоль побережья Шпицбергена, устремляется на юг. Персейское течение, проходящее южнее Земли Франца-Иосифа, разделяется севернее Центральной банки.

Основная часть Персейского течения движется на юго-запад вдоль восточного склона банки Шпицберген, образуя Бьёрнёйское течение. Это течение играет ключевую роль в формировании климатических условий в регионе. Кроме того, стоит отметить небольшой приток холодных вод из Карского моря южнее Новой Земли[18-20].

Баренцево море представляет собой уникальный гидрологический объект, характеризующийся свободным водообменом и отсутствием естественных

преград. Несмотря на то, что центральная впадина и Новоземельный желоб затрудняют горизонтальное движение воды, это не приводит к образованию отдельных водных слоёв.

Изменения гидрологических характеристик в большей степени определяются условиями в юго-восточной, северной и западной частях моря, а также интенсивностью вертикального и горизонтального перемешивания, а не особенностями рельефа дна.

В соответствии с этой классификацией, представленной А.Д. Добровольским и Б.С. Залогиним, в Баренцевом море можно выделить четыре типа водных масс:

1. Тёплые и солёные воды Атлантического океана, поступающие в виде поверхностных течений с запада и глубинных — с севера и северо-востока;

2. Холодные воды Арктического океана с отрицательными температурами и низкой солёностью, поступающие в виде поверхностных течений, попадают в Баренцево море с северной стороны;

3. Воды прибрежных районов формируются за счёт материкового стока и опреснённых прибрежных течений, что приводит к значительным годовым колебаниям температуры и низкой солёности этих вод;

4. Воды собственно Баренцева моря характеризуются низкой температурой и высокой солёностью, которые образуются в результате смешивания и трансформации под воздействием местных условий водных масс, поступающих из различных районов.

Термохалинная обстановка в Баренцевом море формируется под воздействием тепловых потоков, переносимых течениями, и радиационных факторов. Некоторые из этих факторов поддерживают стабильность климатических характеристик температуры и солёности, в то время как другие, такие как нестационарные течения и ледовые условия, определяют их пространственные и временные изменения [21-27].

Рассмотрим более подробно структуру полей температуры и солёности в течение года, а также основные процессы, влияющие на их распределение.

Температура воды в Баренцевом море играет более важную роль, чем в других арктических морях, поскольку она определяет все процессы, связанные с плотностью воды, такие как конвекция и формирование ударного слоя. Кроме того, температура воды в Баренцевом море является ключевым показателем, характеризующим распределение тёплых атлантических вод, которые влияют на ледовые условия и климат атлантического сектора Арктики[28-35].

В Баренцевом море температурный режим формируется под воздействием различных процессов. Одним из них является осенне-зимняя конвекция, которая способствует выравниванию температуры от поверхности до дна. В летний период происходит нагревание поверхностного слоя, что приводит к образованию сезонного термоклина.

Баренцево море отличается тем, что в него поступает значительное количество тёплых атлантических вод, что делает его одним из самых тёплых морей в Северном Ледовитом океане. Большая часть моря, расположенная от берегов до 75° северной широты, не замерзает круглый год и сохраняет положительную температуру поверхности.

Влияние тёплых атлантических вод особенно заметно в юго-западной части моря, где оно проявляется более интенсивно из-за меньшей глубины. Эта особенность способствует более интенсивному радиационному нагреву в юго-западном регионе в летний период. В результате температура воды в этой части моря может достигать 8°C в июле и августе.

В поверхностном слое моря, расположенном в юго-западной части, наблюдается наиболее высокая температура, которая в период с июня по сентябрь может достигать 9 градусов Цельсия. В то же время у кромки льда температура опускается до 0 градусов.

С июля по октябрь зона с высокими температурами также распространяется и на юго-восточную часть моря, при этом изотермы становятся более близкими к широтному направлению (рисунок 1.5.).

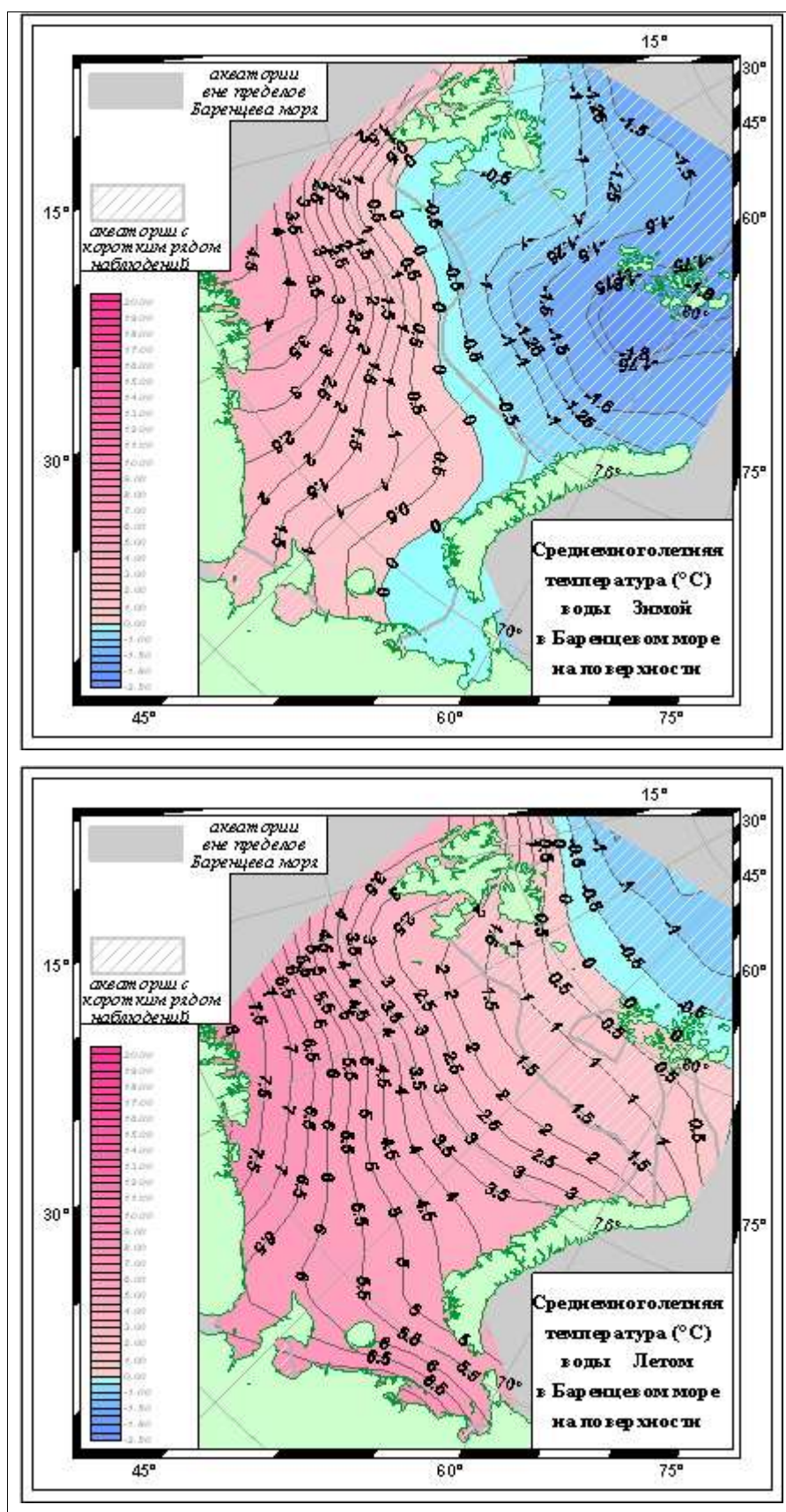


Рисунок 1.5. – Карты среднегодовой температуры поверхности воды
Баренцева моря летом и зимой

В акватории Баренцева моря наблюдаются незначительные сезонные колебания температуры воды. В юго-западной и северной частях моря температура обычно не превышает 5–6 °С, в то время как в юго-восточной части она может достигать 10 °С.

В атлантической водной массе на крайнем юго-западе моря температура поверхностных вод зимой колеблется от 3 до 6 °С, а летом — от 7 до 13 °С. В районах, где возможно образование льда, температура воды не опускается ниже -1,8 °С.

Летом температура поверхностного слоя воды в северо-западной части моря составляет 4–7 °С, в открытой части моря — 15 °С, а в Печорской губе — 20–23 °С.

С увеличением глубины колебания температуры воды становятся менее заметными. В юго-восточной части моря на глубине 50 метров они составляют примерно две трети от значений на поверхности.

Распределение температуры воды в море зависит от сезона. Зимой она может изменяться из-за конвекционных процессов, а летом — из-за нагрева.

В летний сезон в акватории Баренцева моря формируется сезонный термоклин, который образуется при переходе теплового баланса поверхности моря в положительную фазу и сохраняется до августа-сентября. К этому времени глубина ударного слоя становится настолько значительной, что перемешивание в верхнем слое уже не оказывает влияния на условия в термоклинном слое.

В большей части акватории Баренцева моря толщина квазиоднородного слоя и глубина верхней границы термоклина к этому моменту составляют около 30 метров. Наиболее значительные градиенты температуры наблюдаются в слое от 30 до 50 метров.

В юго-западной части моря максимальные градиенты температуры воды не превышают 0,1 °С/м, а в остальной части глубоководных вод достигают 0,2 °С/м. В юго-восточной части моря и в прибрежных районах максимальные градиенты наблюдаются в слое от 10 до 25 метров и от 0 до 10 метров и составляют 0,4 °С/м соответственно[36-42].

Температурные характеристики различных слоёв Баренцева моря определяются воздействием тёплых атлантических вод, процессами зимнего охлаждения и особенностями рельефа морского дна. В результате вертикальное распределение температуры в море характеризуется неоднородностью.

В юго-западной части моря, где влияние атлантических вод наиболее ощутимо, температура воды с глубиной постепенно снижается, но остаётся положительной вплоть до самого дна.

На северо-востоке моря зимой температура может опускаться до $-1,5^{\circ}\text{C}$ на глубине 100–200 метров. Летом на поверхности моря температура невысокая, но быстро повышается с увеличением глубины до 25–50 метров, где достигает минимальных значений, характерных для зимнего периода.

Ниже, на глубине 50–100 метров, где отсутствует вертикальная циркуляция, температура повышается до -1°C . Таким образом, между глубинами 50 и 100 метров формируется слой с низкой температурой.

В акваториях, не подверженных влиянию тёплых течений, таких как желоб Новая Земля или Центральный бассейн, температура воды сохраняет постоянство на всех глубинах в течение всего года. В зимний период она опускается от незначительных положительных значений на поверхности до $-1,75^{\circ}\text{C}$ на самом дне.

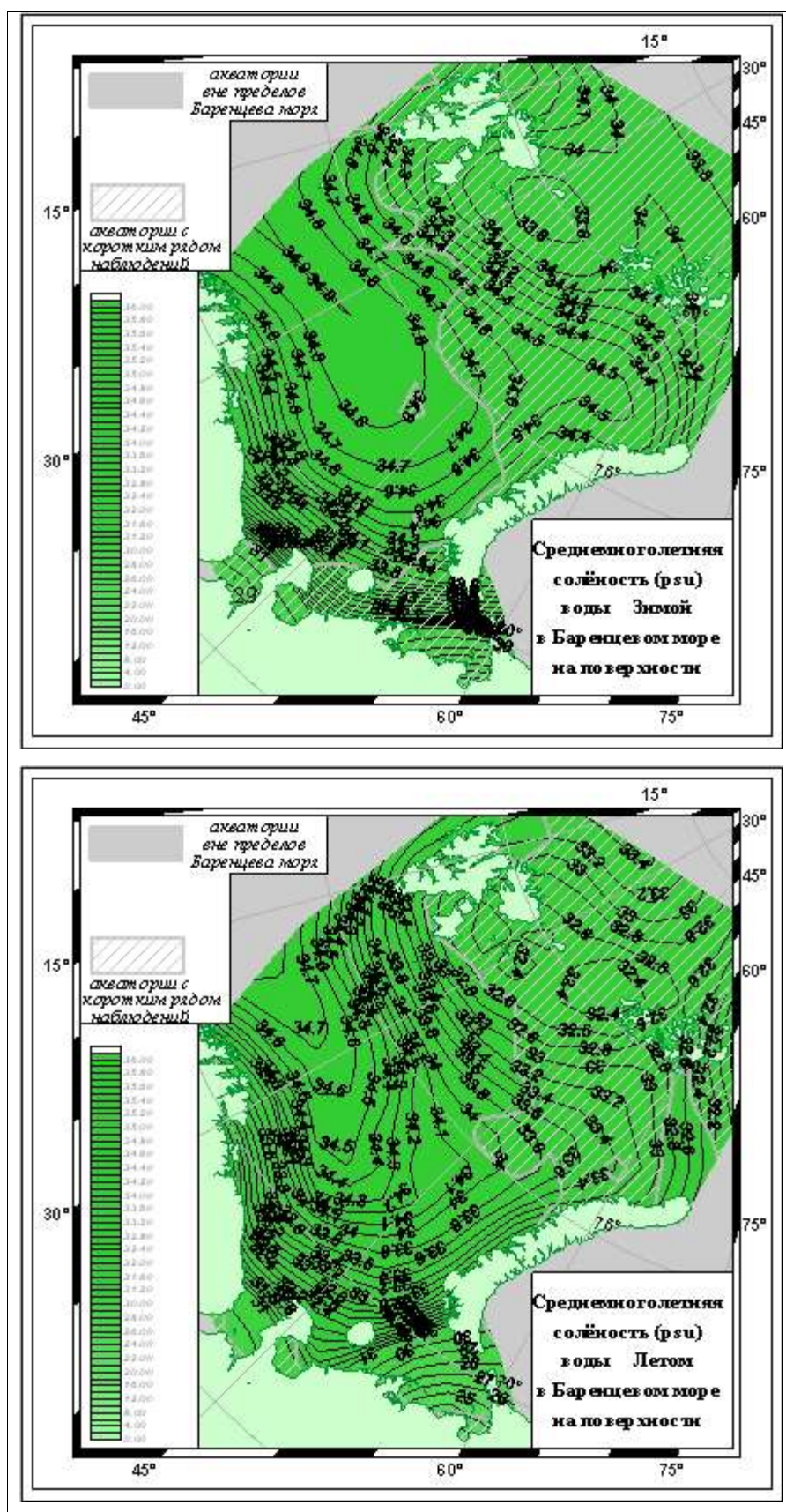


Рисунок 1.6. – Карты среднегодовой солёности поверхностных вод Баренцева моря летом и зимой

В юго-западной части Баренцева моря в желобе Нордкап наблюдается максимальная солёность — 35 промилле. Это обусловлено тем, что здесь происходит смешение солёных вод из Атлантического океана, и нет образования и таяния льда.

По мере продвижения в северном и южном направлениях солёность снижается до 34,5 промилле из-за таяния льда.

В юго-восточной части моря солёность ещё ниже — 32–33 промилле. Это обусловлено активным таянием льда и поступлением пресной воды с суши.

Солёность Баренцева моря зависит не только от географического положения, но и от сезона.

Зимой солёность в среднем по морю составляет около 35 промилле, а в юго-восточной части достигает 32,5–33 промилле. Это связано с увеличением притока атлантических вод и образованием льда.

В весенний период в большинстве районов моря наблюдается стабильно высокий уровень солёности. Исключением являются прибрежные зоны вблизи Мурманского побережья и в Канинско-Колгуевском районе, где из-за увеличения континентального стока солёность воды снижается.

В летний период приток атлантических вод уменьшается, лёд тает, и речная вода распространяется далеко в море. Это приводит к снижению солёности воды во всех районах моря. К середине сезона солёность повсеместно падает ниже 35 промилле. В юго-западной части моря она составляет 34,5 промилле, а в юго-восточной — 29 промилле, иногда даже 25 промилле.

Осенью солёность воды в море некоторое время остаётся на низком уровне. Однако из-за уменьшения речного стока и начала процесса замерзания солёность воды начинает расти.

В акватории Баренцева моря уровень солёности воды может значительно меняться в течение года, особенно в верхних слоях. Однако в зоне сезонного термоклина и ниже него эти изменения практически не наблюдаются.

В атлантической водной массе стандартное отклонение среднемесячных значений солёности составляет всего 0,1 промилле, а в поверхностном слое на юго-востоке моря достигает 1,0 промилле.

Сезонные изменения солёности в атлантической водной массе связаны с тем, что летом количество осадков превышает испарение, что приводит к снижению солёности. В других частях моря сезонные изменения вызваны таянием льда, а на юго-востоке — речным стоком и течением из Белого моря.

В юго-восточной части моря наблюдается особый характер солёности. Здесь формируется зона с пониженным содержанием соли, которая сосредоточена в тонком слое воды на глубине от 0 до 10 метров.

В летний сезон в акватории Баренцева моря происходит значительное усиление вертикального градиента солёности, который превышает 1‰ на метр. Это приводит к формированию резкого скачка солёности, что, в свою очередь, способствует образованию сезонного слоя с различной солёностью — галоклина. Подобно сезонному термоклину, галоклин усиливает стратификацию воды по плотности.

В период с августа по ноябрь, когда речной сток уменьшается, а ветровое перемешивание усиливается, солёность воды быстро увеличивается. Это приводит к снижению влияния летнего опреснения на формирование льда по сравнению с другими частями моря, такими как Карское море, где поверхностные воды имеют более низкую солёность во время ледообразования.

Солёность воды в Баренцевом море зависит от глубины и определяется особенностями рельефа дна, а также влиянием вод Атлантического океана и рек. В большинстве районов моря солёность увеличивается с 34 промилле на поверхности до 35,1 промилле на дне. Однако на подводных возвышенностях эти изменения менее выражены.

В Баренцевом море сезонные изменения солёности незначительны. В летний период поверхностный слой воды становится менее солёным, и повышение солёности начинается с глубины 25–30 метров. Зимой этот эффект становится менее выраженным.

В юго-восточной части моря солёность более изменчива с глубиной. Разница между солёностью на поверхности и на дне может достигать нескольких промилле. В этом регионе сезонные изменения солёности более заметны.

В зимний период солёность воды в море остаётся практически постоянной по всей глубине. Весной поверхностный слой воды в реках становится менее солёным. Летом этот процесс усиливается из-за таяния льда, что приводит к значительному различию в солёности между горизонтами на глубине 10 и 25 метров.

С началом осени, когда речной сток уменьшается и на поверхности моря образуется лёд, солёность воды увеличивается и становится равномерной по всей глубине.

В отличие от сезонной изменчивости, межгодовая изменчивость солёности Баренцева моря в большей степени зависит от колебаний речного стока, чем от других компонентов баланса пресной воды.

1.3. Ледовитость

Баренцево море представляет собой уникальный водоём, расположенный в арктической зоне. В отличие от большинства других арктических морей, оно не покрывается льдом полностью. Каждый год около четверти поверхности моря остаётся свободной ото льда на протяжении всего года. Это обусловлено тем, что в Баренцево море поступают тёплые атлантические воды, которые препятствуют охлаждению воды до температуры замерзания.

Ледообмен в Баренцевом море является относительно низким и составляет примерно 3% от общего объёма льда в конце зимнего периода. В основном здесь встречаются льды местного происхождения. Лишь в некоторые годы многолетние льды из Белого моря попадают в северо-восточную и северо-западную части моря. Кроме того, зимой лёд может быть принесён через Новоземельские ворота.

Ледовая обстановка в Баренцевом море меняется из года в год. Это обусловлено особенностями атмосферной циркуляции в данном регионе, которая реагирует на колебания температуры в Арктике.

В большинстве случаев максимальная площадь ледяного покрова наблюдается во второй половине апреля, а минимальная — в конце августа и первой половине сентября. В случае, если август и сентябрь характеризуются аномально высокими температурами, море может полностью освободиться ото льда.

В среднем, в обычные зимы (не суровые и не мягкие) ледяной покров занимает от 40% до 50% поверхности моря, преимущественно в северных районах. Уровень льда колеблется в среднем на 60%.

В центральных районах ледостав обычно начинается в октябре, в то время как в северных районах он начинается уже в сентябре.

Баренцево море является важной частью Арктического региона, где в последнее время происходят значительные изменения, связанные с ледяным покровом. Эти изменения обусловлены глобальными климатическими процессами.

В последние годы наблюдается уменьшение площади и толщины льда в регионе, что связано с увеличением притока тёплых вод из Атлантического океана и изменениями в атмосферных циркуляционных процессах.

Возраст льда является важным показателем, который позволяет оценить динамику изменений в регионе. Он отражает процессы формирования и таяния ледяного покрова.

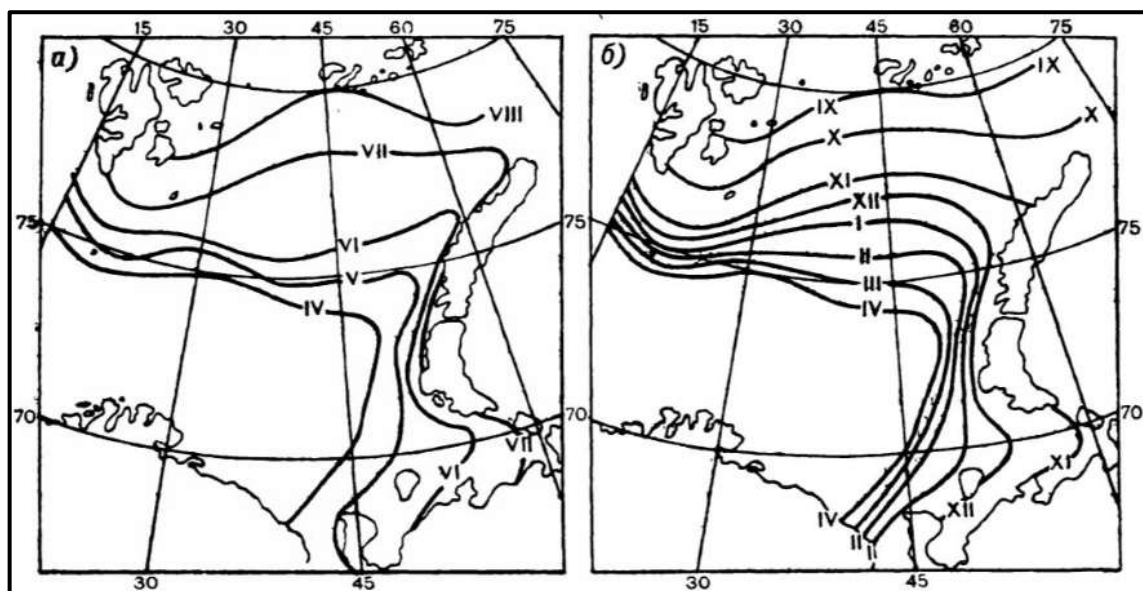


Рисунок 1.7. – Среднее многолетнее положение кромок льда в Баренцевом море: *а* – с апреля по август, *б* – с сентября по апрель

В период с октября по апрель в акватории Баренцева моря формируется ледяной покров, который достигает своего максимального развития к апрелю. Кромка льда в это время смещается в южном направлении между 74° и 75° северной широты. От меридиана 44° восточной долготы она отклоняется к югу и достигает побережья континента в районе мыса Святой Нос.

Начиная с мая, площадь льда в открытом море сокращается, и к сентябрю средняя граница дрейфующего льда смещается к северным и северо-восточным берегам острова Эдж.

Характеристики ледяного покрова в различных частях моря:

- В юго-западной части Баренцева моря лёд практически отсутствует даже в самые суровые зимы.
- В юго-восточной части, напротив, лёд обычно сохраняется до второй половины июня, а в аномально холодные годы — до конца июля — начала августа.

Прибрежные зоны:

- В прибрежных зонах процесс формирования льда начинается раньше, чем в открытом море, и длится дольше. В некоторых

районах, например, в районе Мурманска, лёд может сохраняться до середины июля.

- Вдоль побережья Мурманской области образование льда происходит нечасто, преимущественно в отдельных заливах и у мыса Святой Нос. Период формирования ледяного покрова варьируется в зависимости от погодных условий и может начинаться в октябре-декабре, а заканчиваться в апреле-июне.
- Дрейфующие льды наблюдаются лишь в особо холодные зимы, когда дуют устойчивые восточные ветры. Они прибывают из юго-восточных и северо-восточных районов Баренцева моря, а также из акватории Воронки Белого моря, иногда достигая 34° восточной долготы.
- В юго-восточной прибрежной зоне появление льда происходит с октября по апрель-июнь.

Условия навигации в регионе определяются плотностью ледяного покрова. В восточных районах моря наличие льда может существенно затруднять судоходство вплоть до первой декады июля, а иногда и до августа. Основные препятствия:

- местные льды;
- мощные ледяные массы Карского моря, которые приносятся северо-восточным ветром через пролив Карские Ворота.

В первой главе представлена подробная физико-географическая и гидрологическая характеристика Баренцева моря.

В этом разделе работы подробно рассматриваются границы моря, рельеф его дна, климатические условия, а также ключевые факторы, влияющие на гидрологический режим:

Особое внимание уделяется анализу водных масс, их происхождению и взаимодействию. Исследуются атлантические, арктические, прибрежные и собственно баренцевоморские водные массы.

Проводится анализ сезонных и пространственных изменений температуры и солёности воды, исследуется их зависимость от речного стока, ледовых процессов и влияния атлантических течений.

Особое внимание уделяется описанию ледовитости Баренцева моря, рассматривается динамика ледового покрова, его межгодовая изменчивость и современные тенденции, связанные с климатическими изменениями.

1.4. Влияние ледовых процессов на судоходство и добычу углеводородов в Баренцевом море

Баренцево море, расположенное на северо-западе Российской Федерации, является ключевым регионом для судоходства и добычи углеводородов. Стратегическое значение моря обусловлено наличием значительных запасов нефти и газа, а также прохождением через него Северного морского пути (СМП). Суровые климатические условия, особенно связанные с ледовыми процессами, представляют серьезные вызовы для экономической деятельности в регионе.

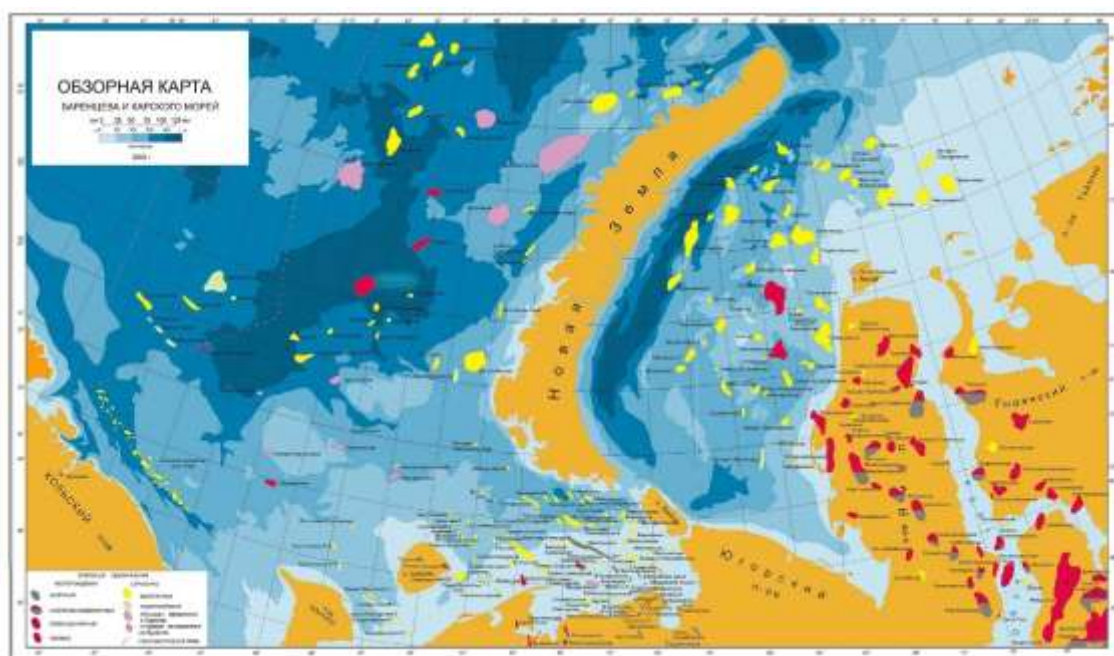


Рисунок 1.7. – Карта месторождений углеводородов в Баренцевом море

Баренцево море характеризуется сезонным ледовым покровом, с максимальной площадью льда в марте-апреле и минимальной в сентябре. В

последние годы в Арктике наблюдается тревожная тенденция к сокращению площади ледяного покрова. С 1998 по 2008 год этот показатель уменьшился на 50%, что особенно заметно в зимний и весенний периоды. Это делает Баренцево море уникальным среди других арктических морей.

Климатические изменения, известные как «арктическое усиление», приводят к тому, что потепление в Арктике происходит в два-три раза быстрее, чем в других регионах. Это делает ледовые условия более изменчивыми и непредсказуемыми, что существенно влияет на судоходство в Арктике.

Сокращение ледяного покрова открывает новые перспективы для судоходства по Северному морскому пути (СМП). Средняя продолжительность плавания по СМП сократилась с 20 дней в 1990-е годы до 11 дней в 2012–2013 годах. Однако, несмотря на общее уменьшение площади льда, ледовые условия остаются сложными и требуют тщательной подготовки судов.

Суда, предназначенные для плавания в арктических водах, должны соответствовать определённым требованиям, в зависимости от ожидаемых условий плавания. В частности, они должны быть способны преодолевать движение льда, которое может представлять опасность для кораблей.

Согласно «правилам Нансена», направление движения льда примерно на 30 градусов правее направления ветра, а скорость движения составляет около 2% от скорости ветра.

Баренцево море богато углеводородами, включая такие месторождения, как Штокмановское, Ледовое и Лудловское. Однако освоение этих ресурсов затрудняется ледовой обстановкой, характеризующейся наличием обширных и подвижных ледяных полей. Это значительно увеличивает риск техногенных катастроф, особенно когда традиционные методы ликвидации ледяных полей оказываются неэффективными.

Во-вторых, освоение и эксплуатация морских нефтегазовых объектов в Баренцевом море сопряжено со значительными финансовыми и технологическими затратами. С увеличением глубины стоимость морских нефтегазовых сооружений (МНГС) существенно возрастает.

Кроме того, в придонных слоях Баренцева моря могут находиться газовые гидраты, что создаёт дополнительные риски при бурении и эксплуатации скважин.

Несмотря на это, Баренцево море остаётся перспективным регионом для судоходства и добычи углеводородов. Для успешного освоения этого региона необходимо:

- Разработать и внедрить передовые технологии мониторинга и прогнозирования ледовой обстановки.
- Создать суда и платформы, способные эффективно функционировать в сложных ледовых условиях.
- Разработать и применять экологически безопасные методы добычи и транспортировки углеводородного сырья.
- Установить сотрудничество между государствами и организациями для обмена знаниями и ресурсами.

В акватории Баренцева моря наблюдаются процессы формирования и таяния ледяного покрова, которые оказывают значительное влияние на судоходство и добычу полезных ископаемых в регионе.

С одной стороны, уменьшение площади ледяного покрова создаёт благоприятные условия для развития экономической деятельности. С другой стороны, это также создаёт дополнительные риски, которые требуют комплексного подхода, включающего технологические, экологические и организационные меры. Только после тщательного анализа всех факторов и оценки рисков можно обеспечить устойчивое и безопасное освоение ресурсов Баренцева моря.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

2.1. Исходные данные

В рамках дипломной работы проводится анализ изменений ледового покрова Баренцева моря в течение нескольких лет. В качестве исходных данных были использованы среднемесячные показатели площади льда, охватывающие период с 1978 по 2024 год, которые были предоставлены Национальным Центром Экологической Информации (National Centers for Environmental Information).

Кроме того, были привлечены ежедневные метеорологические данные, включающие температуру атмосферы, полученные с метеостанций, расположенных в ключевых точках акватории Баренцева моря: в Мурманске, Малых Кармакулах, Баренцбурге, Индиге и обсерватории им. Э.Т. Кренкеля. Эти данные были взяты из специализированных массивов, предназначенных для климатических исследований, и использованы для расчета интегрального показателя — суммы градусо-дней мороза (СГДМ). СГДМ является важным индикатором термического режима и его влияния на ледовые процессы. Чтобы лучше понять, как меняется ледовый покров в пространстве и времени, мы использовали высоко детализированные карты, предоставленные Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ).

После тщательного изучения этих данных мы смогли обнаружить основные закономерности и тенденции, которые показывают, как меняется ледовый покров Баренцева моря в условиях изменения климата.

Таблица 1 - Выбранные метеорологические станции Баренцева моря

Номер п/п	Индекс	Название
1	20107	п. Баренцбург
2	22292	п. Индига
3	20046	Им. Э.Т. Кренкеля
4	20744	Малые Кармакулы
5	22113	г. Мурманск

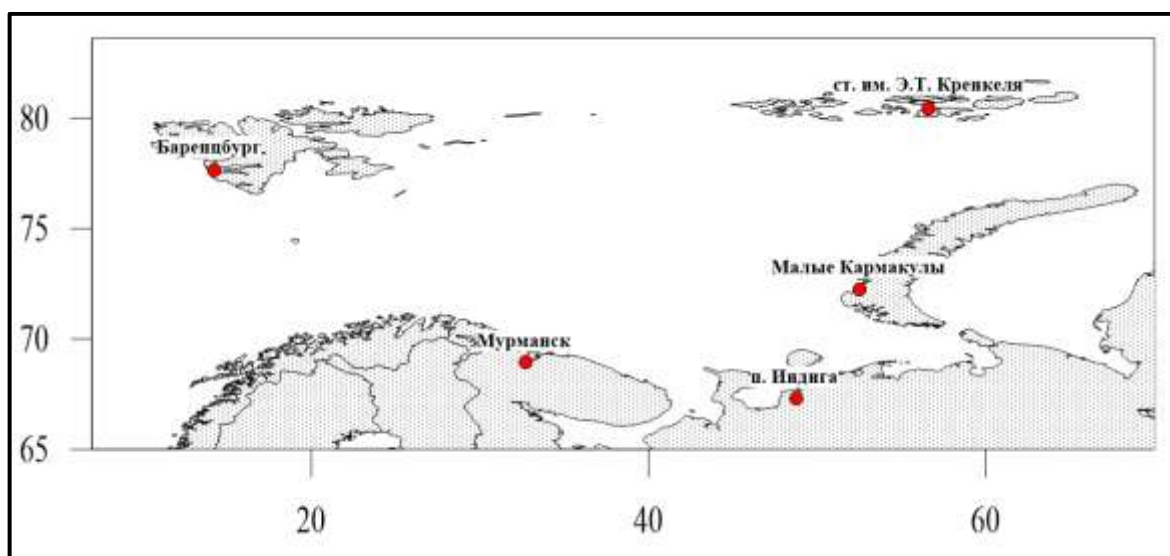


Рисунок 2.1. – Карта расположения исследуемых станций

2.2. Методы анализа исходных данных

Для исследования межгодовой изменчивости площади льда Баренцева моря применен комплекс методов исследования, направленных на выявление ключевых закономерностей и трендов, характерных для выбранного региона. В данной работе были использованы следующие методы исследования:

- Анализ тренда временного ряда;
- Расчет трендовой составляющей;
- Анализ среднегодовых температур воздуха;
- Кластерный анализ;
- Расчет СГДМ.

2.2.1 Анализ тренда временного ряда и его расчет

В исследовании динамических процессов анализ стабильности временных рядов играет ключевую роль.

Для эффективного применения большинства методов анализа временных рядов необходимо, чтобы исследуемый процесс соответствовал важному условию — стабильности. Это означает, что основные статистические характеристики ряда, такие как среднее значение и дисперсия, не изменяются с течением времени.

Стабильные случайные процессы описывают явления, которые развиваются относительно предсказуемо, что позволяет использовать стандартные методы моделирования и прогнозирования.

Первым этапом анализа является проверка ряда на стабильность. Если ряд не соответствует критериям стабильности, применяются различные преобразования, такие как дифференцирование, логарифмирование или удаление тренда, чтобы привести его к стабильному виду.

Временные ряды могут быть подвержены нестабильности, которая может быть вызвана различными факторами. Одним из таких факторов является наличие тренда, представляющего собой долгосрочное изменение значений ряда. Тренд может быть как восходящим, так и нисходящим.

Другими причинами нестабильности могут быть случайные колебания, возникающие из-за внешних воздействий или внутренних процессов.

Анализ стабильности временных рядов позволяет выявить наличие тренда и случайных колебаний, а также определить степень их влияния на основные статистические характеристики ряда.

Временной ряд может испытывать колебания, которые проявляются в двух основных аспектах:

- Постепенное изменение статистических показателей, обусловленное наличием тенденции в математическом ожидании или дисперсии.

- Резкие изменения характеристик, вызванные структурными изменениями в данных.

Тенденция представляет собой долгосрочные колебания, которые происходят на протяжении длительного периода времени, значительно превышающего продолжительность анализируемого набора данных. В данном контексте тенденция может рассматриваться как часть низкочастотной составляющей, которая не полностью представлена в наблюдениях.

В зависимости от фазы долгосрочных колебаний, попавшей в выборку, тенденция может иметь различные математические формы:

- Линейная тенденция характерна для участков с монотонным увеличением или уменьшением.
- В условиях, когда процесс характеризуется неравномерным развитием и достигает пиковых значений, можно говорить о наличии полиномиального тренда, в частности, квадратичного.

Определение типа тренда позволяет глубже понять специфику изучаемого процесса и выбрать наиболее подходящие методы для его анализа и преобразования.

Данный раздел является основой для последующего практического исследования, которое включает в себя анализ стабильности и моделирование тенденций на основе данных, полученных за различные временные периоды.

Сформулируем уравнение линейного тренда:

$$y = a_1 t + a_0 + \varepsilon, \quad (2.1)$$

И уравнение нелинейного (полиномиального) тренда:

$$y = a_2 t^2 + a_1 t + a_0 + \varepsilon, \quad (2.2)$$

где t – время.

Основными характеристика тренда являются:

1. Коэффициент детерминации R^2 (для линейного тренда), характеризует вклад тренда в общую дисперсию ряда. Вклад может являться значительным или незначительным, что определяется на основании проверки коэффициента корреляции на значимость.

В случае незначительности коэффициента корреляции считается, что тренда нет.

2. Величина тренда характеризует абсолютное изменение исследуемого показателя за заданный интервал времени.

Чтобы оценить тренд на значимость проводится проверка насколько его вклад в изменчивость случайного процесса существенен (значителен). Для этого используют критерий Стьюдента и определяется нулевая гипотеза по отношению к коэффициенту регрессии a_1 и коэффициенту корреляции r :

$$H_0: |a_1| = 0, H_0: |r| = 0 \quad (2.3)$$

После чего рассчитывается выборочный критерий Стьюдента, причем так, чтобы облегчить оценку значимости тренда, следует показать, что $t_r = t_{a1}$. Критерий Стьюдента для проверки гипотезы используется в виде:

$$t = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (2.4)$$

Далее производится проверка неравенства:

$$t > t_{кр}(\alpha, v = n - 2) \quad (2.5)$$

В случае, если значение оценки тренда превышает пороговое значение, соответствующее выбранному уровню статистической значимости, можно говорить о статистической значимости тренда.

Необходимо отметить, что формулы (2.1) и (2.2) представляют тренд как среднее арифметическое значение, которое часто встречается в естественных процессах.

Если в исследуемой выборке присутствуют как линейный, так и нелинейный тренды, и при этом нелинейный тренд вносит более существенный вклад в дисперсию выборки (более 5%), то при анализе следует отдать предпочтение нелинейному тренду. В противном случае, предпочтение следует отдать линейному тренду.

2.2.2 Кластерный анализ

Кластерный анализ представляет собой мощный инструмент в области распознавания образов, который объединяет различные математические методы и алгоритмы с целью автоматической классификации многомерных данных. Основой этого подхода является идея самообучения, позволяющая группировать объекты в однородные категории без необходимости предварительного определения правил классификации.

Классификация представляет собой фундаментальную научную процедуру, заключающуюся в структурировании исследуемой совокупности объектов (явлений, процессов и т.д.) на непересекающиеся группы (классы, таксоны, кластеры). Эти группы должны быть максимально однородными и чётко отличаться друг от друга. Для выделения классов используется критерий, который стремится максимизировать сходство внутри групп и минимизировать его между группами. Таким образом, классификация выполняет две функции:

Кластерный анализ представляет собой мощный инструмент, позволяющий эффективно работать с данными и выявлять скрытые закономерности. Он выполняет две ключевые функции:

1. Синтезирующая функция — помогает кратко описать данные, выявляя скрытые связи.
2. Аналитическая функция — позволяет определить ключевые особенности, формирующие структуру исследуемой системы.

В рамках данного исследования мы использовали специализированное программное обеспечение PAST4 (Paleontological Statistics) для проведения кластерного анализа. Это программное обеспечение предоставляет широкие возможности:

- выбор метрики расстояний с учётом множества критериев;
- поддержка различных алгоритмов кластеризации, включая иерархические, k-средних и нечёткие;
- визуализация результатов в многомерном пространстве признаков.

Применение этого программного инструмента обеспечило достоверность статистических данных и возможность воспроизведения результатов, что отвечает современным требованиям к проведению вычислительных исследований.

2.2.3 Расчет СГДМ

Показатель градусо-дней мороза (ГДМ) представляет собой важный климатический индикатор, позволяющий оценить интенсивность и продолжительность воздействия отрицательных температур в зимний сезон. Этот параметр определяется как сумма среднесуточных температур воздуха, значения которых на протяжении всего периода являются отрицательными.

$$\sum(-T)_a = \text{СГДМ}, \quad (2.6)$$

Где: T_a – среднесуточная температура атмосферы, °С, СГДМ – сумма градусо-дней мороза, °С·сут.

Полученные данные о среднегодовом значении температуры (СГДМ) представляют собой важный показатель для объективной оценки суровости зимы. Этот показатель позволяет разделить зиму на три категории:

- Суровая зима — характеризуется экстремально высокими значениями СГДМ, что указывает на длительное и интенсивное воздействие низких температур.
- Умеренная зима — отличается средними значениями показателя, которые отражают типичные климатические условия для данного региона.
- Мягкая зима — характеризуется минимальными значениями СГДМ, указывающими на слабое термическое воздействие мороза.

Аналитическая ценность и практическое применение СГДМ в климатических исследованиях заключается в следующем:

- Анализ изменчивости зимних температурных режимов в пространстве и времени.

- Оценка нагрузки на инфраструктуру, включая энергосистемы, транспорт и строительные конструкции, в зависимости от класса суровости зимы.
- Прогнозирование в контексте современных климатических изменений.

Методика расчёта среднегодовой температуры воздуха (СГДМ) требует тщательного анализа ряда ключевых аспектов:

- Достоверность исходных метеорологических данных. Необходимо обеспечить надёжность и репрезентативность данных, получаемых с метеорологических станций.
- Выбор временного промежутка. Обычно для расчёта СГДМ выбирают календарную зиму или период, когда температура стабильно держится ниже нуля градусов Цельсия.
- Учёт региональных особенностей. Следует принимать во внимание микроклиматические зоны и городской эффект тепла.

Таким образом, СГДМ представляет собой не только расчётный показатель, но и эффективный инструмент для принятия обоснованных решений в области экологии, энергетики и городского планирования.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

3.1. Расчет трендовой составляющей Баренцева моря

В рамках исследования изменчивости ледовитости Баренцева моря был проведен анализ временного тренда. В качестве основных параметров для оценки динамики изменений были выбраны коэффициент детерминации (R^2), отражающий долю объясненной дисперсии в общей изменчивости данных, а также коэффициенты регрессионной модели (a и b), характеризующие наклон и смещение линейного тренда.

Для расчета трендовой составляющей были использованы данные о среднемесячных значениях площади ледового покрова, полученные за период с 1979 по 2024 год с официального портала Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) (Приложение 1). Эти данные послужили основой для расчета трендовой составляющей, позволившей выявить и количественно оценить долгосрочные изменения ледовитости исследуемого региона.

Уравнение линейного тренда для ледовитости (K) и времени (t):

$$K = -8546x + 2E + 07$$

После чего была проведена проверка коэффициентов регрессии (a и b).

Таблица 3.1. Характеристики линейного тренда среднегодового ряда

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,838908115
R-квадрат	0,703766826
Нормированный R-квадрат	0,697034254
Стандартная ошибка	75263,13449
Наблюдения	46

Дисперсионный анализ					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	1	5,92124E+11	5,92124E+11	104,531643	3,35801E-13
Остаток	44	2,4924E+11	5664539414		
Итого	45	8,41363E+11			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>
Y-пересечение	17459703	1673030,933	10,43597161	1,7624E-13
Переменная X 1	-8545,997	835,8701625	-10,22407174	3,358E-13
	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>	<i>Нижние 95,0%</i>	<i>Верхние 95,0%</i>
Y-пересечение	14087931	20831475,6	14087931,02	20831475,6
Переменная X 1	-10230,58	-6861,410883	-10230,58213	-6861,4109

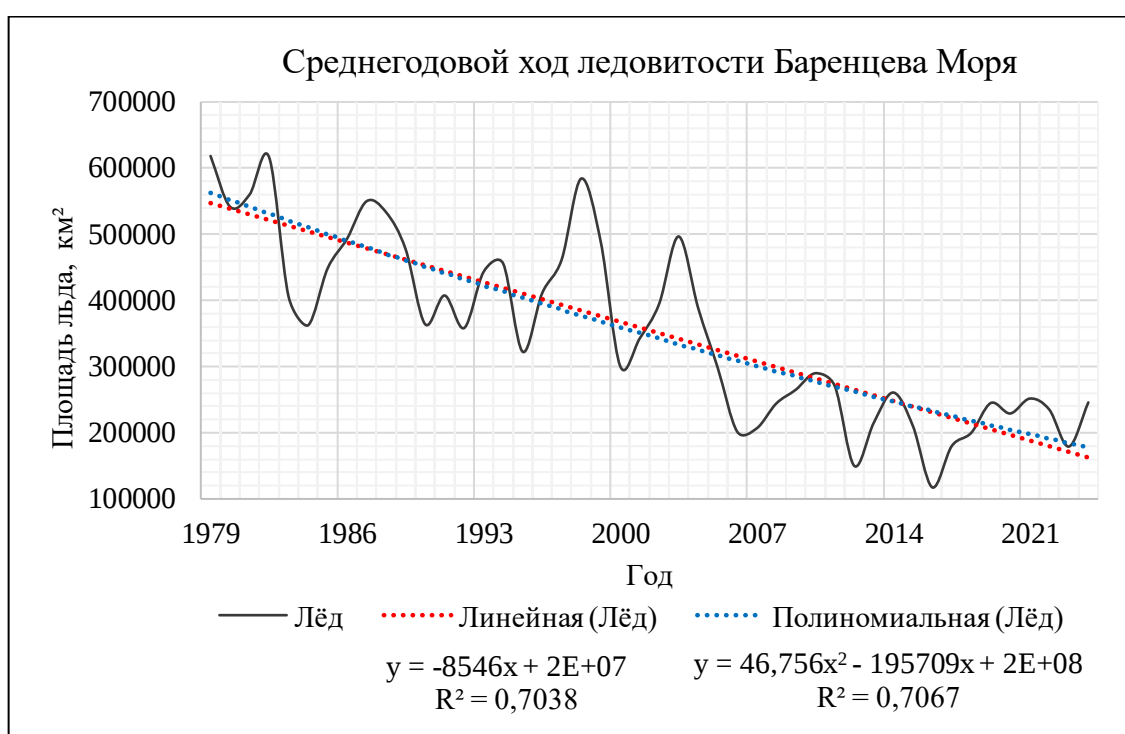


Рисунок 3.1. - График среднегодового хода ледовитости и его линейный и нелинейный тренды

График среднегодовой ледовитости Баренцева моря показывает отрицательный тренда – сокращение площади льда составляет 85 тыс. км² за 10 лет. Максимальное значение площади ледового покрова было зафиксировано в 1982 году и составило 616 тыс. км². Минимальное значение площади ледового покрова в акватории Баренцева моря было зафиксировано в 2016 году и составило 117 тыс. км². Кроме того, в период с 1982 года по 2014 год наблюдалось существенное сокращение площади ледового покрова с 616 тыс.

км² до 260 тыс. км², что свидетельствует о выраженной тенденции к снижению ледовитости в указанный временной интервал. Однако, начиная с 2014 года, динамика ледового покрова демонстрирует признаки стабилизации, проявляющиеся в колебаниях площади льда около среднего значения, составляющего приблизительно 230 тыс. км². Данный факт указывает на замедление темпов сокращения ледовитости и переход к более устойчивому состоянию, при этом общий отрицательный тренд сохраняется.

3.2. Анализ трендов площади льда по месяцам

В ходе исследования было установлено, что в зимний период площадь ледового покрова в акватории Баренцева моря остается относительно стабильной, несмотря на колебания температурных условий, обусловленных различной степенью суровости зим. Однако наиболее значительные изменения площади льда наблюдаются в периоды межсезонья, когда происходит активное таяние или формирование ледового покрова. Для более детального анализа динамики изменений ледовой поверхности были созданы и проанализированы графики, отражающие изменения площади льда по месяцам с 1979 по 2024гг. Данные графики позволили выявить ключевые тенденции и закономерности, которые могут быть использованы для дальнейшего исследования и моделирования процессов, связанных с изменением ледового покрова.

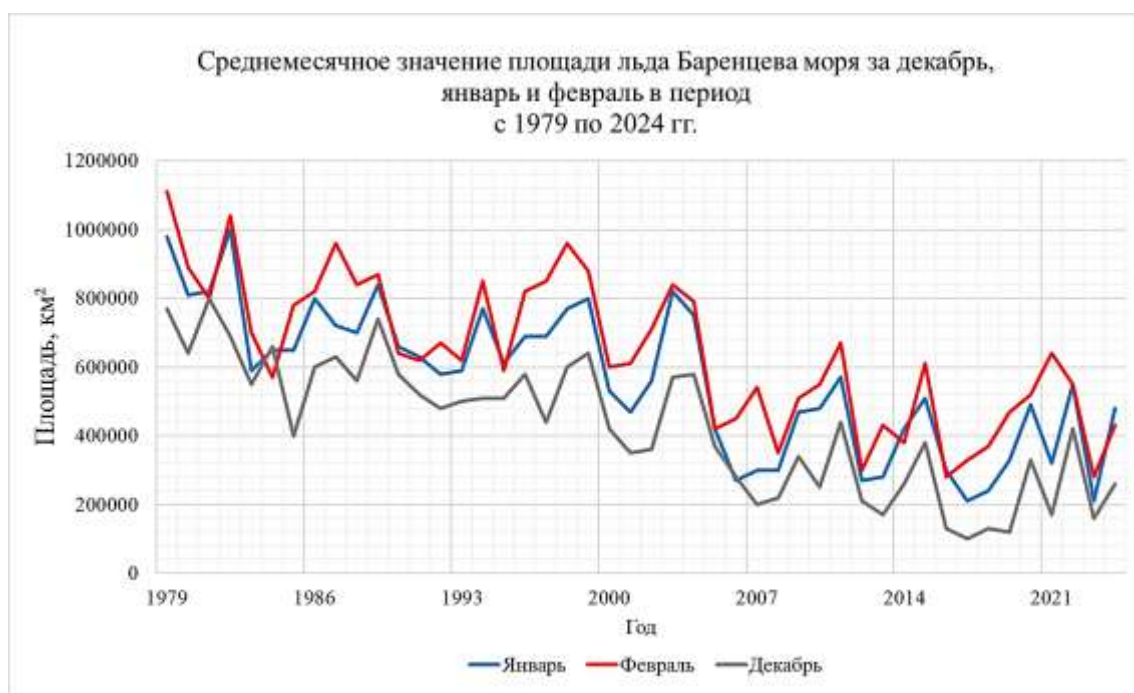


Рисунок 3.2. – График среднемесечных значений площади льда Баренцева моря за декабрь, январь и февраль в период с 1979 по 2024 гг.

По графикам видно, что площадь льда Баренцева моря в зимний период (январь и февраль) с 1979 по 2024 гг. демонстрирует устойчивую тенденцию к снижению. В начале наблюдаемого периода площадь льда в январе превышала 1 млн. км², а в последние годы она колеблется в районе 400 тыс. км². Аналогичная динамика наблюдается и в феврале – трендовая линия имеет наклон -11766 км² в год. Снижение площади льда также выражено четко, при этом можно отметить, что значения после 2007 года стабильно остаются ниже среднего уровня прошлых десятилетий.

За последние 45 лет площадь льда в Баренцевом море в зимние месяцы значительно уменьшилась. Средняя площадь в январе и феврале снизилась примерно в два раза. Эти данные могут свидетельствовать о продолжающемся воздействии глобального потепления и необходимости усиленного внимания к арктическому региону в рамках климатической политики.



Рисунок 3.4. – График среднемесячных значений площади льда Баренцева моря за март, апрель и май в период с 1979 по 2024 гг.

По графикам видно, что площадь льда в акватории Баренцева моря в весенний период (март, апрель и май) с 1979 по 2024 гг. демонстрируют устойчивую тенденцию к снижению. В марте площадь льда варьируется от года к году, но тенденция к уменьшению площади льда сохраняется. Трендовая линия указывает на ежегодное сокращение площади льда примерно на 1 тыс. км². Несмотря на периодические краткосрочные увеличения, общее направление изменения устойчиво нисходящее.

В апреле скорость сокращения ледового покрова выше, чем в марте – 12 тыс. км². Также, в апреле за исследуемый период отмечается более выраженное снижение площади ледового покрова с середины 1990-х годов. Разброс данных меньше по сравнению с мартом, что указывает на более устойчивое уменьшение.

Наибольшее сокращение ледового покрова наблюдается в мае – около 12 тыс. км² в год. Также, следует отметить, что именно в мае наблюдается наибольшая волатильность данных в отдельные годы, особенно после 2000 года. Тем не менее, тренд наиболее резко направлен вниз по сравнению с мартом и апрелем.

Все три месяца демонстрируют уверенное снижение площади морского льда, что свидетельствует о прогрессирующем потеплении в арктическом регионе и изменении климата. Март демонстрирует меньшую скорость сокращения, а май характеризуется наибольшими колебаниями и самым резким снижением, что указывает на уязвимость льда в переходный весенний период.

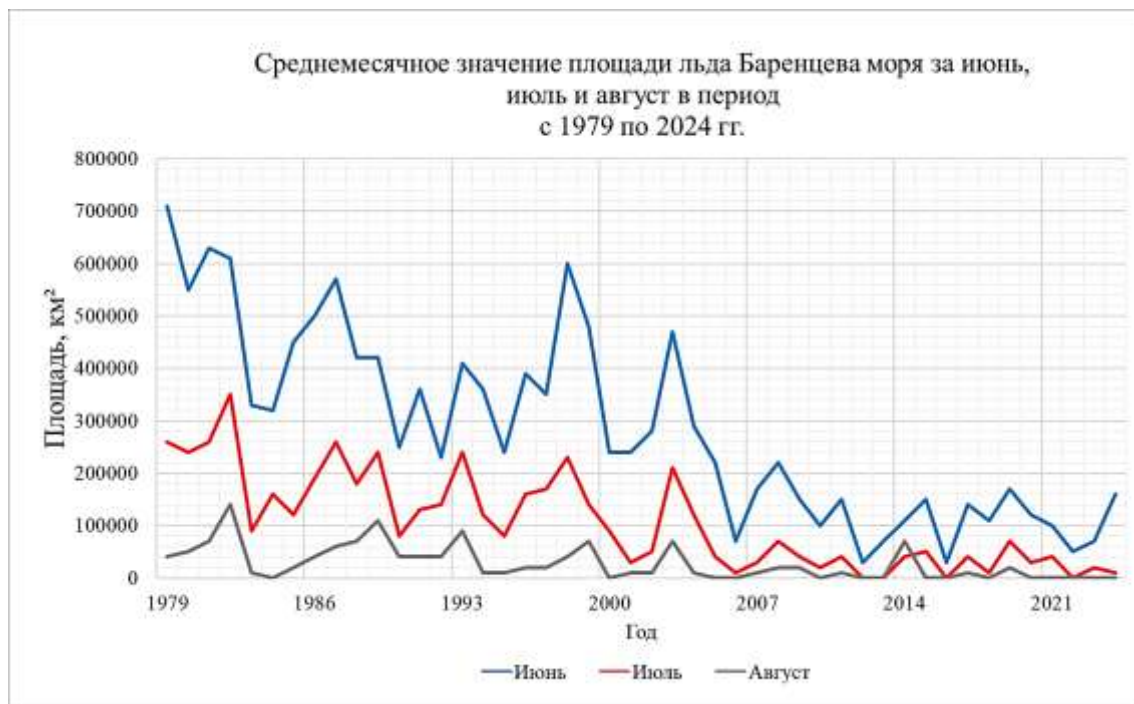


Рисунок 3.5. – График среднемесячных значений площади льда Баренцева моря за июнь, июль и август в период с 1979 по 2024 гг.

В течение трёх месяцев наблюдается устойчивая тенденция к уменьшению площади морского льда, которая особенно заметна в июне. Это видно на графике, где синяя линия отражает динамику изменения площади морского льда.

В начале исследуемого периода площадь морского льда в июне превышала 700 тысяч квадратных километров. Однако к 2020-м годам она стабилизировалась на уровне ниже 200 тысяч квадратных километров, с некоторыми аномальными всплесками. В июле и августе также наблюдалось уменьшение площади, хотя и не такое значительное в абсолютных значениях.

В период с 1980-х по начало 2000-х годов наблюдались колебания, которые могли быть вызваны естественными изменениями климата или началом глобального потепления. Однако с 2000-х годов эти колебания стали менее

выраженными, и график стал показывать более стабильное уменьшение площади морского льда.

С 2005 года, особенно в июле и августе, наблюдается тенденция к уменьшению площади морского льда в Арктике. В некоторые летние сезоны ледяной покров практически полностью отсутствует.

Однако в некоторые годы, такие как 1996, 2000 и 2021, наблюдается кратковременное увеличение площади льда в июне. Эти изменения не противоречат общей тенденции к уменьшению площади льда, а скорее указывают на краткосрочные климатические или погодные аномалии.

Анализ временного ряда среднемесячной площади морского льда в Баренцевом море в летние месяцы за период с 1979 по 2024 год показывает, что площадь льда постепенно уменьшается.



Рисунок 3.6. – График среднемесячных значений площади льда Баренцева моря за сентябрь, октябрь и ноябрь в период с 1979 по 2024 гг.

На графике представлены данные о среднемесячной площади ледяного покрова Баренцева моря в сентябре, октябре и ноябре за период с 1979 по 2024 годы.

Информация представлена в виде трёх отдельных кривых, соответствующих трём месяцам: синяя линия — сентябрь, красная — октябрь,

чёрная — ноябрь. По оси абсцисс отложены годы наблюдений, по оси ординат — площадь ледяного покрова в квадратных километрах.

Сентябрь традиционно является самым холодным месяцем в году, что связано с минимальным значением арктического оледенения в этот период. В рассматриваемый период наблюдается тенденция к уменьшению площади льда в сентябре: если в 1980-х и начале 1990-х годов она составляла от 50 000 до 100 000 км², то с середины 2000-х годов происходит устойчивое снижение до значений, часто не превышающих 20 000 км². В последние годы площадь ледяного покрова в сентябре часто стремится к нулю, что может указывать на возможную потерю устойчивого сезонного образования льда в этот месяц.

В октябре площадь ледяного покрова обычно превышает показатели сентября, что свидетельствует о начале активного осеннего замерзания. Однако, несмотря на увеличение площади льда в этот период, наблюдается тенденция к её уменьшению.

В 80-90-е годы прошлого века площадь льда в октябре часто достигала 200-300 тысяч квадратных километров, а в некоторые годы превышала эти значения. С начала XXI века наблюдается постепенное снижение, и после 2010 года площадь льда редко превышает 100 тысяч квадратных километров. В некоторые годы лёд практически полностью отсутствует, что свидетельствует о позднем начале ледообразования.

Ноябрь — это месяц, когда площадь ледяного покрова достигает своего максимума среди рассматриваемых периодов. Это отражает пик осеннего ледообразования. Однако, как и в случае с сентябрём и октябрём, общая тенденция указывает на снижение.

В период с 1980 по 1990 годы площадь ледяного покрова Баренцева моря в ноябре варьировалась от 400 000 до 600 000 квадратных километров. Однако с начала 2000-х годов наблюдается тенденция к уменьшению площади льда, при этом межгодовая изменчивость становится более выраженной. В последние годы в ноябре площадь ледяного покрова часто составляет менее 200 000 квадратных

километров, а в некоторые годы фиксируются аномально низкие значения, близкие к показателям октября.

На основании анализа данных можно сделать следующие выводы: в осенний период наблюдается устойчивая тенденция к уменьшению площади ледяного покрова Баренцева моря. Особенно заметно это проявляется в сентябре, в октябре и ноябре снижение менее выражено, но все три месяца демонстрируют согласованное уменьшение площади льда. С 2005 года наблюдается значительное сокращение площади ледяного покрова и его стабильности. Это может быть связано с общим потеплением в Арктическом регионе, которое приводит к усилению процессов таяния льда и замедлению его формирования в осенний период. С начала XXI века отмечается усиление изменчивости погодных условий, проявляющееся в резких колебаниях климатических показателей между соседними годами. Это может указывать на нарушение привычных климатических норм и увеличение частоты экстремальных погодных явлений.

3.2. Анализ среднегодовых температур воздуха

В ходе исследования был проведён анализ данных о средних температурах воздуха за каждый месяц в период с 1979 по 2024 год. Источником информации послужила обширная библиотека климатических данных, доступная на официальном сайте aisori.meteo.ru.

Для анализа были выбраны данные с пяти метеорологических станций, расположенных в различных регионах: город Мурманск, посёлок Малые Кармакулы, посёлок Баренцбург, посёлок Индига и обсерватория имени Э.Т. Кренкеля.

Собранные данные были систематизированы и обработаны, после чего для каждой метеостанции были созданы таблицы в формате Excel, содержащие информацию о средних температурах воздуха за каждый месяц. На основе этих

таблиц был проведён расчёт средних годовых температур воздуха, что позволило получить обобщённые показатели для каждого года исследуемого периода.

Для наглядного представления изменений климатических условий были составлены графики для каждой метеостанции, отображающие динамику средней температуры воздуха в течение года за исследуемый период.

Для более глубокого анализа динамики температурных изменений были нанесены на графики линии, отражающие линейный и нелинейный тренды. Это позволило нам провести количественный анализ и определить характер и направленность температурных колебаний.

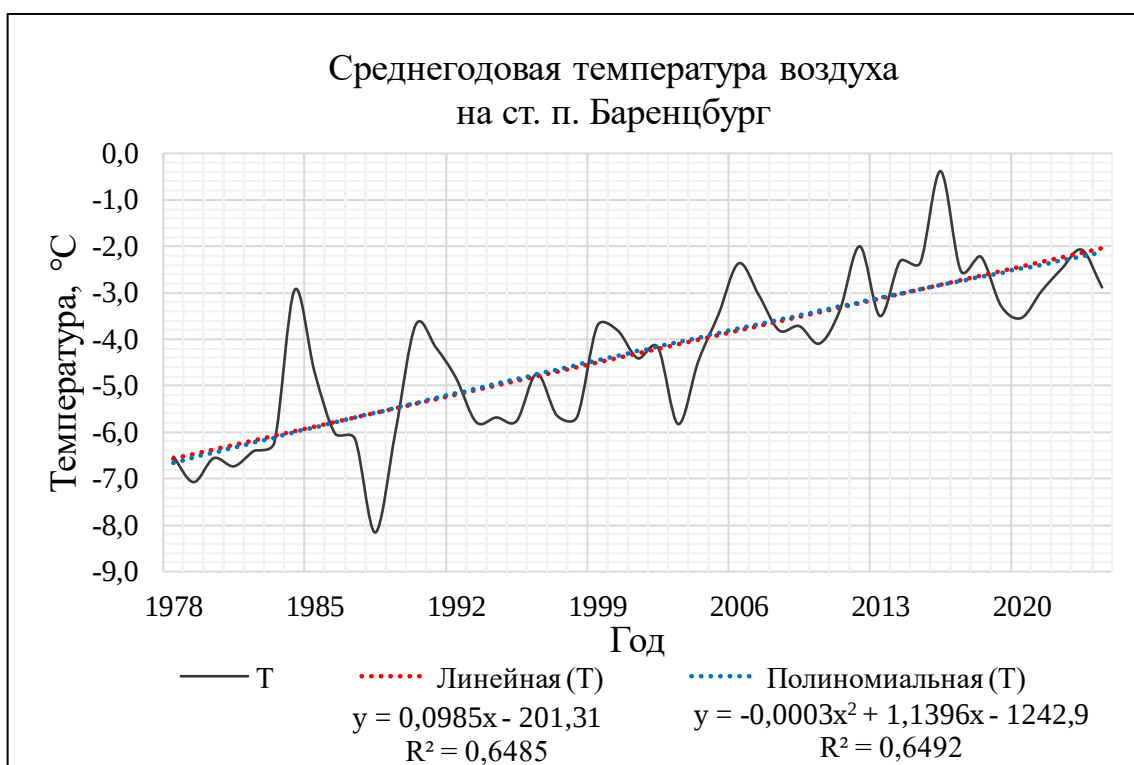


Рисунок 3.7. - График среднегодовой температуры воздуха на ст.
Баренцбург

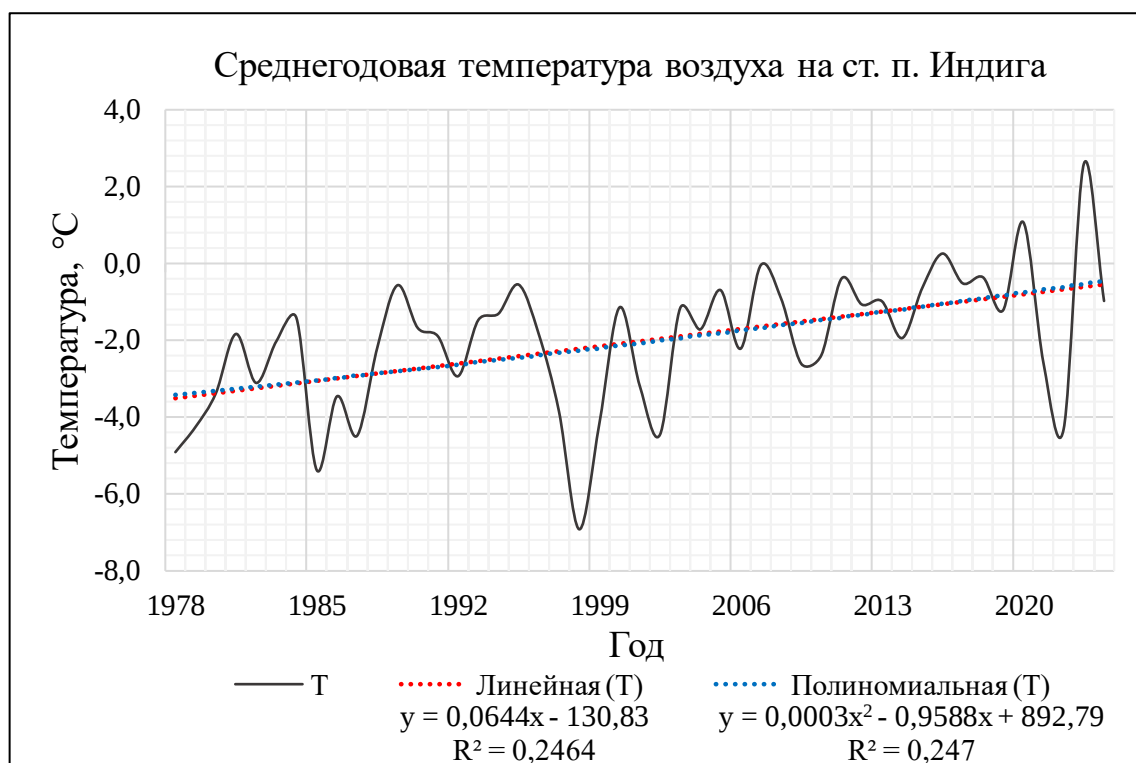


Рисунок 3.8. - График среднегодовой температуры воздуха на ст. Индига

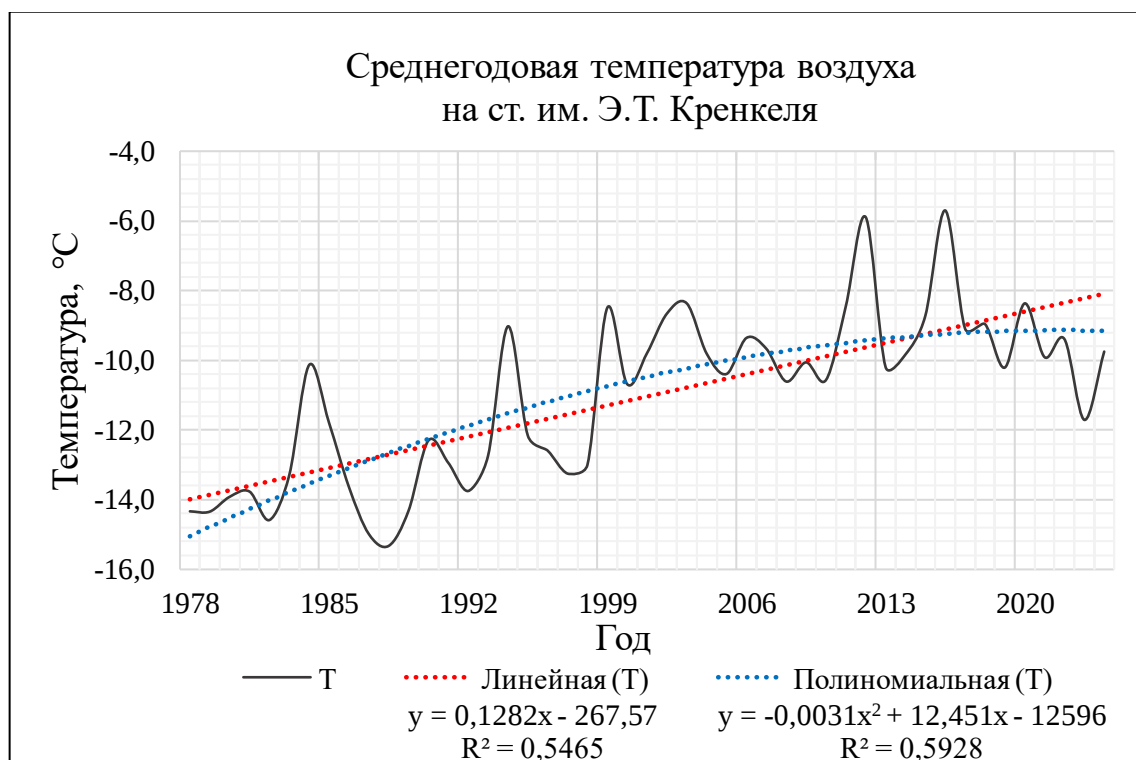


Рисунок 3.9. - График среднегодовой температуры воздуха
на ст. им. Э.Т. Кренкеля

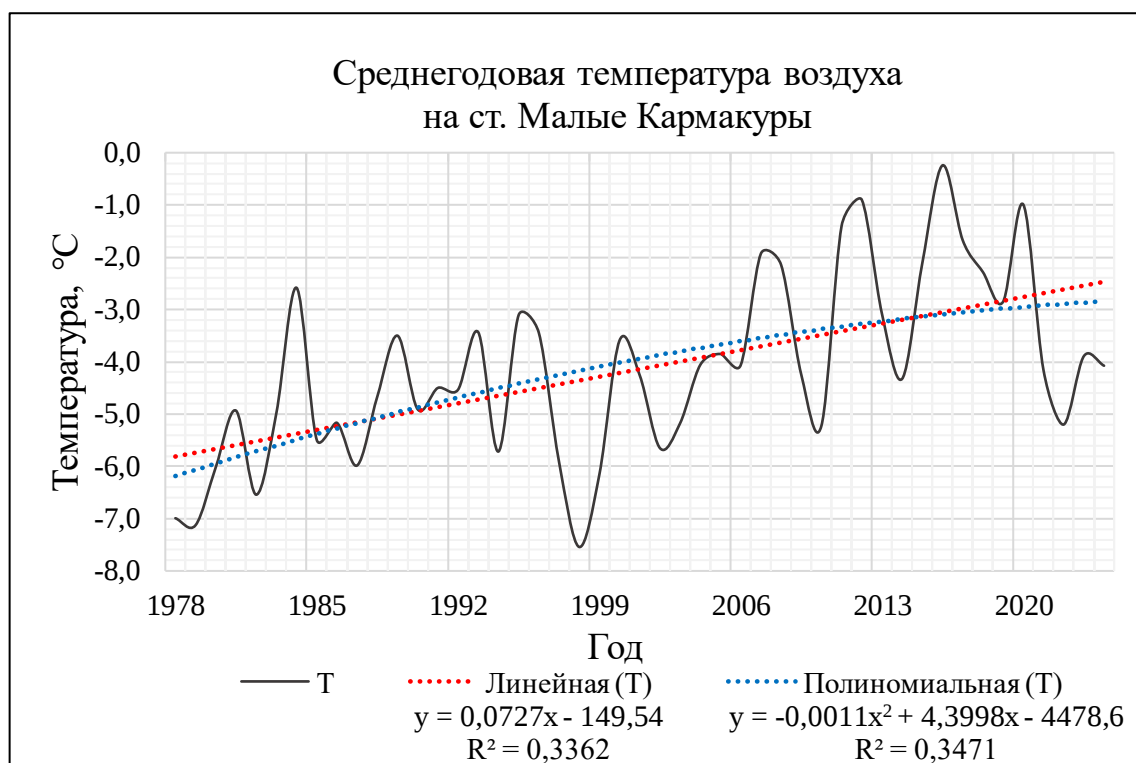


Рисунок 3.10. - График среднегодовой температуры воздуха
на ст. Малые Кармакуры

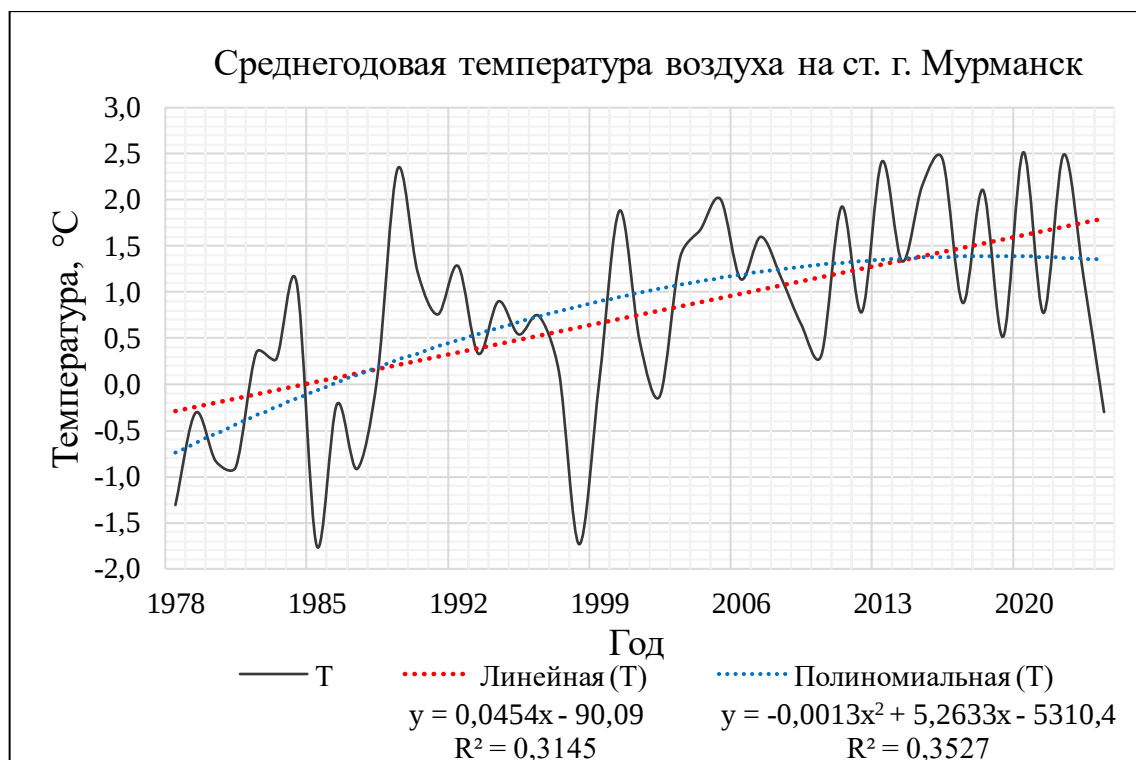


Рисунок 3.11. - График среднегодовой температуры воздуха
на ст. Мурманск

Анализ данных, полученных с метеостанций, показал, что среднегодовая температура воздуха имеет тенденцию к повышению. На всех исследованных

станциях наблюдается положительный тренд, который указывает на постепенное увеличение температуры воздуха с течением времени.

На метеостанции имени Э. Т. Кренкеля в период с 1979 по 2024 год был зафиксирован самый низкий среднегодовой показатель температуры воздуха в 1988 году, который составил $-15,3^{\circ}\text{C}$. Подобные показатели были отмечены и на других станциях: в посёлке Баренцбург в 1988 году: $-8,2^{\circ}\text{C}$, в посёлке Индига в 1998 году: $-6,9^{\circ}\text{C}$, в Малых Кармакурах в 1998 году: $-7,5^{\circ}\text{C}$ и в Мурманске в 1985 и 1998 годах: $-1,7^{\circ}\text{C}$. Вероятно, эти периоды характеризовались особенно суровыми климатическими условиями.

В последующие годы были зафиксированы самые высокие среднегодовые показатели температуры воздуха на станциях.

В 2023 году на станции Индига был зафиксирован рекордно высокий показатель среднегодовой температуры воздуха, который составил $2,6^{\circ}\text{C}$. Аналогичные значения были также отмечены на других станциях: на станции Баренцбург в 2016 году: $-0,4^{\circ}\text{C}$, на станции имени Э. Т. Кренкеля в 2012 и 2016 годах: $-5,7^{\circ}\text{C}$, на станции Малые Кармакуры в 2016 году: $-0,2^{\circ}\text{C}$ и на станции Мурманск в 2016 году: $2,5^{\circ}\text{C}$.

Стоит отметить, что в основном максимальные значения среднегодовой температуры воздуха были зафиксированы в 2016 году, что, по всей видимости, связано с относительно мягкой или умеренной зимой в тот период. Для визуализации и интерпретации полученных результатов был построен сводный график, отражающий изменения температурных показателей за исследуемый период (рис 3.9.).



Рисунок 3.12. - Среднегодовые значения температуры воздуха на выбранных станциях с 1979 по 2024 гг.

В результате анализа данных среднегодовых температур воздуха, полученных на метеостанциях в районе Баренцева моря, была выявлена устойчивая тенденция к повышению температуры в этом регионе.

Особенно заметное увеличение температуры наблюдается на станции обсерватории имени Э. Т. Кренкеля, где за последние десять лет она поднялась в среднем на 1,2 °C.

На других станциях также были зафиксированы изменения:

- в посёлке Баренцбург — 0,9 °C за 10 лет;
- в посёлке Индига — 0,6 °C за 10 лет;
- на станции Малые Кармакуры — 0,7 °C за 10 лет;
- в городе Мурманске — 0,4 °C за 10 лет.

Эти данные подтверждают, что регион Баренцева моря испытывает общее повышение температуры, что согласуется с глобальными климатическими изменениями.

В ходе исследования особое внимание было уделено аномальным годам 1998 и 2016, когда были зафиксированы значительные отклонения от средних значений.

В 1998 году на всех метеорологических станциях были зарегистрированы среднегодовые температуры, которые оказались на 5–6 градусов ниже среднего значения за длительный период. В этот период площадь ледяного покрова значительно увеличилась и достигла своего максимума — 580 тысяч квадратных километров.

В 2016 году ситуация изменилась: среднегодовые температуры на всех станциях превысили среднее значение за длительный период на 3–4 градуса. Это привело к рекордному сокращению площади ледяного покрова за весь исследуемый период — до 117 тысяч квадратных километров.

3.4. Расчет СГДМ

В ходе анализа данных о среднегодовых температурах воздуха, полученных с различных метеорологических станций, были выявлены уникальные годы, характеризующиеся экстремальными температурными значениями. В частности, были определены периоды с наиболее высокими и наиболее низкими среднегодовыми температурами. Это позволило выдвинуть предварительные гипотезы о степени суровости зимних сезонов в эти годы.

Для подтверждения этих предположений и объективной оценки суровости зим был применён метод расчёта суммы градусо-дней мороза (СГДМ) для каждой из рассматриваемых станций. Этот показатель, основанный на среднесуточных значениях температуры воздуха, использовался для классификации зимних периодов на три категории: суровая, умеренная и мягкая зима.

На основе рассчитанных значений СГДМ был проведен кластерный анализ, охватывающий все исследуемые метеостанции.

Таблица 3.3. СГДМ на исследуемых станциях в период с 1979 по 2024 гг.

Год \ Станции	п. Баренцбург	п. Индига	им. Э.Т. Кренкеля	Малые Кармакуры	Мурманск
1979-1980	-3011,1	-2421,7	-5289,0	-3211,0	-1538,0
1980-1981	-2872,6	-2121,0	-5122,6	-2586,7	-1687,0
1981-1982	-2872,2	-1746,5	-5068,4	-2339,9	-1693,1
1982-1983	-2632,2	-2103,3	-5303,9	-2818,4	-1169,7
1983-1984	-2674,9	-1808,2	-4860,5	-2400,1	-1407,8
1984-1985	-1582	-1719,3	-3765,9	-1773,5	-1135,3
1985-1986	-1835	-2900,7	-4371,4	-2715,8	-2021,8
1986-1987	-2665,6	-2023,5	-5019,7	-2419,4	-1478,7
1987-1988	-1611,7	-2637,2	-5472,1	-2777,8	-1721,9
1988-1989	-2866,6	-1994,0	-5670,6	-2427,5	-1541,9
1989-1990	-2132,9	-1716,7	-5231,7	-2044,9	-910,2
1990-1991	-1952,6	-1769,6	-4542,9	-2581,0	-1049,2
1991-1992	-1299,4	-1915,1	-4750,4	-2268,8	-1169,4
1992-1993	-2236,5	-2204,8	-5039,2	-2009,4	-1067,3
1993-1994	-2641,1	-1715,5	-3315,0	-2052,1	-1098,8
1994-1995	-2403,7	-1231,3	-1490,7	-2644,4	-1101,7
1995-1996	-2604,6	-1431,9	-4476,0	-1887,4	-1220,0
1996-1997	-2139,6	-1413,0	-4631,2	-1720,0	-1034,4
1997-1998	-2464,9	-2258,2	-4844,5	-2622,6	-1368,3
1998-1999	-2605,8	-1060,9	-3807,2	-3347,4	-1835,1
1999-2000	-1873	-2485,2	-755,7	-2706,0	-1502,7
2000-2001	-1895,4	-1839,9	-3970,8	-2162,8	-1009,3
2001-2002	-2165,6	-2332,1	-2835,3	-2372,8	-1397,4
2002-2003	-2118,6	-1505,1	0,0	-2560,1	-1483,9
2003-2004	-2637	-1747,3	0,0	-2567,9	-1127,8
2004-2005	-2144,6	-1951,1	-1037,3	-2309,5	-1109,7
2005-2006	-1778,9	-1665,9	-3845,5	-1734,7	-1032,4
2006-2007	-1439,2	-2018,4	-3432,4	-2057,5	-1165,9
2007-2008	-1613	-1332,8	-3561,7	-1566,5	-1009,9
2008-2009	-1878,4	-1508,2	-3941,5	-1534,8	-891,5
2009-2010	-1890,3	-2136,2	-3687,2	-2196,8	-1184,4
2010-2011	-1973,9	-2066,0	-2412,6	-1560,1	-1494,4
2011-2012	-1896,1	-1455,3	-3126,8	-1328,5	-1057,4
2012-2013	-1298	-1827,9	-2249,2	-1235,6	-1270,6
2013-2014	-1895,7	-1741,0	-3801,1	-2094,1	-1084,7
2014-2015	-1408,3	-1732,1	-3599,8	-2030,9	-1055,6
2015-2016	-1503,4	-1504,0	-3229,4	-1606,7	-857,9
2016-2017	-956,4	-1662,8	-2204,4	-1360,4	-1050,0
2017-2018	-1581	-1313,1	-3362,3	-1389,0	-1046,2
2018-2019	-1391,3	-1512,6	-3325,9	-1660,7	-1096,6
2019-2020	-1804,8	-1568,5	-3753,3	-1737,7	-1217,4
2020-2021	-2024,6	-1173,2	-3213,9	-1421,4	-842,6
2021-2022	-1627,2	-2347,8	-3670,2	-2256,3	-1372,7
2022-2023	-1701,4	-1400,0	-2110,1	-1240,1	-936,2
2023-2024	-1453,6	-608,0	-718,7	-206,8	-1181,5
2024-2025	-1357,9	-609,9	-609,9	-122,8	-829,6

3.5. Кластерный анализ

На основе данных о климатических условиях в Баренцевом море был проведён детальный анализ, в результате которого были выделены три категории зимних периодов: суровые, умеренные и мягкие.

Исследование было проведено с использованием информации, полученной с пяти метеорологических станций, расположенных в различных частях Баренцева моря: в посёлке Баренцбург, Индига, на станции имени Э. Т. Кренкеля, в Малых Кармакурах и в городе Мурманск.

Для анализа был использован метод k-средних, широко применяемый для классификации многомерных данных. Этот метод позволяет разделить объекты на заранее определённое количество групп (в данном случае — три), минимизируя разброс значений внутри каждой группы.

Для наглядного представления результатов был использован метод построения дендрограмм, позволяющий наглядно представить сходство и различия между показателями суровости зим. Все расчеты и визуализация данных были выполнены с использованием специализированного программного обеспечения PAST4.

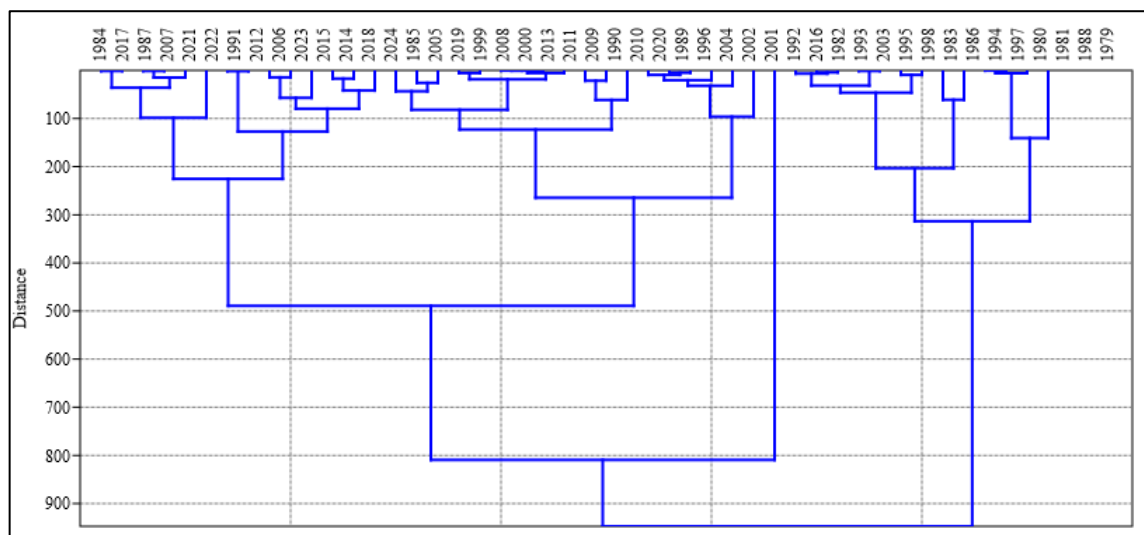


Рисунок 3.13. – Дендрограмма для станции п. Баренцбург

Таблица 3.1. СГДМ по степени суровости на станции п. Баренцбург

Суровая		Умеренная		Мягкая	
Год	СГДМ	Год	СГДМ	Год	СГДМ
1979	-3011,1	1985	-1835	1984	-1582
1980	-2872,6	1989	-2132,9	1987	-1611,7
1981	-2872,2	1990	-1952,6	1991	-1299,4
1982	-2632,2	1992	-2236,5	2006	-1439,2
1983	-2674,9	1996	-2139,6	2007	-1613
1986	-2665,6	1999	-1873	2012	-1298
1988	-2866,6	2000	-1895,4	2014	-1408,3
1993	-2641,1	2001	-2165,6	2015	-1503,4
1994	-2403,7	2002	-2118,6	2016	-956,4
1995	-2604,6	2004	-2144,6	2017	-1581
1997	-2464,9	2005	-1778,9	2018	-1391,3
1998	-2605,8	2008	-1878,4	2021	-1627,2
2003	-2637	2009	-1890,3	2022	-1701,4
		2010	-1973,9	2023	-1453,6
		2011	-1896,1	2024	-1357,9
		2013	-1895,7		
		2019	-1804,8		
		2020	-2024,6		

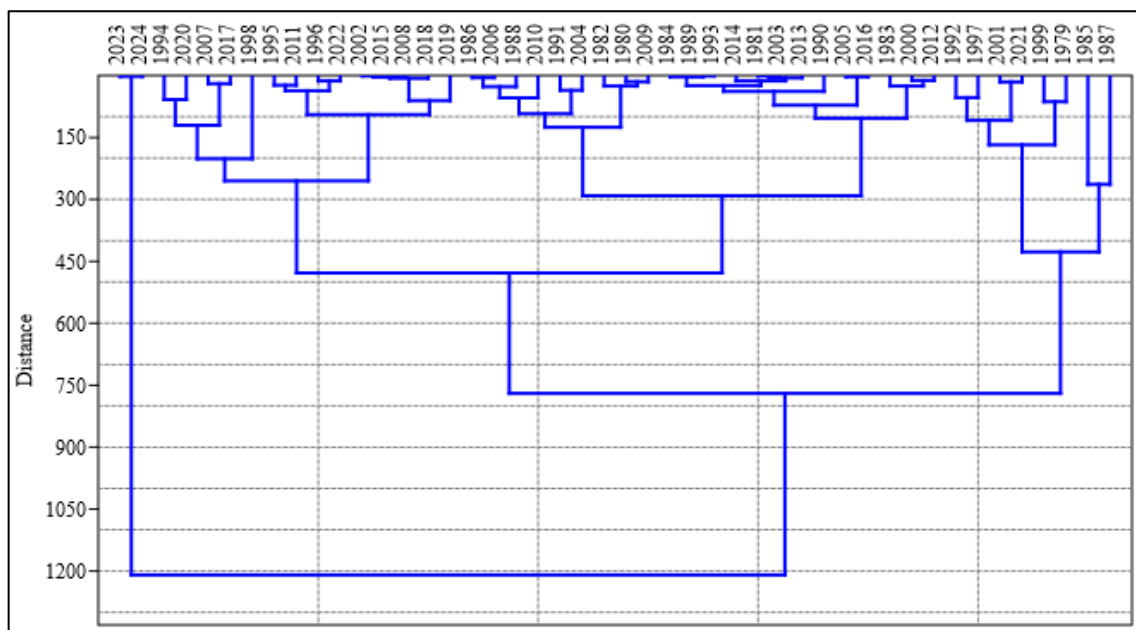


Рисунок 3.14. - Дендрограмма для станции п. Индига

Таблица 3.2. СГДМ по степени суровости на станции п. Индига

Суровая		Умеренная		Мягкая	
Год	СГДМ	Год	СГДМ	Год	СГДМ
1979	-2421,7	1981	-1746,5	1994	-1231,3
1980	-2121	1983	-1808,2	1998	-1060,9
1982	-2103,3	1984	-1719,3	2020	-1173,2
1985	-2900,7	1989	-1716,7	2023	-608
1986	-2023,5	1990	-1769,6	2024	-609,9
1987	-2637,2	1991	-1915,1		
1988	-1994	1993	-1715,5		
1992	-2204,8	1995	-1431,9		
1997	-2258,2	1996	-1413		
1999	-2485,2	2000	-1839,9		
2001	-2332,1	2002	-1505,1		
2004	-1951,1	2003	-1747,3		
2006	-2018,4	2005	-1665,9		
2009	-2136,2	2007	-1332,8		
2010	-2066	2008	-1508,2		
2021	-2347,8	2011	-1455,3		
		2012	-1827,9		
		2013	-1741		
		2014	-1732,1		
		2015	-1504		
		2016	-1662,8		
		2017	-1313,1		
		2018	-1512,6		
		2019	-1568,5		
		2022	-1400		

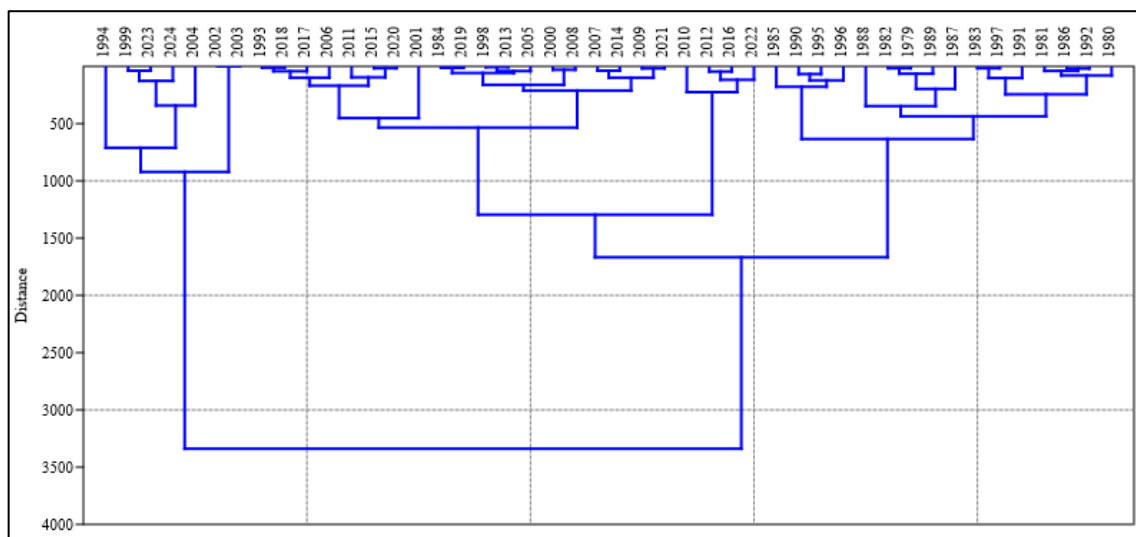


Рисунок 3.15. - Дендрограмма для станции им. Э.Т. Кренкеля

Таблица 3.3. СГДМ по степени суровости на станции им. Э.Т. Кренкеля

Суровая		Умеренная		Мягкая	
Год	СГДМ	Год	СГДМ	Год	СГДМ
1979	-5289	1984	-3765,9	1994	-1490,7
1980	-5122,6	1993	-3315	1999	-755,7
1981	-5068,4	2000	-3970,8	2004	-1037,3
1982	-5303,9	2001	-2835,3	2012	-2249,2
1983	-4860,5	2005	-3845,5	2016	-2204,4
1985	-4371,4	2006	-3432,4	2022	-2110,1
1986	-5019,7	2007	-3561,7	2023	-718,7
1987	-5472,1	2008	-3941,5	2024	-609,9
1988	-5670,6	2009	-3687,2		
1989	-5231,7	2010	-2412,6		
1990	-4542,9	2011	-3126,8		
1991	-4750,4	2013	-3801,1		
1992	-5039,2	2014	-3599,8		
1995	-4476	2015	-3229,4		
1996	-4631,2	2017	-3362,3		
1997	-4844,5	2018	-3325,9		
1998	-3807,2	2019	-3753,3		
		2020	-3213,9		
		2021	-3670,2		

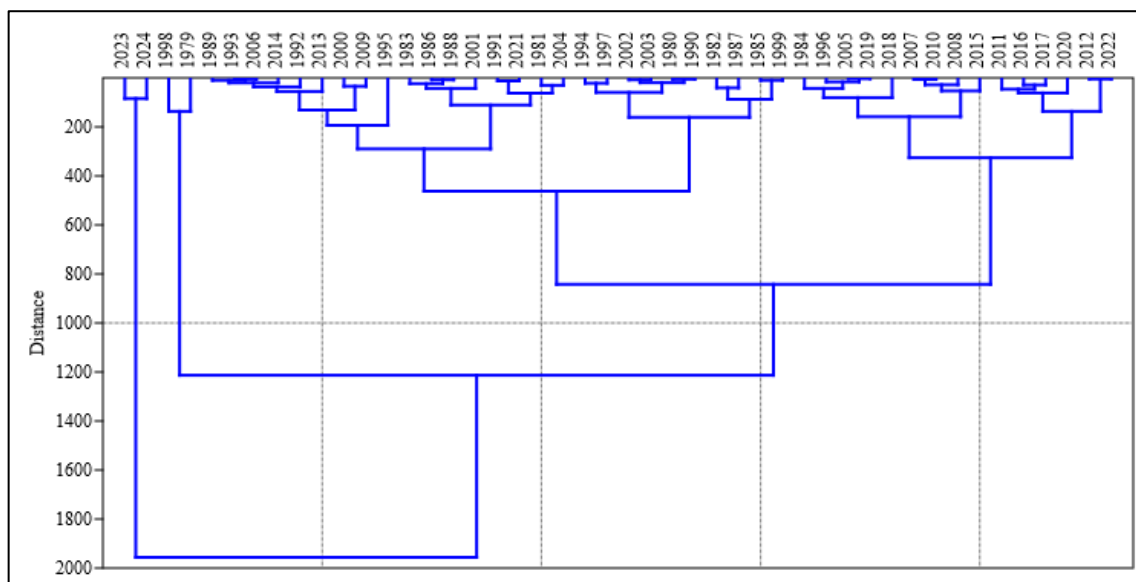


Рисунок 3.16. - Дендрограмма для станции Малые Кармакуры

Таблица 3.4. СГДМ по степени суровости на станции Малые Кармакуры

Суровая		Умеренная		Мягкая	
Год	СГДМ	Год	СГДМ	Год	СГДМ
1979	-3211	1981	-2339,9	1984	-1773,5
1980	-2586,7	1983	-2400,1	1996	-1720
1982	-2818,4	1986	-2419,4	2005	-1734,7
1985	-2715,8	1988	-2427,5	2007	-1566,5
1987	-2777,8	1989	-2044,9	2008	-1534,8
1990	-2581	1991	-2268,8	2010	-1560,1
1994	-2644,4	1992	-2009,4	2011	-1328,5
1997	-2622,6	1993	-2052,1	2012	-1235,6
1998	-3347,4	1995	-1887,4	2015	-1606,7
1999	-2706	2000	-2162,8	2016	-1360,4
2002	-2560,1	2001	-2372,8	2017	-1389
2003	-2567,9	2004	-2309,5	2018	-1660,7
		2006	-2057,5	2019	-1737,7
		2009	-2196,8	2020	-1421,4
		2013	-2094,1	2022	-1240,1
		2014	-2030,9	2023	-206,8
		2021	-2256,3	2024	-122,8

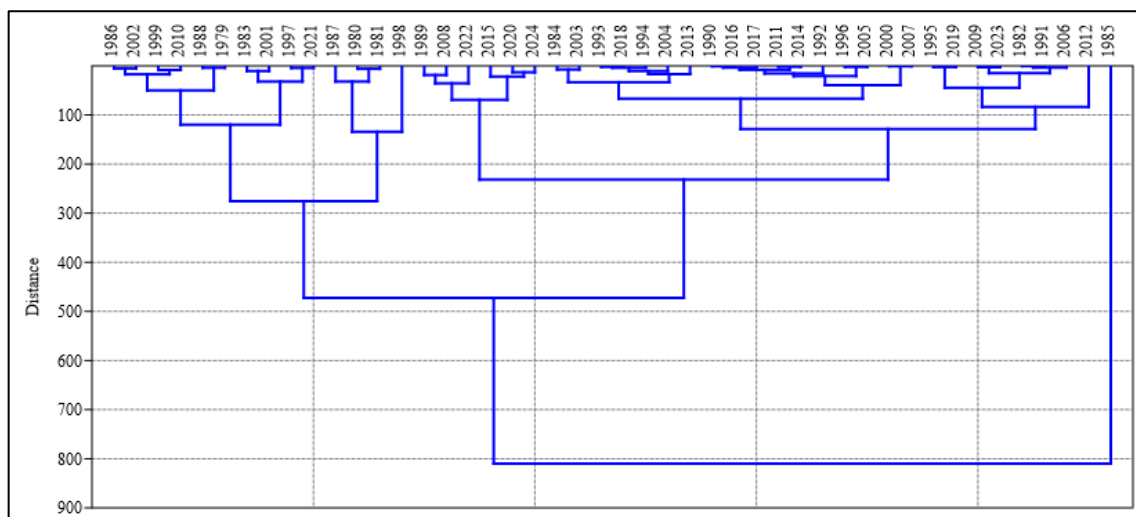


Рисунок 3.17. - Дендрограмма для станции Мурманск

Таблица 3.5. СГДМ по степени суровости на станции Мурманск

Суровая		Умеренная		Мягкая	
Год	СГДМ	Год	СГДМ	Год	СГДМ
1979	-1538	1982	-1169,7	1984	-1135,3
1980	-1687	1983	-1407,8	1989	-910,2
1981	-1693,1	1991	-1169,4	1990	-1049,2
1985	-2021,8	1995	-1220	1992	-1067,3
1986	-1478,7	1997	-1368,3	1993	-1098,8
1987	-1721,9	2001	-1397,4	1994	-1101,7
1988	-1541,9	2006	-1165,9	1996	-1034,4
1998	-1835,1	2009	-1184,4	2000	-1009,3
1999	-1502,7	2012	-1270,6	2003	-1127,8
2002	-1483,9	2019	-1217,4	2004	-1109,7
2010	-1494,4	2021	-1372,7	2005	-1032,4
		2023	-1181,5	2007	-1009,9
				2008	-891,5
				2011	-1057,4
				2013	-1084,7
				2014	-1055,6
				2015	-857,9
				2016	-1050
				2017	-1046,2
				2018	-1096,6
				2020	-842,6
				2022	-936,2

Таблица 3.6. Степени суровости на каждый год на исследуемых станциях

Год \ Станции	п. Баренцбург	п. Индига	им. Э.Т. Кренкеля	Малые Кармакуры	Мурманск
1979-1980	сур	сур	сур	сур	сур
1980-1981	сур	сур	сур	сур	сур
1981-1982	сур	ум	сур	ум	сур
1982-1983	сур	сур	сур	сур	ум
1983-1984	сур	ум	сур	ум	ум
1984-1985	мяг	ум	ум	мяг	мяг
1985-1986	ум	сур	сур	сур	сур
1986-1987	сур	сур	сур	ум	сур
1987-1988	мяг	сур	сур	сур	сур
1988-1989	сур	сур	сур	ум	сур
1989-1990	ум	ум	сур	ум	мяг
1990-1991	ум	ум	сур	сур	мяг
1991-1992	мяг	ум	сур	ум	ум
1992-1993	ум	сур	сур	ум	мяг
1993-1994	сур	ум	ум	ум	мяг
1994-1995	сур	мяг	мяг	сур	мяг
1995-1996	сур	ум	сур	ум	ум
1996-1997	ум	ум	сур	мяг	мяг
1997-1998	сур	сур	сур	сур	ум
1998-1999	сур	мяг	сур	сур	сур
1999-2000	ум	сур	мяг	сур	сур
2000-2001	ум	ум	ум	ум	мяг
2001-2002	ум	сур	ум	ум	ум
2002-2003	ум	ум	мяг	сур	сур
2003-2004	сур	ум	мяг	сур	мяг
2004-2005	ум	сур	мяг	ум	мяг
2005-2006	ум	ум	ум	мяг	мяг
2006-2007	мяг	сур	ум	ум	ум
2007-2008	мяг	ум	ум	мяг	мяг
2008-2009	ум	ум	ум	мяг	мяг
2009-2010	ум	сур	ум	ум	ум
2010-2011	ум	сур	ум	мяг	сур
2011-2012	ум	ум	ум	мяг	мяг
2012-2013	мяг	ум	мяг	мяг	ум
2013-2014	ум	ум	ум	ум	мяг
2014-2015	мяг	ум	ум	ум	мяг
2015-2016	мяг	ум	ум	мяг	мяг
2016-2017	мяг	ум	мяг	мяг	мяг
2017-2018	мяг	ум	ум	мяг	мяг
2018-2019	мяг	ум	ум	мяг	мяг
2019-2020	ум	ум	ум	мяг	ум
2020-2021	ум	мяг	ум	мяг	мяг
2021-2022	мяг	сур	ум	ум	ум
2022-2023	мяг	ум	мяг	мяг	мяг
2023-2024	мяг	мяг	мяг	мяг	ум
2024-2025	мяг	мяг	мяг	мяг	мяг

В результате кластерного анализа данных, полученных с помощью СГДМ, была составлена таблица, отражающая степень суровости зим в каждый исследуемый год на всех пяти метеорологических станциях.

Анализ позволил выделить три группы зим: суровые, умеренные и мягкие. Для дальнейшего исследования были выбраны три года, в которые степень суровости зим была наиболее типичной и совпадала на большинстве станций. Это позволило сделать данные сопоставимыми и нивелировать влияние региональных различий.

В результате анализа таблицы, отражающей степень суровости зим, были выбраны следующие периоды: 1998–1999 годы (суровая зима), 2009–2010 годы (умеренная зима) и 2016–2017 годы (мягкая зима). Эти периоды были выбраны как наиболее показательные, поскольку в них наблюдалось наибольшее сходство степени суровости зим на большинстве станций.

Впоследствии была составлена таблица, содержащая информацию о характеристиках ледяного покрова. На основании этих данных был построен график, наглядно демонстрирующий среднегодовое изменение площади льда в течение трех выбранных зимних сезонов.

Таблица 3.7. Среднемесячные значения площади льда за три зимы разной суровости

Год Месяц	Суровая (1998-1999)	Умеренная (2009-2010)	Мягкая (2016-2017)
Сентябрь	50000	10000	0
Октябрь	200000	20000	10000
Ноябрь	560000	50000	20000
Декабрь	640000	250000	100000
Январь	770000	470000	300000
Февраль	960000	510000	280000
Март	990000	580000	300000
Апрель	1050000	630000	260000
Май	920000	450000	110000
Июнь	600000	150000	30000
Июль	230000	40000	0
Август	40000	20000	0

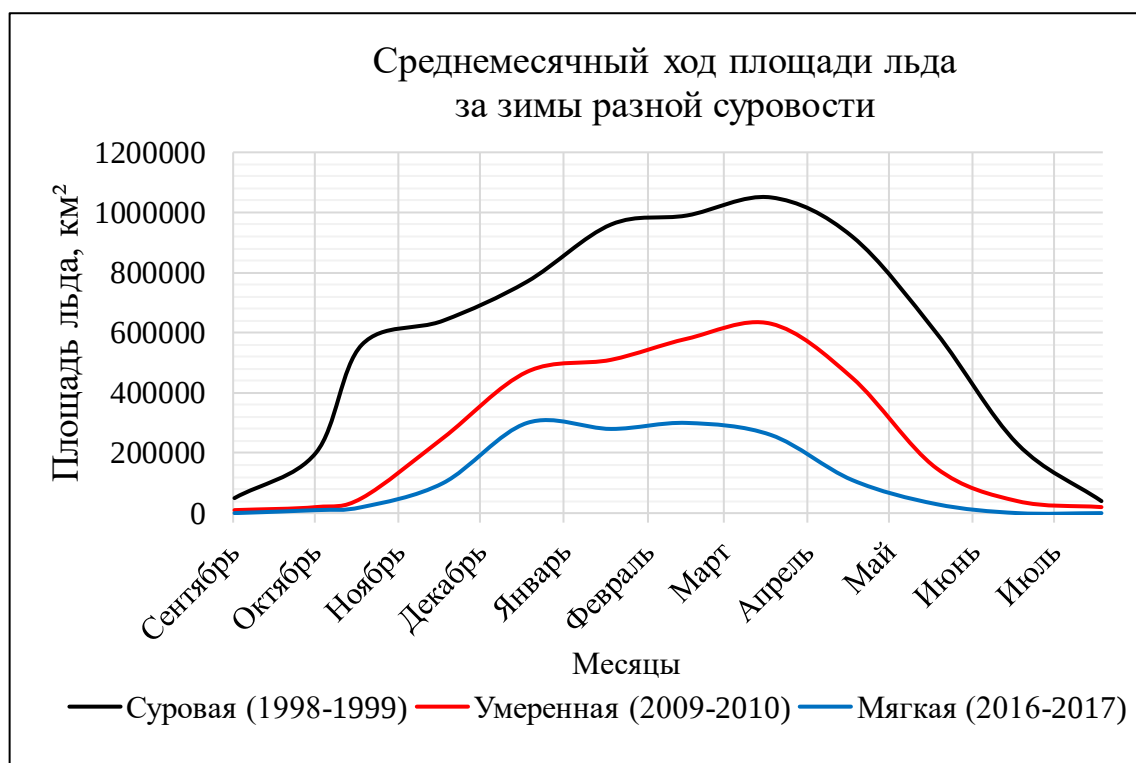


Рисунок 3.18. – График годового хода площади льда за выбранные годы

Исследование динамики изменения площади ледяного покрова позволило выявить существенные различия в процессе формирования и таяния льда в зависимости от климатических условий в зимний период.

В начале осенне-зимнего сезона в суровую зиму 1998–1999 гг. площадь ледяного покрова достигала примерно 200 тысяч квадратных километров, что указывает на раннее начало образования льда и его активное накопление.

В более мягкую зиму 2009–2010 гг. площадь льда на данном этапе была значительно меньше и составляла около 50 тысяч квадратных километров. В ещё более мягкую зиму 2016–2017 гг. площадь ледяного покрова едва превышала 20 тысяч квадратных километров, что свидетельствует о задержке в формировании льда.

В декабре, в разгар зимы, площадь льда достигает 650 тыс. км². Наибольшая площадь ледяного покрова наблюдается в апреле и составляет 1 миллион км², что говорит о быстром и интенсивном образовании льда.

В условиях умеренной зимы пик ледовитости наблюдается в апреле, при этом площадь льда составляет 630 тысяч км². В случае мягкой зимы

формирование ледового покрова происходит в январе и достигает 200 тысяч км². Это указывает на слабую выраженность ледовых процессов в такие зимы.

Процессы таяния льда зависят от суровости зимы. Во всех случаях площадь ледового покрова начинает уменьшаться в апреле. В случае суровой зимы сокращение льда происходит постепенно и продолжается до начала лета. К августу ледовый покров возвращается к своим начальным значениям, что свидетельствует о высокой устойчивости льда в такие зимы.

В период относительно тёплой зимы 2009–2010 годов таяние льда также начиналось в апреле, но происходило гораздо быстрее, чем в суровые зимы. К августу площадь льда сократилась до 20 тысяч км², что значительно меньше, чем в суровые зимы, и указывает на меньшую прочность ледового покрова в такие периоды.

В период относительно тёплой зимы 2016–2017 годов процесс таяния льда начался в апреле и достиг своего пика к концу зимы, когда площадь льда составила 260 тысяч км². Таяние льда происходило быстро: к началу июля он полностью растаял. Это указывает на низкую прочность ледяного покрова в относительно тёплые зимы и его высокую чувствительность к сезонным изменениям температуры.

3.6. Сравнение ледовых карт

Для наглядной иллюстрации различий в состоянии ледяного покрова в суровые зимы 1998–1999 годов, умеренно холодные зимы 2009–2010 годов и мягкие зимы 2016–2017 годов мы обратились к картам ледовой обстановки, предоставленным Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ). Эти карты содержат информацию о распределении и динамике ледяного покрова в указанные периоды, что позволяет провести сравнительный анализ условий в зависимости от температурных характеристик зим.

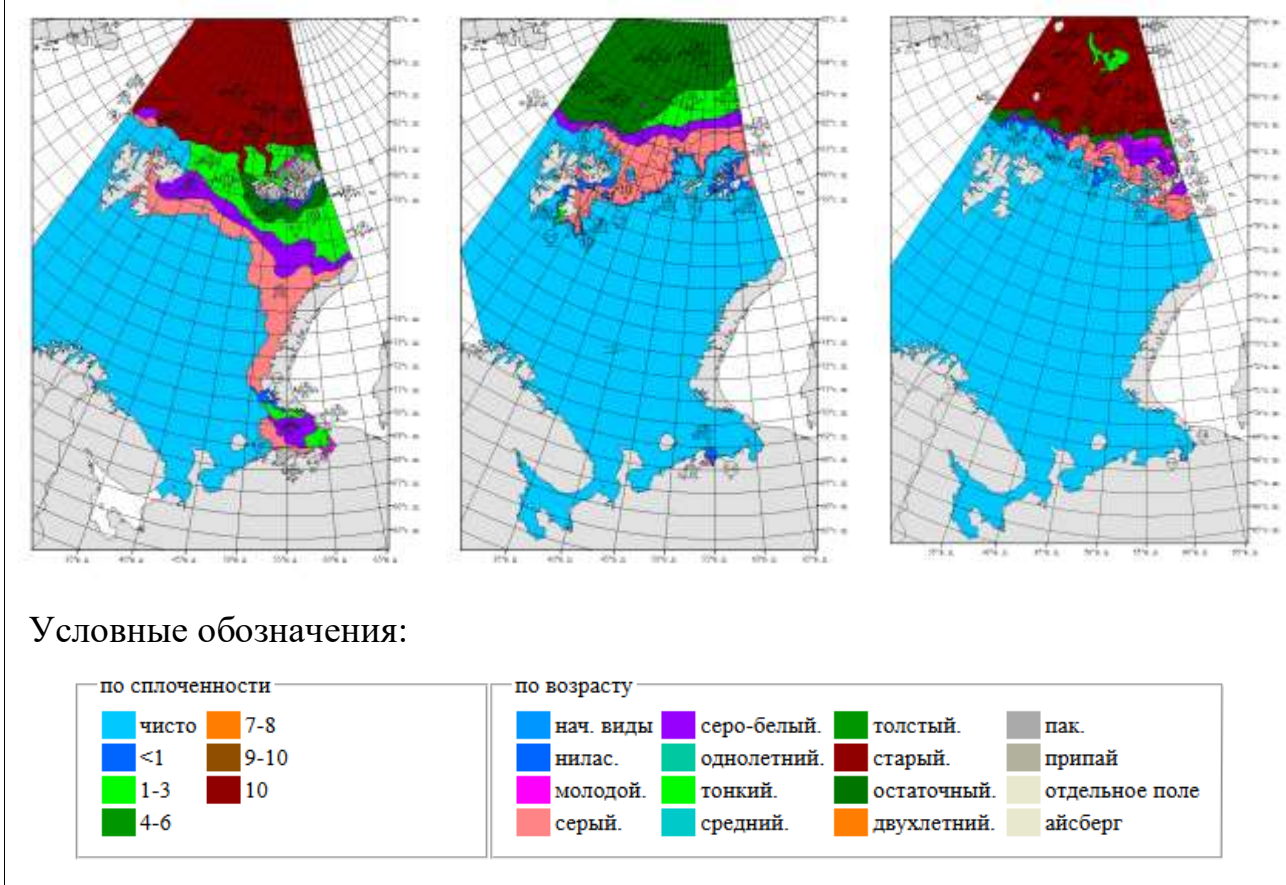


Рисунок 3.19. – Ледовые карты за ноябрь 1998г., 2009 г. и 2016 г.
соответственно

В конце осени 1998–1999 годов были получены картографические данные, которые показали значительное увеличение площади многолетнего льда в северо-восточной части Баренцева моря и его восточной половине, примыкающей к архипелагу Новая Земля. Этот лёд полностью покрыл пролив Карские Ворота.

В условиях относительно мягкой зимы лёд высокой сплочённости наблюдался только в северной части моря, при этом он не достигал архипелага Земля Франца-Иосифа. Пролив Карские Ворота оставался свободным ото льда. Более тёплая зима способствовала образованию тонкого ледового покрова только на начальных этапах.

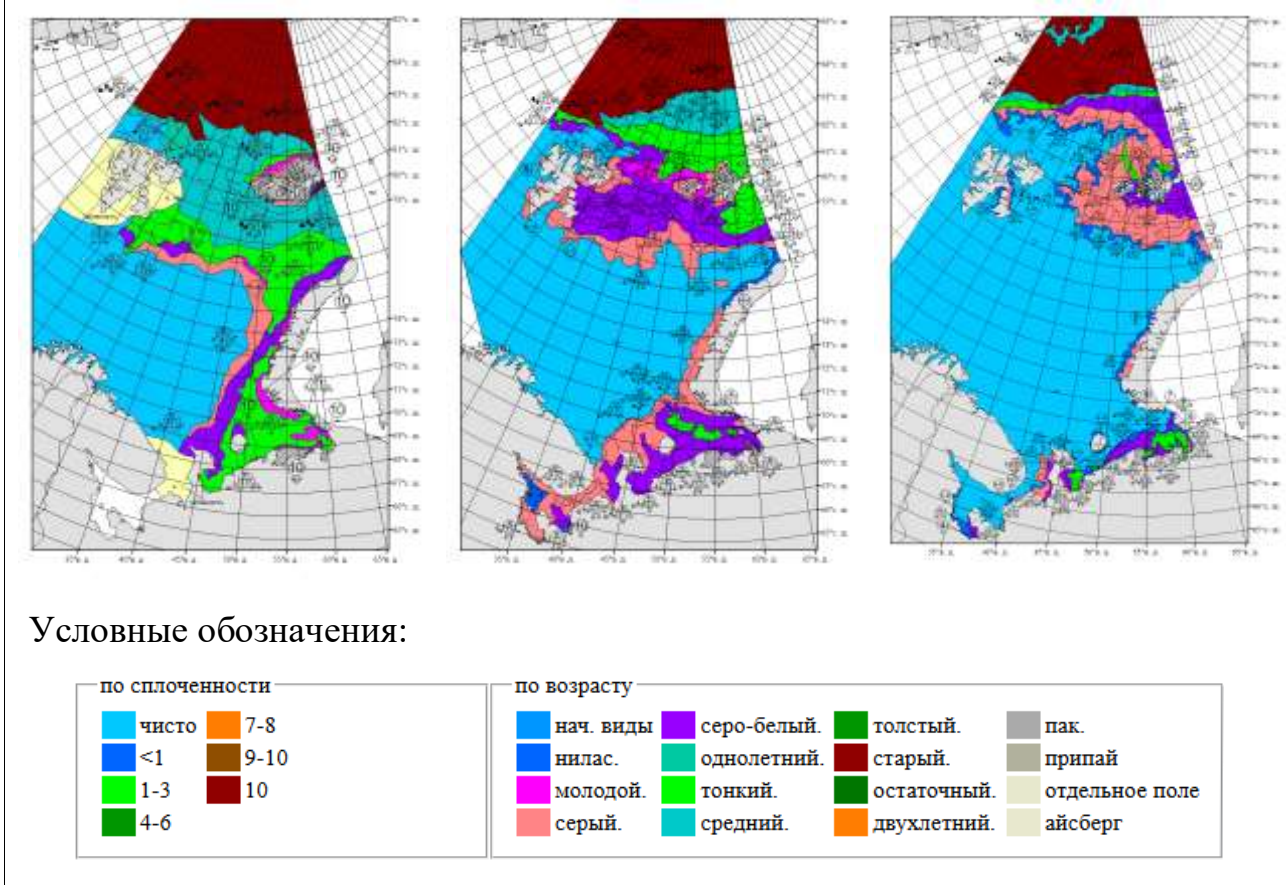


Рисунок 3.20. – Ледовые карты за январь 1999г., 2010 г. и 2017 г.

соответственно

В ходе исследования было выявлено, что в январе, когда зима вступает в свои законные права, значительная часть Баренцева моря покрывается льдом. В среднем около 75% поверхности моря сковывают ледяные оковы.

В юго-восточной и восточной частях моря, на картах, окрашенных в салатовый цвет, преобладают тонкие ледяные образования. Также встречаются светло-розовые и фиолетовые льды.

Архипелаги Новая Земля, Шпицберген и Земля Франца-Иосифа полностью покрыты льдом. В северной части моря, на картах, окрашенных в бурый цвет, преобладает многолетний лёд.

В период умеренной зимы ледовые условия претерпевают изменения. В северо-восточной и южной частях моря основным типом льда становится серо-белый (фиолетовый). Северо-западная часть архипелага Шпицберген остаётся свободной ото льда, а западное побережье Новой Земли частично покрывается серым льдом (светло-розовым).

В условиях мягких зим ледовая обстановка в акватории Баренцева моря не отличается чрезмерной напряжённостью. В северо-восточной части этого водного пространства преобладает лёд светло-розового оттенка, в то время как в северной части сохраняется многолетний лёд бурого цвета. Архипелаги Новая Земля и Шпицберген практически полностью освобождаются от ледяного покрова. Это свидетельствует о том, что состояние ледовой обстановки в значительной степени определяется погодными условиями в зимний период.

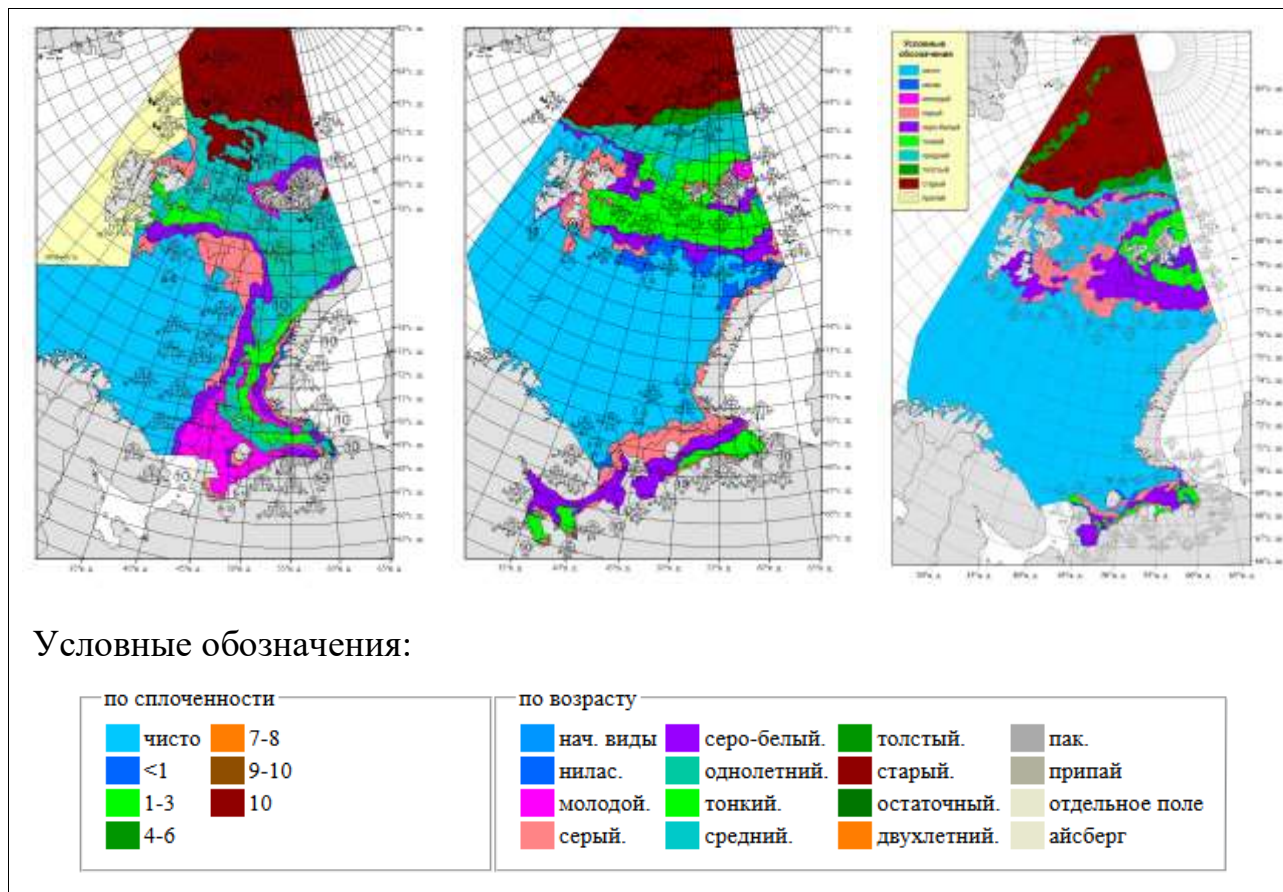


Рисунок 3.21. – Ледовые карты за февраль 1999г., 2010 г. и 2017 г.

соответственно

В феврале 1999 года Баренцево море было покрыто льдом, который занимал более 80% его поверхности. В северной части моря преобладал многолетний лёд, имевший характерный бурый оттенок. В то же время в восточной и северо-восточной частях моря было множество молодых льдов различных цветов: бирюзового, розового, салатного и светло-розового.

Архипелаги Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и западное побережье Новой Земли были полностью покрыты льдом.

В феврале 2010 года ситуация в Баренцевом море существенно изменилась. В северо-восточной части моря преобладал тонкий лёд с зеленоватым оттенком. В северной части моря, как и ранее, находился многолетний лёд бурого цвета. Архипелаг Шпицберген был окружён льдом только с восточной стороны, а акватория вокруг архипелага Новая Земля практически полностью освободилась ото льда.

В 2017 году в акватории южной части моря и на побережье острова Новая Земля наблюдалось практически полное отсутствие ледяного покрова. В северной части акватории моря многолетние льды всё ещё присутствуют, однако их площадь сократилась по сравнению с 1999 и 2010 годами.

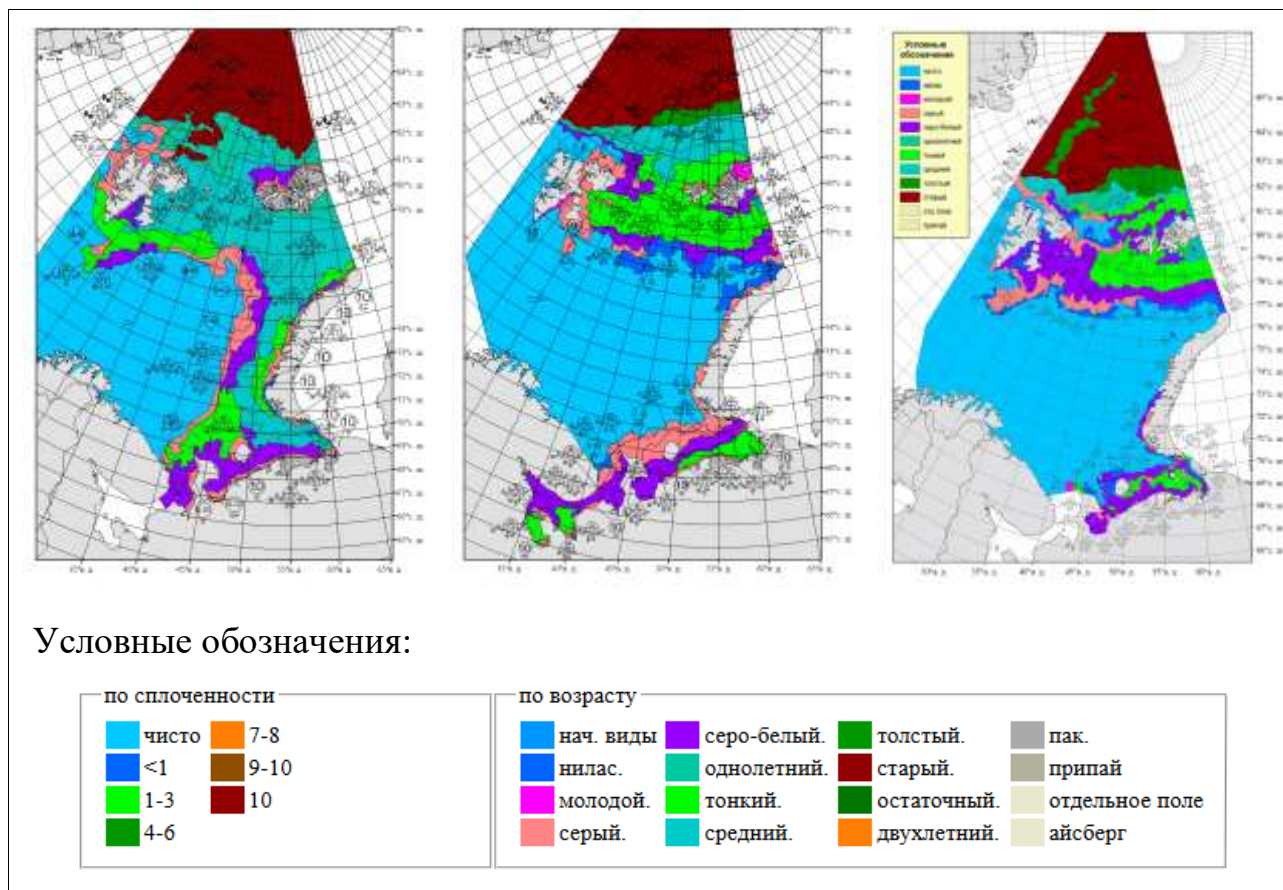


Рисунок 3.22. – Ледовые карты за март 1999г., 2010 г. и 2017 г.

соответственно

В марте 1999 года, в период суровой зимы, большая часть акватории Баренцева моря была покрыта льдом. В северной части преобладал старый лёд, имевший бурый оттенок, а в северо-восточной, восточной и юго-восточной частях — средний лёд, который был более светлого цвета.

В 2010 году, в период умеренной зимы, ситуация с ледяным покровом практически не изменилась по сравнению с предыдущим месяцем.

В мягкую зиму 2017 года лёд, покрывавший архипелаги Шпицберген и Земля Франца-Иосифа, начал отступать в сторону Северного Ледовитого океана. Пролив Карские ворота был почти полностью очищен ото льда.

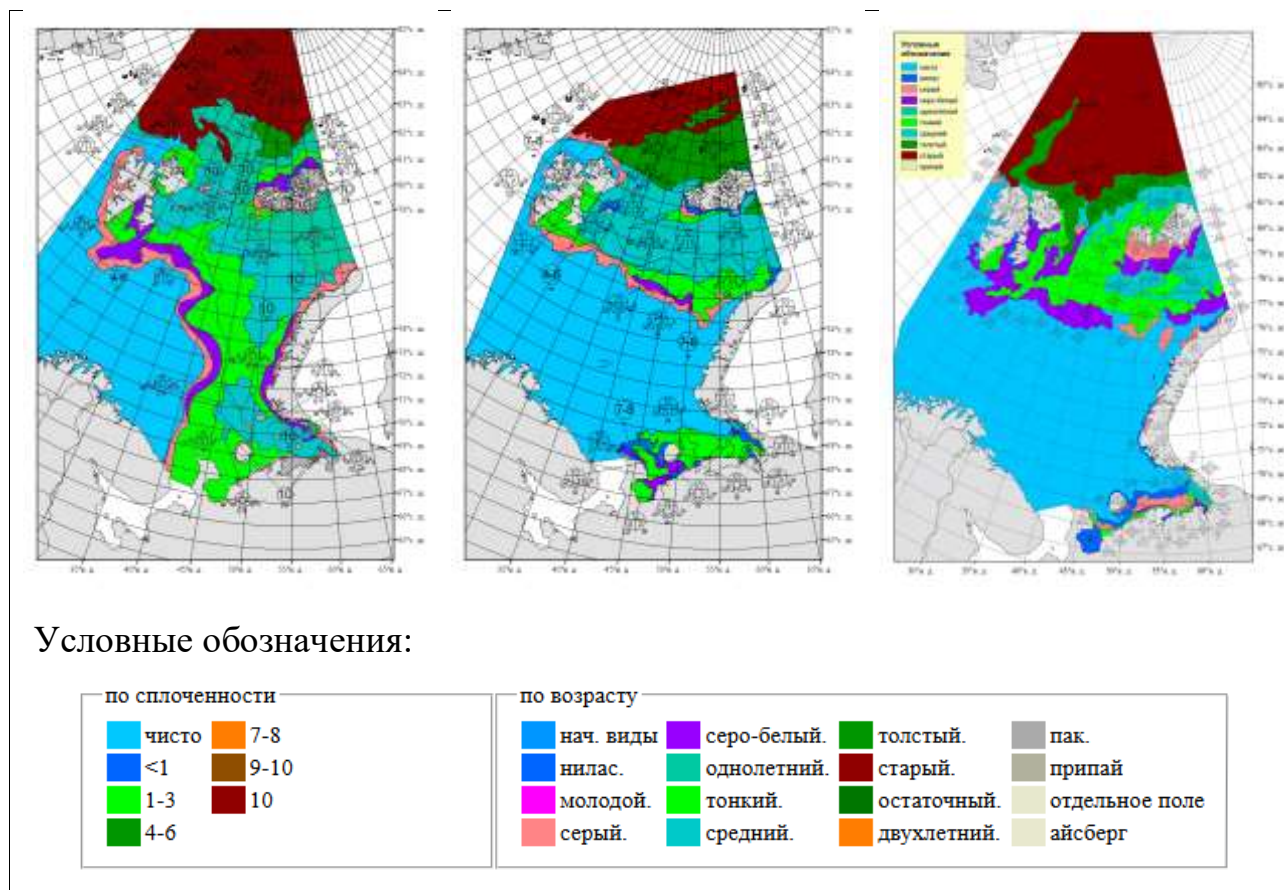


Рисунок 3.23. – Ледовые карты за апрель 1999г., 2010 г. и 2017 г.

соответственно

В суровую зиму 1999 года в северо-восточной части Баренцева моря произошли значительные изменения в состоянии ледового покрова. Лёд стал тоньше, и на картах его начали обозначать салатovým цветом.

Архипелаги Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Новая Земля были полностью покрыты преимущественно однолетним льдом. Однако начался процесс таяния льда, и акватория начала освобождаться ото льда.

В 2010 году в Баренцевом море произошло значительное сокращение ледового покрова. Южная часть моря была почти полностью свободна ото льда, за исключением южного побережья, где серо-белый лёд стал тоньше. Пролив

Карские Ворота также начал освобождаться ото льда, что свидетельствует о менее интенсивном образовании льда по сравнению с предыдущими годами.

В начале весны 2017 года в акватории Баренцева моря установилась аномально тёплая погода, вследствие чего ледовый покров приобрёл необычайную хрупкость. В то время как в северной части моря по-прежнему сохранялся многолетний лёд, покрытый характерным бурым налётом, южная часть акватории полностью освободилась от ледяного покрова.

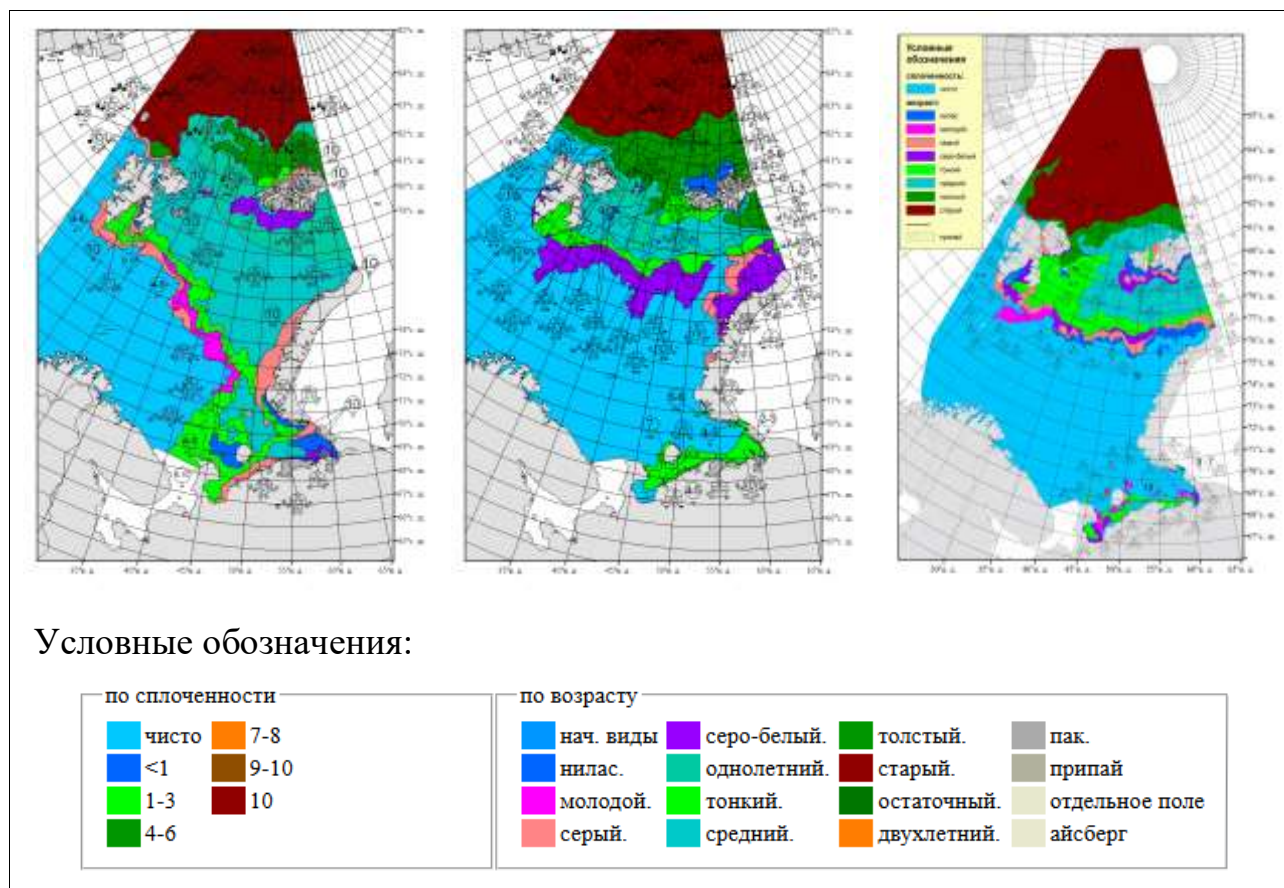


Рисунок 3.24. – Ледовые карты за май 1999г., 2010 г. и 2017 г.

соответственно

В мае 1999 года в юго-восточной части Баренцева моря наблюдалась значительная интенсификация процесса ледообразования, в результате чего сформировалось большое количество среднестатистических ледяных массивов. Характерным признаком этого льда был его бирюзовый цвет.

В южной части моря произошло заметное сокращение площади ледового покрытия, что позволило наблюдать разнообразные типы льда, включая нилас и молодой лёд.

В северной части моря началось таяние льда, который отступал в сторону Северного Ледовитого океана. Это явление характерно для весеннего периода.

В 2010 году, к маю практически вся южная часть Баренцева моря была свободна ото льда. В северной части архипелага Новая Земля появился лёд серо-белого цвета с фиолетовым оттенком, что свидетельствует о продолжающемся процессе таяния и освобождения акватории от ледяных массивов.

В мае 2017 года, когда на севере Баренцева моря царила мягкая зима, ледовая обстановка претерпела значительные изменения. В южной части моря лёд полностью растаял, за исключением небольших участков тонкого льда, которые можно было наблюдать вдоль береговой линии.

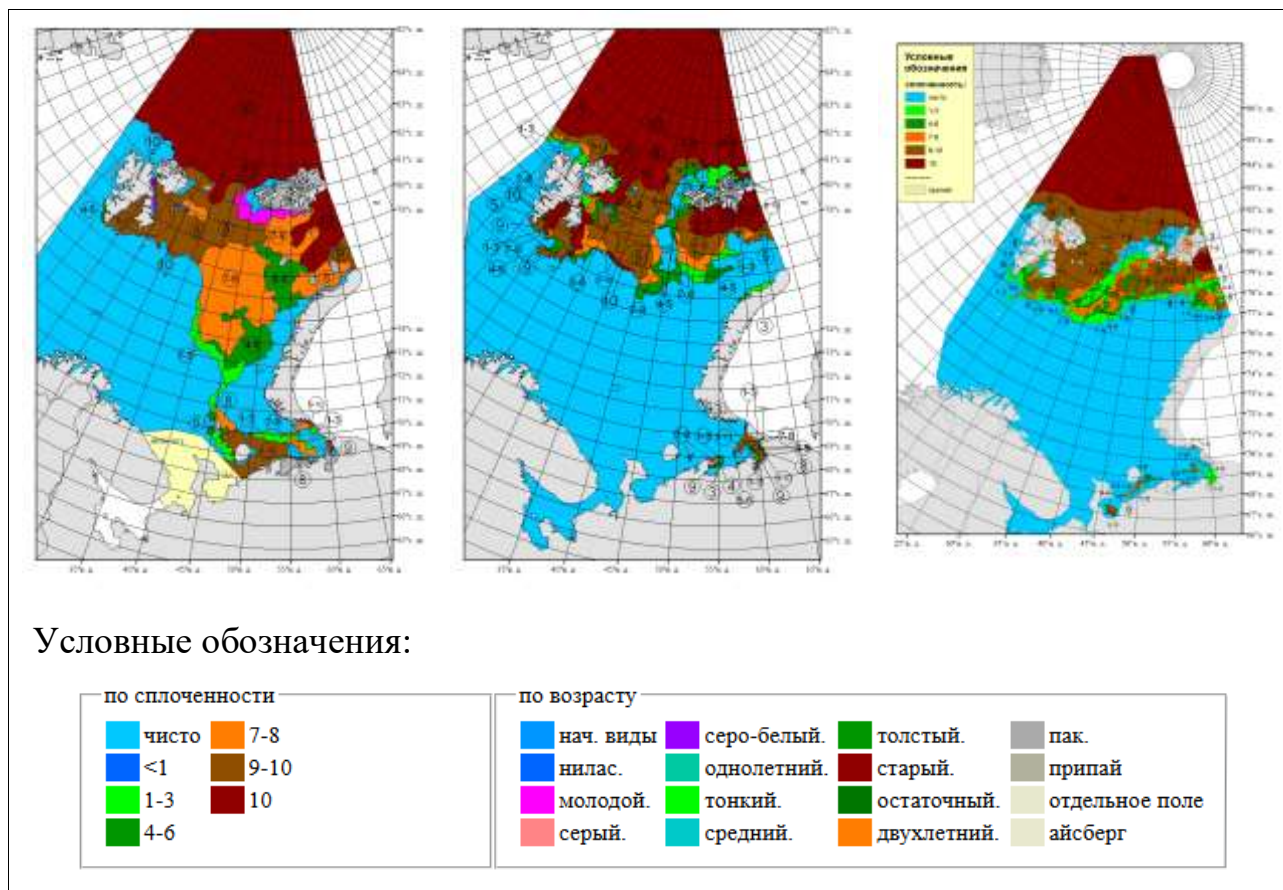


Рисунок 3.25. – Ледовые карты за июнь 1999г., 2010 г. и 2017 г.

соответственно

В июне 1999 года в акватории Баренцева моря начался стремительный процесс таяния льдов. В западной части моря, у берегов архипелагов Шпицберген и Новая Земля, были обнаружены участки открытой воды, что указывало на начало сезонного сокращения ледового покрова.

В июне 2010 года, в условиях умеренной зимы, южная часть Баренцева моря была полностью освобождена ото льда. Однако на севере ледовый покров оставался чрезвычайно плотным (9–10 баллов) и постепенно отступал в направлении Северного Ледовитого океана, что является характерным явлением для летнего сезона.

В относительно мягкую зиму 2017 года процесс таяния льда и его отступления в океан происходил с особой интенсивностью. Площадь акватории, свободной ото льда, в этом году значительно превышала показатели умеренной зимы 2010 года, что свидетельствует о продолжающемся сокращении ледового покрова в Баренцевом море.

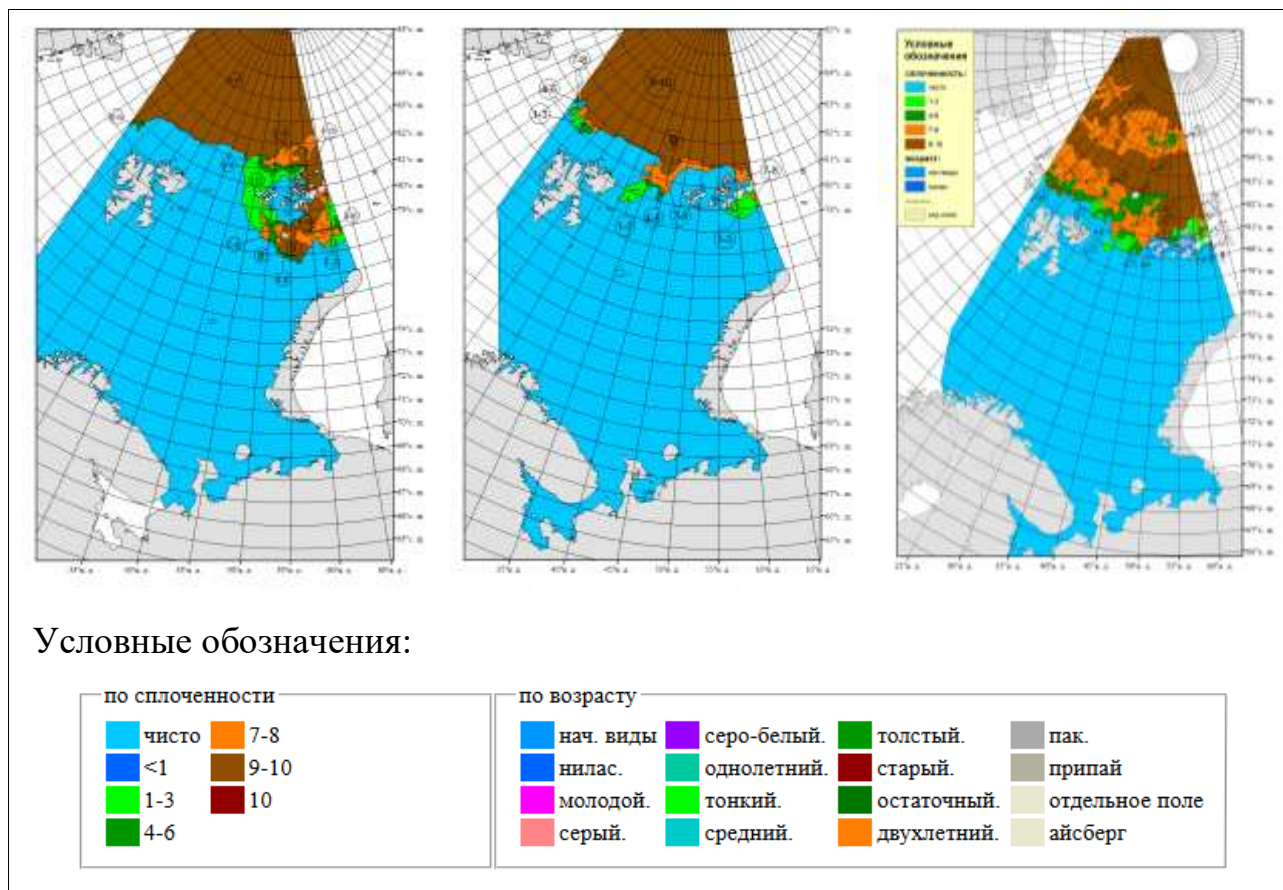


Рисунок 3.26. – Ледовые карты за сентябрь 1999г., 2010 г. и 2017 г.

соответственно

В сентябре 1999 года, когда зима выдалась особенно суровой, ледовая обстановка в Баренцевом море была особенной. Льда было мало, и он преимущественно находился в северной части моря.

Это был в основном многолетний лёд, который обычно остаётся после летнего таяния. Аналогичная ситуация наблюдалась в сентябре 2010 и 2017 годов. В эти годы лёд также был в основном в северной части моря и состоял в основном из старого льда. Однако в 2010 и 2017 годах площадь, покрытая льдом, была меньше, чем в 1999 году.

Исследование ледовой обстановки в Баренцевом море в разные зимы показало, что в зависимости от погодных условий лёд распределяется по-разному, меняются его количество и характеристики.

В суровую зиму 1998–1999 годов площадь ледяного покрова достигала 80% поверхности моря в зимние и весенние месяцы. В умеренную зиму 2009–2010 годов площадь льда сократилась, особенно в южных и западных частях Баренцева моря. В мягкую зиму 2016–2017 годов ледовый покров был минимальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования был проведен детальный анализ изменений, происходящих в ледяном покрове Баренцева моря в условиях современного климатического кризиса, который особенно ярко проявляется в Арктическом регионе.

Для проведения исследования использовался обширный массив данных, охватывающий период с 1979 по 2024 год. Эти данные были получены из авторитетных источников, таких как Национальное управление океанических и атмосферных исследований (NOAA) и Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ), а также на основе метеорологических наблюдений, проводимых на пяти ключевых станциях, расположенных в акватории Баренцева моря.

В рамках работы использовались современные статистические методы, такие как анализ временных рядов, кластерный анализ и расчет суммы градусо-дней мороза (СГДМ). Это позволило не только выявить количественные изменения в ледовом покрове, но и установить их связь с температурными аномалиями.

Основные результаты исследования:

1. Анализ динамики ледовитости Баренцева моря.

В ходе исследования были проанализированы среднемесячные значения площади льда в Баренцевом море. Результаты анализа показали тенденцию к уменьшению ледовитости во все сезоны года. Особенно заметное сокращение ледового покрова наблюдается весной и летом.

В марте площадь льда уменьшалась со скоростью 12 тысяч квадратных километров в год, а в мае — со скоростью 11 тысяч квадратных километров в год. Это указывает на ускорение процесса таяния льда в переходные периоды.

В летние месяцы (июнь–август) площадь ледяного покрова сократилась в 3,5 раза по сравнению с 1980-ми годами. В некоторые годы, например, в 2016 и 2020, акватория практически полностью освобождалась ото льда.

В зимние месяцы (декабрь–февраль) также наблюдается тенденция к уменьшению площади ледяного покрова. Так, за последние годы площадь льда сократилась на 11,7 тысяч квадратных километров в год.

В 1982 году площадь ледяного покрова достигала максимального значения — 616 тысяч квадратных километров. В 2016 году, напротив, был зафиксирован рекордно низкий показатель — всего 117 тысяч квадратных километров. С 2014 года площадь льда стабилизировалась на уровне примерно 230 тысяч квадратных километров. Однако общая тенденция к сокращению ледяного покрова сохраняется.

За последнее десятилетие среднегодовая температура воздуха в регионе увеличилась на 0,6–1,2 °С. Особенно заметное повышение температуры было зафиксировано на станции имени Э.Т. Кренкеля. Были выявлены аномальные годы:

- 1998 год — рекордно низкие температуры, на 5–6 °С ниже нормы, привели к максимальной ледовитости, которая достигла 580 тысяч квадратных километров.
- 2016 год — аномально высокие температуры, на 3–4 °С выше нормы, стали причиной рекордного сокращения площади льда, которая составила всего 117 тысяч квадратных километров.

Анализ суммарного градиента давления воздуха (СГДМ) позволил установить чёткую корреляцию между суровостью зим и площадью ледяного покрова.

В результате кластерного анализа были выделены три категории зим:

1. Суровые зимы характеризовались среднесуточной температурой воздуха (СГДМ) свыше 2500 °С·сут., что приводило к образованию обширных ледяных полей площадью до 1 миллиона квадратных километров. Примером такой зимы может служить период 1998–1999 годов.

2. Умеренные зимы характеризовались среднесуточной температурой воздуха (СГДМ) в диапазоне от 1500 до 2500 °С и сопровождались

формированием ледяного покрова площадью около 600 тысяч квадратных километров, как это было в 2009–2010 годах.

3. Мягкие зимы характеризуются СГДМ ниже 1500 °С и привели к образованию льда площадью менее 200 тысяч квадратных километров, как в 2016–2017 годах.

Анализ ледовых карт за разные годы позволил сделать вывод, что в суровые зимы многолетний лёд покрывал большую часть северной и восточной акваторий моря, достигая архипелагов Новая Земля и Земля Франца-Иосифа. Пролив Карские Ворота полностью перекрыт ледяными полями.

Результаты исследований имеют важное значение для различных отраслей, таких как навигация, добыча полезных ископаемых и рыболовство. Они также способствуют разработке стратегий адаптации к изменениям климата и сохранению экосистем Арктики.

Полученные данные имеют существенное значение для обеспечения безопасности и повышения эффективности морских перевозок в Арктическом регионе, а также для развития рыболовства и других отраслей морской деятельности.

Исследование Баренцева моря показало нелинейную реакцию климата на изменения. После 2014 года темпы таяния льда замедлились, что требует корректировки прогнозных моделей.

Результаты исследования имеют практическое значение для различных отраслей:

- Судоходство: таяние льда открывает новые возможности для навигации по Северному морскому пути, но также увеличивает риски, связанные с дрейфом айсбергов.
- Добыча углеводородов в таких месторождениях, как Штокмановское и Лудловское, требует учёта изменчивости ледовых нагрузок на платформы.

Исследование показывает, что Баренцево море является ярким индикатором глобальных климатических изменений и находится в эпицентре

происходящих перемен. Обнаруженные закономерности подчёркивают важность международного сотрудничества в разработке эффективных мер по адаптации к новым условиям Арктики.

Данное исследование представляет собой значимый вклад в область полярной климатологии и открывает новые возможности для проведения междисциплинарных исследований, охватывающих океанологию, гляциологию и экономику.

Список литературы

1. Алексеев Г.В. Потепление Арктики и его последствия. - СПб.: Наука, 2020. - 254 с.
2. Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Кузмина С.И. Тренды сокращения ледового покрова Арктики в XXI веке // Метеорология и гидрология. - 2022. - № 5. - С. 45-56.
3. Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ) [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.aari.ru> (дата обращения: 10.05.2024).
4. Белова Е.В., Дворников Ю.А. Влияние климатических изменений на ледовые условия Карского моря // Лед и Снег. - 2021. - Т. 61, № 2. - С. 223-234.
5. Беляев К.П., Соколов В.Т. Современные изменения ледовитости Арктики // Труды Международной конференции "Арктика-2023". - Мурманск, 2023. - С. 112-120.
6. Богданов Н.А. Динамика ледяного покрова в морях Российской Арктики. - М.: Наука, 2019. - 198 с.
7. Васильев А.С. Современные изменения климата и их влияние на морские экосистемы Арктики. - СПб.: Гидрометеиздат, 2021. - 176 с.
8. Гаврилов А.В., Прямиков С.Г. Современные изменения ледовитости морей Восточной Арктики // Океанология. - 2020. - Т. 60, № 4. - С. 567-578.
9. Гусев А.В. Моделирование климатических изменений в Арктике. - М.: ИГКЭ, 2018. - 210 с.
10. Добролюбов С.А., Аржанов М.М. Климат и ледовитость Арктики в XXI веке. - М.: ГЕОС, 2019. - 312 с.
11. Дмитриев А.А., Фролов И.Е. Моделирование динамики льдов в условиях потепления Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. - 2019. - № 3. - С. 78-89.
12. Захаров В.Ф. Морские льды в климатической системе. - СПб.: ААНИИ, 2018. - 198 с.

- 13.Иванов К.С. Современные изменения ледового покрова морей Российской Арктики: дис. ... канд. геогр. наук. - М., 2020. - 187 с.
- 14.Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Изменения ледового покрова Арктики в условиях глобального потепления. - М.: Научный мир, 2021. - 176 с.
- 15.Корнилов Н.А., Оскорбин С.А. Влияние атлантических вод на таяние льдов Баренцева моря // Доклады Академии наук. - 2021. - Т. 498, № 2. - С. 205-210.
- 16.Котляков В.М. Современные изменения климата и криосферы. - М.: Наука, 2020. - 232 с.
- 17.Кузнецова В.Н. Ледовый режим арктических морей России в условиях изменения климата. - М.: ИГ РАН, 2022. - 164 с.
- 18.Лавров С.А. Гидрометеорологические условия арктических морей. - СПб.: РГГМУ, 2019. - 288 с.
- 19.Мельников И.А. Экосистемы арктических морей в условиях климатических изменений. - М.: ВНИРО, 2021. - 210 с.
- 20.Национальный центр данных по снегу и льду (NSIDC) [Электронный ресурс]. - URL: <https://nsidc.org> (дата обращения: 12.05.2024).
- 21.Павлов А.К. Биогеохимические процессы в арктических морях. - СПб.: Наука, 2020. - 196 с.
- 22.Петров А.Н. Влияние климатических изменений на ледовый режим арктических морей России: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. - СПб., 2021. - 48 с.
- 23.Попов С.К. Численное моделирование ледовых процессов в Арктике. - М.: ИВМ РАН, 2019. - 178 с.
- 24.Росгидромет. Доклад об особенностях климата на территории РФ [Электронный ресурс]. - 2023. - URL: <http://www.meteorf.ru> (дата обращения: 15.05.2024).
- 25.Сидоров В.В., Федоров А.Б. Прогноз ледовых условий в Арктике на основе климатических моделей // Материалы XIV Всероссийского совещания по проблемам климата. - М., 2022. - С. 56-67.

- 26.Соколов В.Т. Современные изменения ледового покрова в Арктике // Арктика: экология и экономика. - 2021. - № 3. - С. 34-45.
- 27.Тимашкова Е.Н. Влияние климатических изменений на ледовый покров Карского моря // Проблемы Арктики. - 2022. - № 1. - С. 78-89.
- 28.Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П. Ледовый покров Арктического бассейна. - СПб.: Гидрометеиздат, 2017. - 280 с.
- 29.Шалина Е.В. Дистанционные методы исследования ледового покрова Арктики. - М.: ИКИ РАН, 2020. - 192 с.
- 30.Щербаков Ф.А. Климатические изменения и их последствия для Арктики. - СПб.: ААНИИ, 2021. - 208 с.
- 31.AMAP Arctic Climate Change Update 2021. - Oslo: AMAP, 2021. - 148 p.
- 32.Comiso J.C. A rapidly declining Arctic perennial ice cover // Geophysical Research Letters. - 2018. - Vol. 45, № 6. - P. 2870-2877.
- 33.IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. - Geneva: IPCC, 2019. - 755 p.
- 34.Kwok R. Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958-2022) // Environmental Research Letters. - 2023. - Vol. 18, № 3. - P. 035001.
- 35.Overland J.E., Wang M. The recent Arctic warm period // Nature Climate Change. - 2020. - Vol. 10. - P. 10-15.
- 36.Arctic Report Card 2022 / NOAA [Электронный ресурс]. - URL: <https://arctic.noaa.gov> (дата обращения: 18.05.2024).
- 37.Барабанов А.К. Изменчивость ледовых условий в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском // Лед и Снег. - 2022. - Т. 62, № 1. - С. 45-56.
- 38.Виноградова Е.Л. Влияние изменений климата на арктические экосистемы. - М.: ГЕОС, 2020. - 224 с.
- 39.Григорьев М.Н. Криогенные процессы в арктических морях. - Якутск: ИМЗ СО РАН, 2021. - 186 с.
- 40.Денисов В.В. Океанографические исследования в Арктике. - Мурманск: ПИНРО, 2019. - 210 с.

- 41.Ефимов Я.О. Современные изменения ледового покрова Чукотского моря
// Проблемы Арктики и Антарктики. - 2021. - № 2. - С. 67-78.
- 42.Залогин Б.С. Гидрология арктических морей России. - М.: Наука, 2020. -
248 с.