



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра океанологии

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

(бакалаврская работа)

«Изменение площади льда в Чукотском море в зависимости от  
суровости зимы»

Исполнитель: Носкова Христина Владимировна

Научный руководитель: к. ф.-м. н., Подрезова Надежда Алексеевна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

(подпись)

Кандидат географических наук

\_\_\_\_\_  
(ученая степень, ученое звание)

Густоев Дмитрий Владимирович

\_\_\_\_\_  
(фамилия, имя, отчество)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

г. Санкт-Петербург

2023



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра океанологии

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

«Изменение площади льда в Чукотском море в зависимости от  
суровости зимы»

Исполнитель: Носкова Христина Владимировна

Руководитель: к. ф.-м. н., Подрезова Надежда Алексеевна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Густоев Дмитрий Владимирович

(фамилия, имя, отчество)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

г. Санкт-Петербург

**2023**

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Физико-географическое положение Чукотского моря.....	4
1.1 Физико-географическое положение.....	4
1.2 Гидрометеорологический режим .....	4
1.2.1. Термический режим.....	5
1.2.2. Распределение солёности.....	7
1.2.3 Циркуляция вод.....	8
1.3 Ледовые условия .....	9
1.4 Физико-географическое описание выбранных станции .....	10
Глава 2. Описание методов исследования.....	15
2.1 Анализ тренда временного ряда.....	15
2.2 Гармонический анализ Фурье и спектр .....	16
2.3 Кластерный анализ.....	18
2.4 Сумма градусо-дней мороза.....	18
Глава 3. Результаты расчетов.....	19
3.1 Исходные данные.....	19
3.2 Расчет трендовой составляющей.....	20
3.3 Расчет гармонического анализа Фурье и спектра .....	22
3.4 Расчет суммы градусо-дней мороза .....	25
3.5 Расчет кластерного анализа .....	27
Заключение .....	35
Список литературы .....	37

## Введение

Чукотское море привлекает внимание ученых и исследователей своей уникальной экосистемой и природным разнообразием. Это место обитания редких и уникальных видов морской фауны и флоры, которые приспособились к суровым условиям Арктики. Однако, несмотря на свою значимость, Чукотское море остается малоизученным, что создает огромный потенциал для будущих исследований и открытий.

Поэтому, целью работы является оценка зависимости между степенью суровости зимы и ледовитостью моря.

Задачи:

- Ознакомиться с физико-географическим районом;
- Сформировать ряды исследуемых данных;
- анализ тренда временного ряда, гармонический и спектральный анализ Фурье, расчет суммы градусо-дней мороза, кластерный анализ.

## Глава 1. Физико-географическое положение Чукотского моря

### 1.1 Физико-географическое положение

Чукотское море – уникальный природный объект, расположенный на крайнем востоке Российской Арктики. Оно занимает площадь примерно 595 тысяч квадратных километров и ограничено сушей на части своей территории, а на другой части имеет условные границы. Море простирается между параллелями  $76^{\circ}$  и  $66^{\circ}$  северной широты и меридианами  $180^{\circ}$  восточной долготы и  $156^{\circ}$  западной долготы.

Географический рельеф Чукотского моря характеризуется некоторой вытянутостью в направлении северо-запада. Оно относится к типу материковых окраинных морей, так как имеет свободное соединение с Северным Ледовитым океаном. Средняя глубина моря составляет около 71 метра, а его наибольшая глубина достигает 1256 метров. Объем Чукотского моря оценивается примерно в 42 тысячи кубических километров.

Важной особенностью Чукотского моря является его береговая линия, которая слабо изрезана и не имеет многочисленных заливов или глубоководных фьордов. Острова в Чукотском море представлены в небольшом количестве, придающем этой морской территории особый характер. Также стоит отметить, что реки, впадающие в Чукотское море, обычно не обладают значительным водным потоком, что отличает его от других полярных окраинных морей.

### 1.2 Гидрометеорологический режим

Гидрометеорологический режим Чукотского моря представляет собой уникальную комбинацию факторов, которая определяет его атмосферные и гидрологические характеристики. Этот эксклюзивный морской регион имеет

свои особенности, отличающие его от других районов Арктического бассейна.

Одной из основных особенностей гидрометеорологического режима Чукотского моря является его климатическая изменчивость. Воздушные массы, циркулирующие над морем, подвержены влиянию различных факторов, таких как близость ледового покрова, соприкосновение с теплыми и холодными морскими течениями, а также взаимодействие с прилегающими сухопутными территориями. Эти факторы создают уникальный микроклимат в районе Чукотского моря.

Погодные условия в Чукотском море изменчивы и часто непредсказуемы. Здесь часто наблюдаются сильные ветры (средняя 6—8 м/с), покрывающие море морозными волнами. Зимой температуры могут опускаться до крайне низких значений, что сопровождается образованием обширных ледяных покровов. Летом море может быть покрыто рассеянными льдами, особенно в северных районах и пасмурная погода с дождем.

На южной части Чукотского моря преобладают ветры, дующие с юга и юго-востока, тогда как в северных районах моря наблюдаются ветры северного и северо-западного направлений (скорость 4-5 м/с).

#### 1.2.1. Термический режим

Термический режим Чукотского моря отражает особенности распределения температуры воды в этом регионе. Зависимость термического режима от сезонных и географических факторов приводит к формированию уникальных термических условий.

Зимой Чукотское море охватывается холодными воздушными массами, что вызывает замораживание его поверхности и формирование обширного ледяного покрова. В это время температура поверхностных слоев моря

понижается до крайне низких значений ( $-1,6-1,8^{\circ}$ ), а водная масса становится холодной и подвержена ледообразованию.

С приходом весны происходит таяние льда, и термический режим Чукотского моря начинает меняться. Постепенно повышающиеся температуры воздуха и солнечная активность способствуют разрушению льда и прогреву воды (до  $-0,5-0,7^{\circ}$  у кромки льдов и до  $+2-3^{\circ}$  у Берингова пролива). Этот процесс приводит к повышению температуры поверхностных слоев моря.

Согласно, можно сделать следующие выводы относительно вертикального распределения температуры в Чукотском море в разные сезоны:

1. Зимой и в начале весны температура воды практически одинакова от поверхности до дна и составляет примерно  $-1,8-1,9^{\circ}$ , за исключением района Берингова пролива, где она повышается до  $-1,5^{\circ}$  на глубине 30 метров.

2. Весеннее прогревание приводит к повышению температуры на поверхности чистой воды, но на глубине 5-10 метров она резко снижается, а на более глубоких уровнях постепенно уменьшается к дну.

3. Летом влияние радиационного прогревания и адвекции тепла приводит к высокой температуре воды, которая распространяется на значительную глубину, включая дно. На поверхности наблюдается температура  $+6-7^{\circ}$ , которая сохраняется на глубине 10—12 метров, после чего она снижается с увеличением глубины, но даже на дне остается в пределах  $+2,5-2,0^{\circ}$ .

4. В центральной части моря влияние Берингова моря проявляется в меньшей степени, что отражается на вертикальном профиле температуры. Температура охватывает слой толщиной 5—7 метров на поверхности (приблизительно  $+5^{\circ}$ ), затем резко снижается до глубины 30 метров, где происходит переход через  $0^{\circ}$ . Между 10 и 15 метрами температура повышается под влиянием теплых вод Берингова моря, а между 20 и 40

метрами она снижается до отрицательных значений, которые сохраняются до дна.

5. В северных районах моря, в районе глубокого Чукотского желоба, на глубине около 20 метров температура воды составляет 2—3°, затем она снижается до -1,6° на глубине 100 метров, а ниже этого уровня она слегка повышается до нулевых значений в придонном слое. Это связано с проникновением теплых вод из Центрального Арктического бассейна.

6. Осенью охлаждение воды проникает с поверхности в глубь, выравнивая температуру по вертикали.

Таким образом, вертикальное распределение температуры в Чукотском море изменяется в зависимости от сезона и влияния различных факторов, таких как прогревание, радиационное прогревание, адвекция тепла и другие.

### 1.2.2. Распределение солёности

Распределение солёности в Чукотском море подвержено влиянию различных факторов и меняется в разные сезоны. В целом, море характеризуется высокой солёностью, особенно в своих северных (33,0—33,5‰) и центральных районах (32‰). Весной и летом, в результате таяния льда и прилива пресной воды, солёность в верхних слоях моря снижается (31,7—32,0‰). Наиболее высокие значения солёности наблюдаются на глубинах более 50 метров (33‰).

Распределение солёности также связано с влиянием прилегающих водных масс. Влияние Берингова моря и Центрального Арктического бассейна оказывает значительное влияние на солёность Чукотского моря. Теплые атлантические воды, проникающие в Чукотское море, вносят свой вклад в увеличение солёности.



Осенью и зимой соленость в верхних слоях моря повышается, поскольку процессы смешивания и циркуляции океанских вод способствуют перемешиванию и распространению солености на более глубокие горизонты.

В целом, вертикальное распределение солености в Чукотском море характеризуется увеличением солености с глубиной, особенно в северных и центральных районах, где влияние Берингова моря и Центрального Арктического бассейна сильнее всего проявляется.

### 1.2.3 Циркуляция вод

Циркуляция вод Чукотского моря является сложным и динамичным процессом, влияющим на перемещение водных масс в этом регионе. Она обусловлена различными факторами, включая ветры, приливы, плотностные различия и географическое положение моря. Вот некоторые основные характеристики циркуляции вод Чукотского моря:

1. Приливы: Чукотское море испытывает сильные приливные движения, которые оказывают значительное влияние на циркуляцию вод. Приливы создают потоки, которые перемещают воду в различных направлениях.

2. Ветры: Ветровое воздействие является важным фактором в циркуляции вод Чукотского моря. Ветры южного и юго-восточного направлений преобладают в южной части моря, в то время как северные и северо-западные ветры доминируют в его северных районах. Эти ветры создают силы, которые могут двигать воду в разных направлениях и влиять на ее потоки.

3. Плотностные различия: Различия в плотности водных масс также влияют на циркуляцию в Чукотском море. Теплые и более соленые воды имеют более низкую плотность, тогда как холодные и менее соленые воды

имеют более высокую плотность. Это может вызывать вертикальные перемещения водных масс и формирование вихрей.

4. Географическое положение: Чукотское море имеет связи с другими морями, такими как Берингово море и Северный Ледовитый океан. Эти связи также влияют на циркуляцию вод в Чукотском море. Перемещение водных масс из одного моря в другое может создавать потоки и вихри.

В целом, циркуляция вод Чукотского моря является комплексным процессом, и ее понимание требует дальнейших исследований и наблюдений.

### 1.3 Ледовые условия

Ледовые условия в Чукотском море являются одними из самых суровых.

Зимой Чукотское море покрывается плотным и прочным льдом, который формируется из-за низких температур и холодных ветров. Ледовый покров может достигать значительной толщины, создавая серьезные препятствия для судоходства и других морских деятельности. Леды могут быть как однолетними, так и многолетними, в зависимости от их возраста и степени укрепления.

Весной начинается процесс таяния льда, однако это происходит медленно и постепенно из-за холодных температур. В это время возникают ледяные глыбы и трескучие поля, что делает навигацию и добычу ресурсов в Чукотском море сложными задачами.

Летом ледовый покров сокращается, однако некоторые области все еще могут быть покрыты льдом. Это связано с холодными температурами и северными ветрами, которые затрудняют процесс таяния. Лед может препятствовать перемещению судов и оказывать влияние на морскую фауну и флору.

Осенью начинается формирование нового ледового покрова в Чукотском море. Температуры падают, и процесс замораживания воды начинается, ведя к постепенному возрастанию ледового покрова.

Ледовые условия в Чукотском море являются существенным фактором для местных сообществ, рыболовства, судоходства и научных исследований. Наблюдение и прогнозирование ледовых условий играют важную роль в безопасности и планировании морских операций в этом регионе.

#### 1.4 Физико-географическое описание выбранных станции

1. Описание физико-географических условий района станции на мысе Ванкарем включает следующие особенности:

- Расположение: Станция находится на расстоянии 7 км от основного материкового массива с запада и в 2 км от оконечности мыса с востока.
- Рельеф: Мыс Ванкарем представляет собой узкий перешеек, приподнятый над средним уровнем Чукотского моря на 5-7 м. Восточная оконечность мыса приподнята на 7-18 м.
- Береговая линия: Берег моря в районе станции пологий. Дно в прибрежной части является песчанно-галечным и имеет небольшой уклон. На расстоянии 200-300 метров от берега глубина достигает всего 3-4 метров.
- Уровенный режим: Район характеризуется уровенным режимом, что является типичным для побережья Чукотского моря.
- Волновой режим: Характеристика волнового режима в районе станции не полностью описывает волновой режим Чукотского моря. Это объясняется тем, что с востока и северо-востока море закрыто мысом, а также на расстоянии 100 метров от берега присутствует песчаная банка.

Такие особенности географического окружения оказывают влияние на морские условия в данном районе, включая температуру воды, волновой режим и другие параметры.

2. Описание физико-географических условий района погодной станции Уэлен включает следующие особенности:

- **Расположение:** Станция находится в северо-восточном оконечности Чукотского полуострова, рядом с мысом Дежнева, который вдаётся в Берингов пролив.

- **Природная среда:** Станция расположена на намывной песчано-галечной косе шириной от 200 до 400 метров. Коса начинается у подножия скалистой возвышенности мыса Дежнев и простирается на 18 километров к западу. С севера коса омывается водами Чукотского моря, а с юга находится неглубокая лагуна шириной до 2 километров. Лагуна соединена с морем небольшим горлом шириной 100-120 метров, которое подвержено замыванию штормами в осенний период при сильных ветрах северной четверти.

- **Окружающая местность:** На юге от лагуны простирается тундра с множеством мелких озер и речушек, впадающих в Берингов пролив и лагуну Уэлен. Вода в этих водоёмах сильно опреснена.

- **Характер морской среды:** Чукотское море, омывающее берега в районе станции, имеет преимущественно ледовый режим и гидрологический режим, который меняется от западо-северо-западного до восточного направления. Береговая черта в этом районе малоизрезана и почти ровная. В прибрежной полосе моря дно является галечным. Глубины в районе станции резко увеличиваются от берега, что позволяет судам подходить близко к берегу для разгрузки.

- **Волнение:** Море открыто с севера, и при преобладающих северных ветрах наблюдается значительное волнение и сильный береговой

накат, что затрудняет проведение уровенных наблюдений в летний и осенний период.

- Ледовый режим: Господствующие ветра в этом районе - северные и южные. Подвижка льда в районе станции наблюдается до конца февраля, что задерживает формирование припая даже у берега, а также вызывает сильную торосистость льда, что затрудняет наблюдение за уровнем моря в зимний период. Позднее становление припая происходит обычно в июне. Освобождение моря от плавучего льда происходит быстро, за исключением некоторых лет.

3. Полярная станция на острове Врангеля расположена в юго-восточной части острова, в бухте Роджерса. Бухта Роджерса образована широкой косой, которая начинается у устья реки Нашей, расположенного рядом с массивом острова, и тянется параллельно коренному берегу на запад до мыса Пролетарского. Ширина косы напротив полярной станции составляет 100-150 метров, а дальше на востоке она становится шире, достигая 300 метров. Мыс Пролетарский является началом косы и образует вход в бухту шириной 250 метров. Коса является наносного происхождения и состоит из гальки и гравия, почти не имеет растительности, за исключением ярко красных пятен накипных лишайников. Длина бухты составляет 11 километров, ширина против станции 800 метров, а в средней части увеличивается до 1000-1200 метров. Глубина у входа в бухту составляет 5-6 метров, затем она уменьшается до 1,5-2 метров около ветряка и 4-5 метров напротив станции. Глубины в восточной части бухты неизвестны. Внутренняя коса бухты, на которой расположен поселок станции, отходит от коренного берега на расстоянии 4 километра к востоку от мыса Пролетарского. Коса имеет форму треугольника, протянутого с запада на восток. Длина косы составляет 100 метров, наибольшая ширина - 300 метров, а наименьшая - 20 метров. Коса соединяется с коренным берегом узким перешейком шириной 10-15 метров, где воды бухты и внутренней лагуны приближаются друг к другу, и во время высоких приливов перешеек может

быть затоплен. Внутренняя коса состоит из гравийно-галечных отложений. Лагуна расположена между внутренней косой и коренным берегом, ее длина составляет 600 метров, а ширина варьируется от 10 до 90 метров. Глубина лагуны около 1,5-2 метров. Через узкую протоку шириной 1-1,5 метра на востоке лагуна соединяется с бухтой. Коренной берег в окрестностях полярной станции является обрывистым на всей протяженности, под которым почти каждый год сохраняется перелесок уплотненного, загрязненного снега. Высота берега против полярной станции составляет 10-11 метров. Коренной берег состоит из задернованной тундры, которая расположена к северу от станции. Он имеет ровный рельеф и слабую заболоченность. Почва в основном состоит из суглинков, перемешанных с мелкой галькой и гравием, что свидетельствует о небольшом развитии почв. Цепь сопков, видимая с полярной станции, начинается на востоке мысом Гаваи и простирается до горы Атернон на западе, которая имеет высоту 500 метров. В седловинах между сопками накапливается большое количество снега, и летом с сопков стекают многочисленные ручьи, которые быстро высыхают. В 350 метрах к западу от станции протекает ручей Маячный, который не пересыхает летом.

В данном районе характер приливно-отливных течений и колебаний уровня моря является полусуточным, связанным с приливами и отливами. Эти явления относятся к регрессивному типу, что означает, что во время отлива уровень моря понижается.

Наибольшее влияние на амплитуду приливных колебаний уровня моря и скорость приливно-отливных течений оказывает наличие ледяного покрова. Зимой господствующими ветрами для юго-восточной части острова являются ветры северо-северо-восточного направления, которые сдувают ледяной покров. Летом господствующими ветрами являются ветры юго-восточного и юго-западного направлений, которые нагоняют воду и создают нагонные колебания уровня моря. Максимальные сгонно-нагонные

колебания уровня моря наблюдаются в конце августа и первой половине сентября.

Летом температура морской воды в бухте Роджерса достигает положительных значений на всех глубинах, причем максимальные значения, около 3,0-4,0°C, наблюдаются у поверхности. Зимой температура воды у поверхности падает до отрицательных значений, в диапазоне от -1,6 до -1,9°C.

Средние сроки полного замерзания бухты Роджерса варьируются в первой половине сентября, а в открытой части моря они наступают во второй половине ноября или первой половине декабря. Средние сроки вскрытия наблюдаются в первой половине июля, при этом разница во времени между вскрытием бухты и открытой части моря составляет не более 5-7 дней.

Толщина льда в открытой части моря варьирует от 160 до 180 см, а в бухте может достигать до 200 см, в зависимости от сроков полного замерзания. Максимальная толщина льда наблюдается в мае. Интенсивное таяние льда начинается в мае, а первые признаки разрушения льда появляются в первой половине июня. К моменту вскрытия толщина льда обычно не превышает 40-50 см.

## Глава 2. Описание методов исследования

### 2.1 Анализ тренда временного ряда

Для проведения анализа тренда временного ряда требуется конкретный временной ряд данных.

Обычно анализ тренда включает следующие шаги:

1. Визуализация данных: Строится график временного ряда, чтобы оценить его общую форму и визуально выявить наличие тренда.

2. Сглаживание данных: Применяются различные методы сглаживания, такие как скользящее среднее или экспоненциальное сглаживание, чтобы удалить шум и выявить более явный тренд.

3. Выявление тренда: Применяются методы статистического анализа, такие как линейная регрессия или метод наименьших квадратов, чтобы определить наличие и характер тренда. Тренд может быть восходящим (повышательным), нисходящим (понижательным) или горизонтальным (отсутствие тренда).

4. Оценка значимости тренда: Проверяется статистическая значимость тренда с использованием соответствующих статистических тестов, таких как тест на значимость коэффициента наклона в линейной регрессии.

5. Прогнозирование: На основе тренда и предыдущих данных можно построить прогноз на будущие периоды.

Уравнение линейного тренда:

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

и нелинейного тренда:

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

где  $t$  - время.

Основными характеристиками тренда являются:



1. Коэффициент детерминации, обозначаемый как  $R^2$ , является статистической мерой, которая указывает на то, насколько хорошо линейная регрессионная модель соответствует наблюдаемым данным. Он представляет собой долю дисперсии зависимой переменной, которая может быть объяснена линейной регрессией.

2. Величина тренда может быть положительной или отрицательной, в зависимости от того, увеличивается или уменьшается значение переменной со временем. Большая величина тренда указывает на более существенные изменения, тогда как маленькая величина тренда указывает на более медленные изменения.

Для дальнейшего статистического анализа, включая выделение сезонных или циклических компонентов, тренд может быть удален из временного ряда. Один из способов удаления тренда - это вычитание из исходного ряда значений, рассчитанных по модели тренда.

## 2.2 Гармонический анализ Фурье и спектр

Гармонический анализ Фурье является методом для анализа периодических сигналов и временных рядов. Он основан на представлении сигнала в виде комбинации гармонических функций различных частот, известных как гармоники. Применение гармонического анализа Фурье позволяет выделить основные составляющие сигнала и определить их амплитуды и фазы.

Формула гармоники:

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

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

где  $k$  - номер гармоники;  $A_k$  - амплитуда  $k$ -той гармоники;  $\omega_k$  - частота  $k$ -той гармоники;  $T_k$  - период  $k$ -той гармоники;  $\varphi_k$  - фаза  $k$ -той гармоники;  $t$  - время.

Характеристики гармоники определяются на основании коэффициентов Фурье  $a_k$  и  $b_k$ :

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

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

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

Характеристики гармоники определяются по формулам:

Амплитуда гармоники:

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

Фаза гармоники:

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

Дисперсия гармоники

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

Вклад гармоники в общую дисперсию ряда:

$$V_k = \frac{D_k}{D_y}; \quad (2.10)$$

Подставляя значения амплитуд, фаз и частот для каждой гармоники в эту формулу, можно рассчитать значения функции на каждый момент времени и восстановить ее периодическую структуру.

### 2.3 Кластерный анализ

Кластерный анализ - это метод статистического анализа, который позволяет группировать объекты или наблюдения на основе их схожести или близости в многомерном пространстве. Он используется для выявления скрытых структур или паттернов в данных путем создания компактных и однородных групп, называемых кластерами.

В данном исследовании для проведения кластерного анализа был использован пакет анализа данных PAST4.

### 2.4 Сумма градусо-дней мороза

Для расчета градусо-дней мороза используется формула:

$$\Sigma(-T)_a \tag{2.13}$$

Где  $T_a$  – температура атмосферы.

## Глава 3. Результаты расчетов

### 3.1 Исходные данные

В данной работе исследуется район: Чукотское море, а именно данные со станций мыс Уэлен, мыс Ванкарем, о.Врангеля.

На портале NASA – «Hydrosphere, Biosphere and Geophysics Science Research Portal» взяли данные по ледовитости.

На сайте [aisori.meteo.ru](http://aisori.meteo.ru) взяли данные по температуре воздуха.



Рис. 3.1 Исследуемые станции на карте

Таблица 3.1 Выбранные станции

Название станции	Индекс	Разряд станции
Мыс Уэлен	25399	II
Мыс Ванкарем	25282	II
о. Врангеля	21982	II

Для оценки изменения площади льда в Чукотском море, выделили тренд, сделали гармонический и спектральный анализ.

### 3.2 Расчет трендовой составляющей

Сформировали уравнение тренда для ледовитости (К).

- Линейного:  $K = -4038,2 * t + 774402$
- Нелинейного:  $K = -21,654 * t^2 - 3085,4 * t + 767256$

Далее проверили коэффициенты регрессии (а и b) и коэффициент детерминации ( $r^2$ ).

Таблица 3.2 Характеристики линейного тренда

Линейная									
<i>Регрессионная статистика</i>									
Множественный	0,84								
R-квадрат	0,70								
Нормированный	0,69								
Стандартная ош	34302,42								
Наблюдения	42								
<i>Дисперсионный анализ</i>									
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>значимость F</i>				
Регрессия	1	1,09105E+11	1,09105E+11	92,72	5,67E-12				
Остаток	40	47066235778	1176655894						
Итого	41	1,56171E+11							
	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>	<i>Нижние 95,0%</i>	<i>Верхние 95,0%</i>	
Y-пересечение	779294,00	11160,32	69,83	2,03765E-43	756738,2	801849,8	756738,2	801849,8	
Переменная X1	-4204,95	436,68	-9,63	5,67429E-12	-5087,52	-3322,39	-5087,52	-3322,39	

Для оценки статистической значимости коэффициента корреляции были сформулированы нулевая гипотеза  $H_0: r = 0$  и альтернативная гипотеза  $H_1: r \neq 0$ . Для проверки этих гипотез был выбран критерий Стьюдента, и его критическое значение было рассчитано при уровне значимости 95% и длине ряда в 42 года, равное  $t_{кр} = 2,02$ . Далее рассчитано стандартное отклонение, эмпирическое значение критерия Стьюдента ( $t^* = 17,97$ ). Поскольку значение  $t^*$  превышает критическое значение  $t_{кр}$ , коэффициент является значимым, что свидетельствует о наличии тренда.

Величина тренда равна  $-42049,5 \text{ км}^2/10 \text{ лет}$ .

Уравнение нелинейного тренда:

$$K = -278,68t^2 - 3322,9t + 1E+06$$

Проверяем коэффициенты регрессии и коэффициент детерминации на значимость. Коэффициенты незначимы, так как  $t^*a_1=1,81$ ,  $t^*a_2=0,52$ , а  $t_{кр}=2,03$ .  $t^*b=20,84$  - коэффициент  $b$  значим.

Была сформулирована нулевая гипотеза  $H_0: r = 0$ ; альтернативная  $H_1: r \neq 0$ . Для проверки гипотезы был выбран критерий Стьюдента и рассчитано его критическое значение  $t_{кр}=2,03$ . Далее был рассчитан критерий Стьюдента ( $t^*=18,05$ ), коэффициент является незначимым, так как  $t_{кр} < t^*$ , тренда нет.

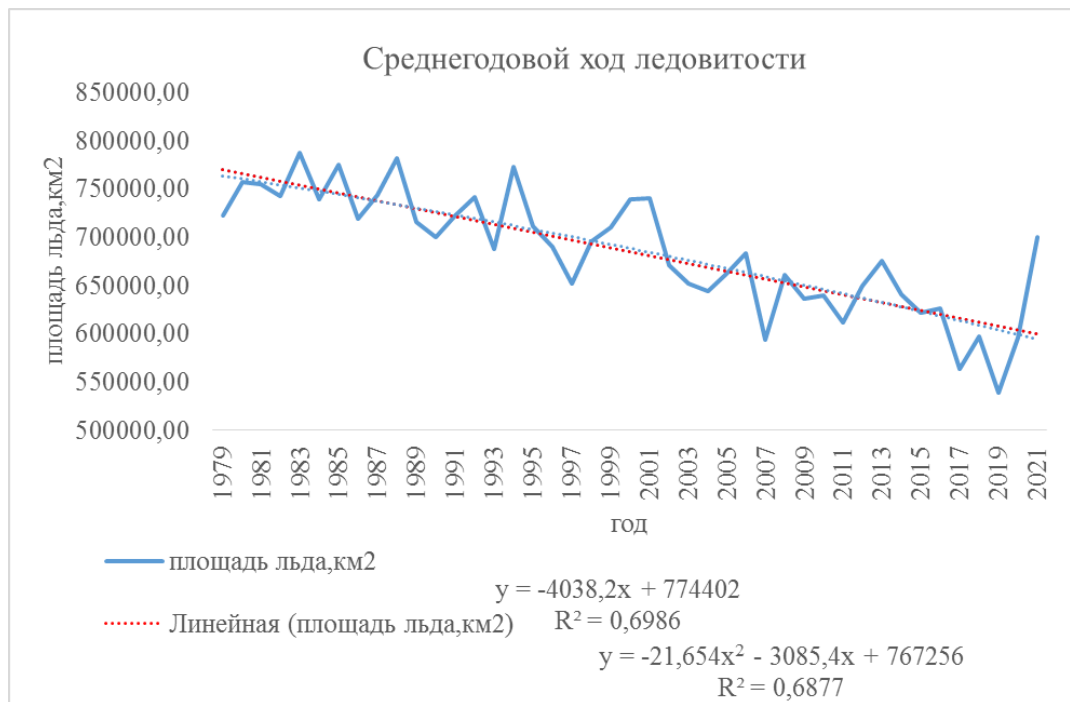


Рис. 3.2 Линейный и нелинейный тренды ледовитости

В 2019 году наблюдается наименьшее значение ледовитости, в 1983 году – наибольшее. То есть со временем идет на уменьшение.

### 3.3 Расчет гармонического анализа Фурье и спектра

Так как линейный тренд значим, то из исходного ряда вычли величину тренда. Полученный ряд был использован как исходный для гармонического анализа Фурье.

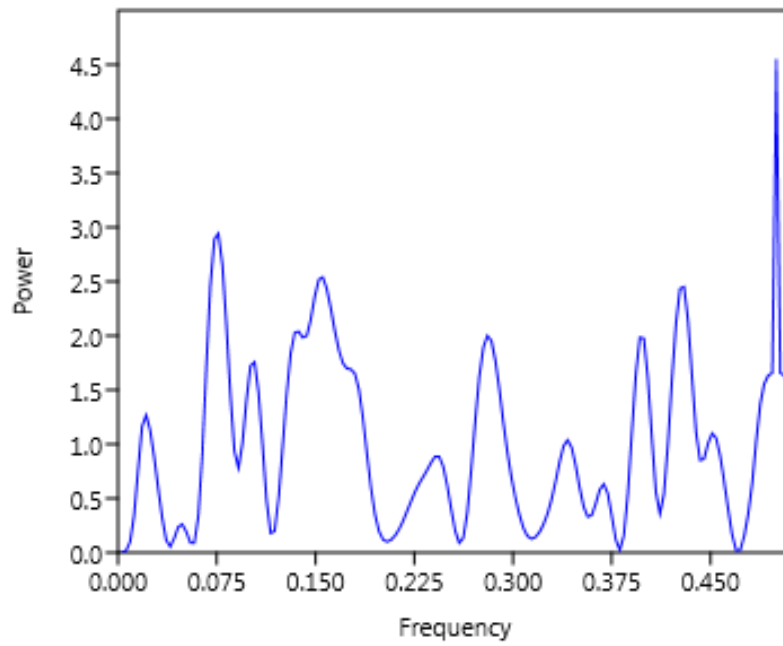


Рис. 3.3 Спектр для среднегодового ряда ледовитости

С помощью программы Past4 была получена периодограмма. Для дальнейших расчетов было отобрано 4 пика.



Таблица 3.4 Характеристики гармоник

Параметры гармоник	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_4$
Частота, 1/год	0,500	0,076	0,155	0,430
Сила	4,447	2,943	2,540	2,451
Период, год	2,00	13,12	6,43	2,33
Частота, рад/год	3,14	0,48	0,98	2,70
К-т Фурье $a_k$	4368,37	12529,58	57773,04	13180,70
К-т Фурье $b_k$	-5050,78	59513,39	11961,18	-7820,30
A, °C	6677,80	60818,04	58998,25	15326,05
Фаза, год	0,86	1,36	0,20	0,54
Дисперсия гармоник, кв.км	22296478,2	1849416999,3	1740396945,1	117443955,9
Дисперсия исх. ряда, кв.км	3751611141,87			
Вклад гармоник в ряд отклонений	0,59	49,30	46,39	3,13
Общий вклад гармоник, %	99,41			

Далее провели проверку гармоник на значимость. Сравнивая t-значение ( $t^*$ ) и критическое значение ( $t_{cr} = 2.02$ ), вклады гармоник в исходный ряд и в ряд отклонений оказались значимы, тк наблюдаемое t больше  $t_{cr}$ .

Две гармоники значимы:

Гармоника 2 =  $60818,04 \cdot \cos(0,48 \cdot t + 1,36)$ . T=13,12лет, A=60818,04 кв.км,  $t^*=8,94$ ,  $t_{кр}=2,02$ ,  $t^*>t_{кр}$ , значима.

Гармоника 3 =  $58998,25 \cdot \cos(0,98 \cdot t + 0,2)$ . T=6,43 года, A=58998,25 кв.км,  $t^*=8,23$ ,  $t_{кр}=2,02$ ,  $t^*>t_{кр}$ , значима.

Общий вклад значимых гармоник составляет 96%.

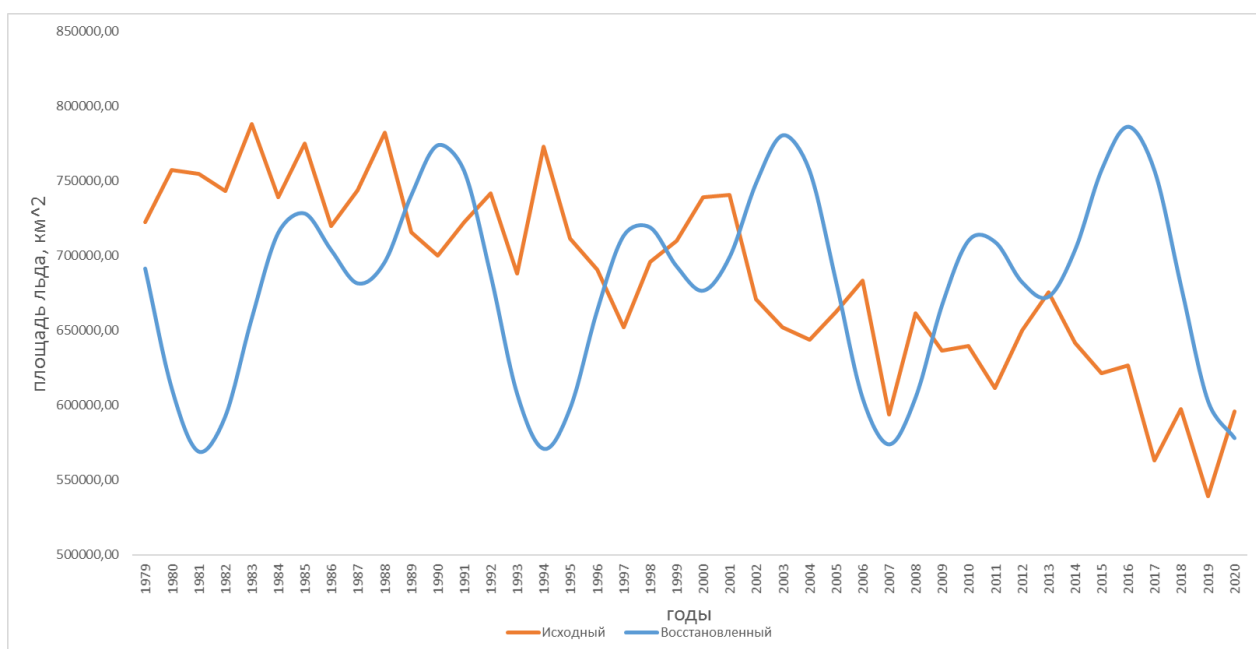


Рис. 3.4 Исходные значения ледовитости и восстановленные гармоники

По рисунку 3.4 можно отметить, что восстановленный ряд правильно описывает ход, но максимумы и минимумы выражены ярче, сглажена короткопериодная изменчивость.

### 3.4 Расчет суммы градусо-дней мороза

Для определения критериев суровости зим, рассчитывается сумма градусо-дней мороза (СГДМ). И по этим данным производится кластерный анализ.

Таблица 3.5 СГДМ на выбранных станциях с 1977 по 2021 гг.

Год	о. Врангеля	Мыс Ванкарем	Мыс Уэлен
1977	-4363,6	-4359,6	-3645,9
1978	-4162,7	-3979,5	-2620,2
1979	-3996,8	-4138,2	-2970

1980	-4444,1	-4645,4	-3582,2
1981	-4036,7	-4015,6	-3113,1
1982	-4176,1	-3854,7	-2747,9
1983	-4314,4	-4455,8	-3295
1984	-4515,7	-4495,2	-3738,8
1985	-4543,3	-4492,7	-3309,1
1986	-4114,1	-4256,5	-3140,5
1987	-4672,6	-4857,1	-3666,1
1988	-4224,5	-4323,5	-3489,7
1989	-3862,4	-3525,1	-2589
1990	-4109,6	-4142	-3415,9
1991	-3637,7	-3741,7	-3033,4
1992	-4485,3	-4425,6	-3456,3
1993	-4068,6	-4306,9	-3137,5
1994	-4645,5	-5019,5	-3944,4
1995	-3636	-3836,3	-2930
1996	-3437,2	-3181,7	-1527,2
1997	-3866,4	-3990,9	-3008,3
1998	-3916,1	-3979,7	-3050,3
1999	-4479,7	-4716,5	-3945,4
2000	-4155,3	-3680,7	-2975
2001	-4016,2	-3443,6	-3198,9
2002	-3699,7	-1564	-2548
2003	-3670,3	-2977	-2888,8
2004	-3557,2	-2601,5	-2736,9
2005	-3664,2	-3210,4	-3190,7
2006	-3371,5	-3706,8	-3031,8
2007	-3238,3	-3255,8	-2506,7
2008	-3829,9	-3990,7	-3261,7

2009	-3668,7	-3659,3	-2936,2
2010	-3566	-3548,9	-2883,7
2011	-3290,8	-3486,4	-2559,3
2012	-3784,9	-4246,3	-3513,5
2013	-3718,6	-3667,8	-2814,4
2014	-3011	-1446,9	-2113,4
2015	-3573,4	-3898,1	-2688,2
2016	-2973,9	-3572,1	-2404,2
2017	-2773,4	-2614,4	-1960,9
2018	-2983,5	-3181,8	-1823,4
2019	-2832,2	-3076,1	-1772,8
2020	-3097	-3130,1	-2415,2
2021	-4069,3	-3995,4	-3117,2

### 3.5 Расчет кластерного анализа

Чтобы определить 3 класса суровости зим (суровая, умеренная и мягкая), произвели кластерный анализ.

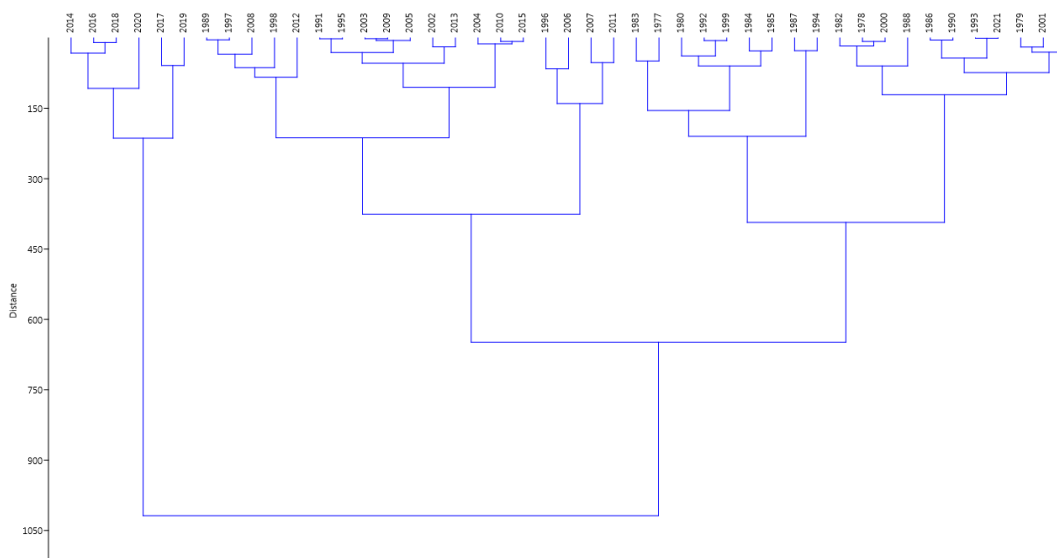


Рис. 3.5 Дендрограмма станции о.Врангеля

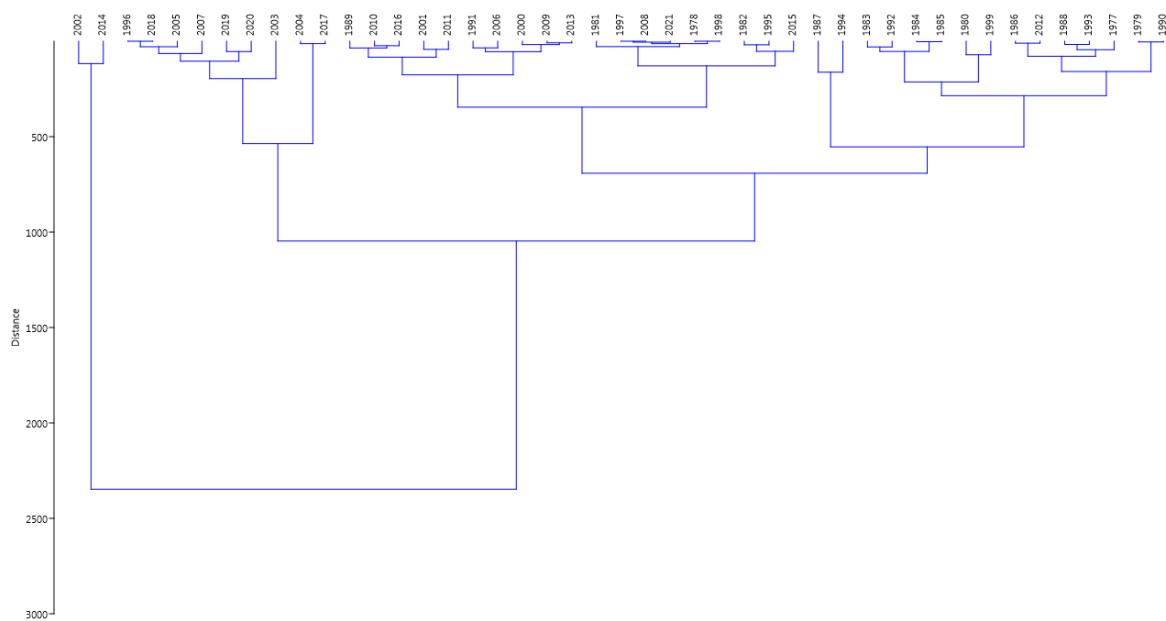


Рис. 3.6 Дендрограмма станции Мыс Ванкарем

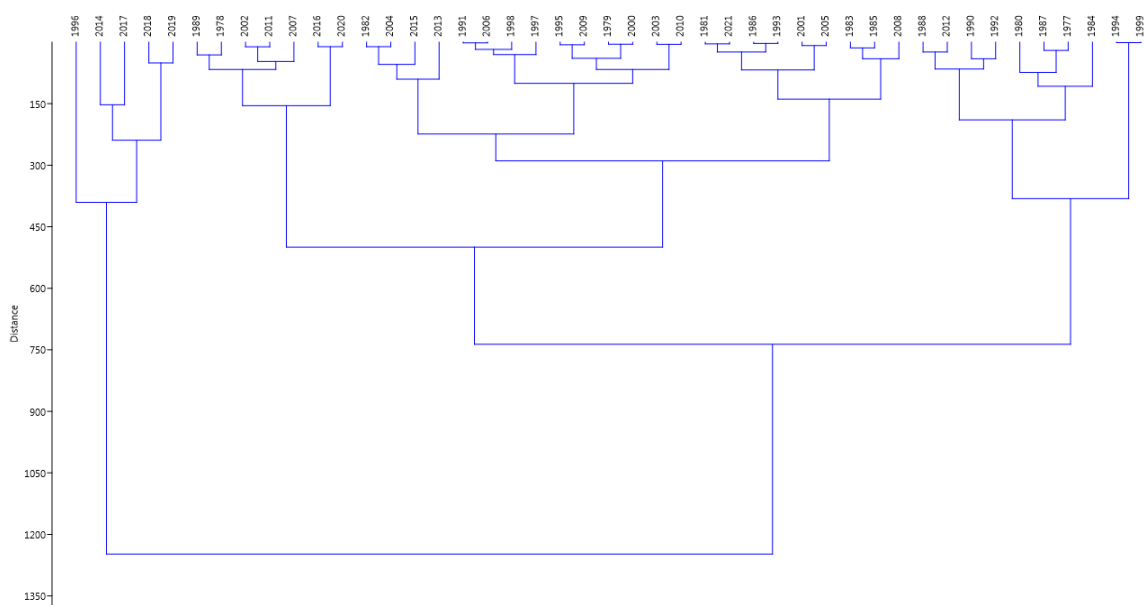


Рис. 3.7 Дендрограмма станции Мыс Уэлен

Таблица 3.6 СГДМ по степеням суровости на станции о.Врангеля

Мягкие		Умеренные		Суровые	
2014	-3011	1989	-3862,4	1983	-4314,4
2016	-2973,9	1997	-3866,4	1977	-4363,6
2018	-2983,5	2008	-3829,9	1980	-4444,1
2020	-3097	1998	-3916,1	1992	-4485,3
2017	-2773,4	2012	-3784,9	1999	-4479,7
2019	-2832,2	1991	-3637,7	1984	-4515,7
		1995	-3636	1985	-4543,3
		2003	-3670,3	1987	-4672,6
		2009	-3668,7	1994	-4645,5
		2005	-3664,2	1982	-4176,1
		2002	-3699,7	1978	-4162,7
		2013	-3718,6	2000	-4155,3
		2004	-3557,2	1988	-4224,5
		2010	-3566	1986	-4114,1
		2015	-3573,4	1990	-4109,6
		1996	-3437,2	1993	-4068,6
		2006	-3371,5	2021	-4069,3
		2007	-3238,3	1979	-3996,8
		2011	-3290,8	2001	-4016,2

Таблица 3.7 СГДМ по степеням суровости на станции Мыс Ванкарем

Мягкие		Умеренные		Суровые	
2002	-1564	1996	-3181,7	1990	-4142
2014	-1446,9	2018	-3181,8	1979	-4138,2
		2005	-3210,4	1977	-4359,6
		2007	-3255,8	1993	-4306,9
		2019	-3076,1	1988	-4323,5
		2020	-3130,1	2012	-4246,3
		2003	-2977	1986	-4256,5
		2004	-2601,5	1999	-4716,5
		2017	-2614,4	1980	-4645,4
				1985	-4492,7
				1984	-4495,2
				1992	-4425,6
				1983	-4455,8
				1994	-5019,5
				1987	-4857,1
				2015	-3898,1
				1995	-3836,3
				1982	-3854,7
				1998	-3979,7
				1978	-3979,5
				2021	-3995,4
				2008	-3990,7
				1997	-3990,9
				1981	-4015,6
				2013	-3667,8
				2009	-3659,3
				2000	-3680,7
				2006	-3706,8
				1991	-3741,7
				2011	-3486,4
				2001	-3443,6
				2016	-3572,1
				2010	-3548,9
				1989	-3525,1

Таблица 3.6 СГДМ по степеням суровости на станции Мыс Уэлена

Мягкие		Умеренные		Суровые	
1997	-1527,2	1990	-2589	1989	-3489,7
2015	-2113,4	1979	-2620,2	2013	-3513,5
2018	-1960,9	2003	-2548	1991	-3415,9
2019	-1823,4	2012	-2559,3	1993	-3456,3
2020	-1772,8	2008	-2506,7	1981	-3582,2
		2017	-2404,2	1988	-3666,1
		2021	-2415,2	1978	-3645,9
		1983	-2747,9	1985	-3738,8
		2005	-2736,9	1995	-3944,4
		1980	-2970	2000	-3945,4
		2014	-2814,4		
		1992	-3033,4		
		2007	-3031,8		
		1999	-3050,3		
		1998	-3008,3		
		1996	-2930		
		2010	-2936,2		
		1980	-2970		
		2001	-2975		
		2004	-2888,8		
		2011	-2883,7		
		1982	-3113,1		
		2021	-3117,2		
		1987	-3140,5		
		1994	-3137,5		
		2004	-2888,8		
		2002	-3198,9		
		2006	-3190,7		
		1984	-3295		
		1986	-3309,1		
		2009	-3261,7		



Таблица 3.7 Степени суровости

Зима		о. Врангеля	мыс Ванкарем	мыс Уэлен	Зима		о. Врангеля	мыс Ванкарем	мыс Уэлен
1977	1978	сув	сув	сув	2000	2001	сув	сув	ум
1978	1979	сув	сув	ум	2001	2002	сув	сув	ум
1979	1980	сув	сув	ум	2002	2003	ум	мяг	ум
1980	1981	сув	сув	сув	2003	2004	ум	ум	ум
1981	1982	сув	сув	ум	2004	2005	ум	ум	ум
1982	1983	сув	сув	ум	2005	2006	ум	ум	ум
1983	1984	сув	сув	ум	2006	2007	ум	сув	ум
1984	1985	сув	сув	сув	2007	2008	ум	ум	ум
1985	1986	сув	сув	ум	2008	2009	ум	сув	ум
1986	1987	сув	сув	ум	2009	2010	ум	сув	ум
1987	1988	сув	сув	сув	2010	2011	ум	сув	ум
1988	1989	сув	сув	сув	2011	2012	ум	сув	ум
1989	1990	ум	сув	ум	2012	2013	ум	сув	ум
1990	1991	сув	сув	сув	2013	2014	ум	сув	сув
1991	1992	ум	сув	ум	2014	2015	мяг	мяг	ум
1992	1993	сув	сув	сув	2015	2016	ум	сув	мяг
1993	1994	сув	сув	ум	2016	2017	мяг	сув	ум
1994	1995	сув	сув	сув	2017	2018	мяг	ум	мяг
1995	1996	ум	сув	ум	2018	2019	мяг	ум	мяг
1996	1997	ум	ум	мяг	2019	2020	мяг	ум	мяг
1997	1998	ум	сув	ум	2020	2021	мяг	ум	ум
1998	1999	ум	сув	ум					
1999	2000	сув	сув	сув					

Исходя из проведенного кластерного анализа и таблицы, выделены три года с различными степенями суровости на выбранных станциях:

1. Зима 1988-1989 года была классифицирована как суровая.
2. Зима 2004-2005 года была классифицирована как умеренная.
3. Зима 2019-2020 года была классифицирована как мягкая.

Эти три года подходят для дальнейшего анализа, так как они обладают наибольшим совпадением в степени суровости на большинстве станций.

Таблица 3.8 Таблица площадей льда за три зимы разной суровости

Месяц	суровый	умерен	мягкий
	1988-1989, млн.км <sup>2</sup>	1999- 2000,млн км <sup>2</sup>	2013-2014, млн км <sup>2</sup>
сентябрь	0,62	0,16	0,05
октябрь	0,68	0,3	0,07
ноябрь	0,84	0,68	0,38
декабрь	0,84	0,84	0,84
январь	0,84	0,84	0,84
февраль	0,84	0,84	0,84
март	0,84	0,84	0,84
апрель	0,84	0,84	0,84
май	0,84	0,84	0,84
июнь	0,75	0,7	0,69
июль	0,58	0,57	0,48
август	0,46	0,33	0,3

Далее построили график площадей льда за выбранные зимы.

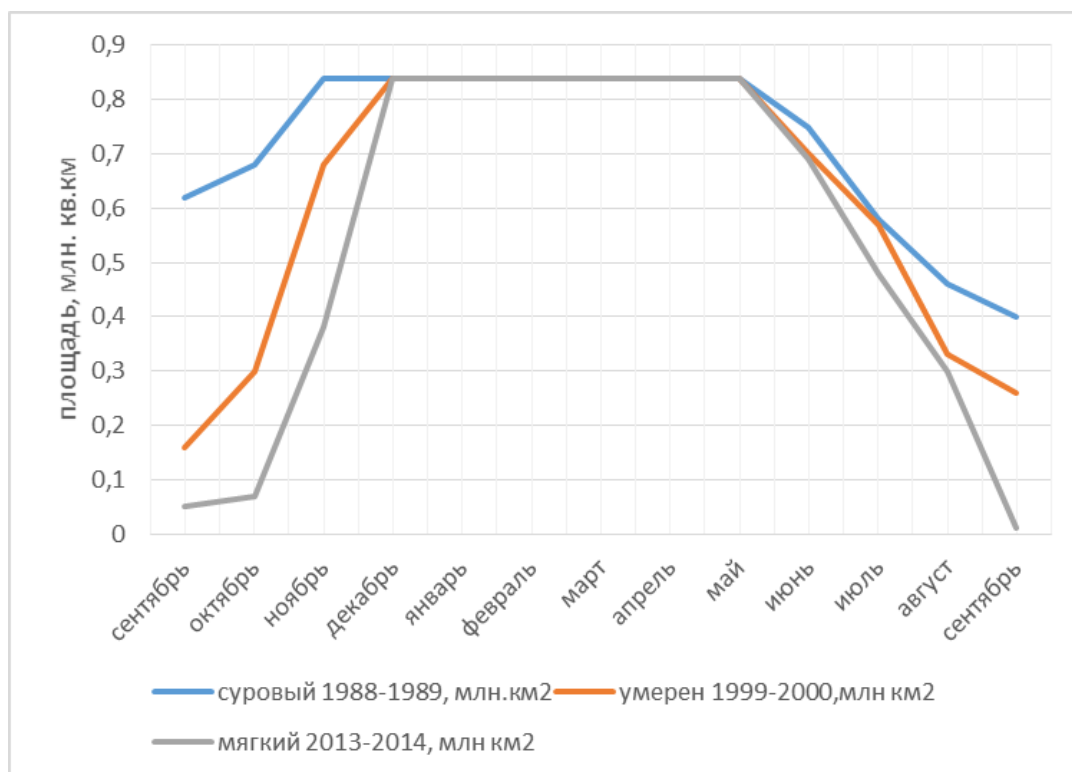


Рис. 3.8 Площадь льда (1988-1989, 1999-2000 и 2013-2014)

Согласно предоставленной информации, можно сделать следующие выводы:

1. Во всех трех выбранных зимах (1988-1989, 2004-2005 и 2019-2020) процесс таяния льда начинался в июне.

2. В зиму 1988-1989 (суровая) наблюдалась наибольшая площадь льда на протяжении всех месяцев. Минимальная площадь льда в сентябре составила 0.4 млн. км<sup>2</sup>.

3. В зиму 2019-2020 (мягкая) наблюдалась наименьшая площадь льда на протяжении всех месяцев. Минимальная площадь льда в сентябре составила 0.1 млн. км<sup>2</sup>.

4. В зиму 2004-2005 (умеренная) площадь льда находилась между суровой и мягкой зимами на протяжении всего временного промежутка. Минимальная площадь льда в сентябре составила 0.26 млн. км<sup>2</sup>.

Таким образом, наблюдается соответствие между степенью суровости зимы и площадью льда. В суровые зимы площадь льда остается высокой на протяжении всех месяцев, в то время как в мягкие зимы площадь льда существенно снижается. Зима 2004-2005 (умеренная) находится между суровой и мягкой зимами в отношении площади льда.

## Заключение

В своем исследовании я использовала данные об общей ледовитости Чукотского моря за период с 1979 по 2021 годы, а также данные о температуре атмосферы за период с 1977 по 2021 годы на трех прибрежных станциях: мыс Ванкарем, мыс Уэлена и остров Врангеля.

Для оценки изменения площади льда в Чукотском море был проведен ряд анализов. Вначале была выделена трендовая компонента, а затем проведены гармонический и спектральный анализы Фурье, а также автокорреляционный анализ. Результаты этих анализов позволили сделать следующие выводы.

Первоначально было выявлено, что величина линейного тренда составляет  $-144700$  км<sup>2</sup>/10 лет. Так как тренд отрицательный, можно заключить, что площадь льда в Чукотском море имеет тенденцию к уменьшению с течением времени.

В ходе спектрального и гармонического анализа было выявлено, что присутствуют две значимые гармоники с периодами 5,4 года и 4 года.

Таким образом, проведенные анализы позволили сделать вывод о наличии отрицательного линейного тренда, указывающего на уменьшение площади льда в Чукотском море со временем, а также наличии двух значимых гармоник с периодами 5,4 года и 4 года.

С использованием кластерного анализа были выбраны три зимы: 1988-1989 гг., 1999-2000 гг. и 2013-2014 гг., которые были характеризованы как суровая, умеренная и мягкая соответственно. Затем была проведена оценка зависимости между ледовитостью и степенью суровости зим, измеряемой по сумме градусо-дней мороза.

Как ожидалось, было обнаружено прямое влияние степени суровости зимы на площадь льда. В суровые зимы отмечалась наибольшая площадь льда, в мягкие зимы - наименьшая, а в умеренные зимы значения площади

льда оставались в пределах между суровыми и мягкими зимами на протяжении всего временного промежутка.

Таким образом, проведенный анализ подтвердил зависимость между ледовитостью и степенью суровости зим, где более суровые зимы имели большую площадь льда, в то время как мягкие зимы характеризовались меньшей площадью льда. Умеренные зимы находились между этими крайними значениями.

## Список литературы

1. <https://neptune.gsfc.nasa.gov>.
2. <https://www.ncdc.noaa.gov/snow-and-ice/regional-sea-ice/time-series>
3. Атлас океанов. Северный ледовитый океан. М.: ГУНИО МО, 1980. 190
4. Библиотека климатических данных. [aisori.meteo.ru](http://aisori.meteo.ru).
5. Библиотека климатических данных. <http://iridl.ldeo.columbia.edu/>
6. Вайновский П. А., Малинин В. П. Методы обработки и анализа океанологической информации. Многомерный анализ. Учебное пособие. СПб., изд. РГГМИ, 1992.— 96 с.
7. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации» – СПб.: РГГМУ, 2010. – 74с.
8. Государственный научный центр "Арктический и антарктический научноисследовательский институт. URL: [www.aari.ru](http://www.aari.ru)
9. Дмитриев А.А. Динамика атмосферных процессов над морями Российской Арктики. СПб.: Гидрометиздат, 2000. 233 с
10. Карклин В.П. Квазидвухлетние влияния в изменениях ледовитости арктических морей // Труды ААНИИ. 1976. Т. 341. С. 119–142.
11. Ледяные образования морей западной арктики: Монография/Зубакин Г.К. – СПб : ААНИИ, 2006. 272 с.
12. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник.– СПб.: изд. РГГМУ, 2008. – 404 с.