



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)

**«Оценка изменчивости площади льда в Восточно-Сибирском море в
зависимости от суровости зимы»**

Исполнитель: Короткова Карина Сергеевна

Научный руководитель: Подрезова Надежда Алексеевна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Лукиянов Сергей Васильевич

(фамилия, имя, отчество)

« » 20 г.

г. Санкт-Петербург
2022 г.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Физико-географическое положение Восточно-Сибирского моря	4
1.1. Физико-географическое положение Восточно-Сибирского моря	4
1.2. Гидрометеорологический режим Восточно-Сибирского моря	5
1.3. Распределение солёности	6
1.4. Циркуляция вод.....	8
1.5. Ледовые условия в Восточно-Сибирском море	9
Глава 2. Описание методов исследования	11
2.1. Анализ тренда временного ряда	11
2.2. Гармонический анализ Фурье и спектр.....	12
2.3. Автокорреляция.....	15
2.4. Кластерный анализ.....	17
2.5. Сумма градусо-дней мороза	18
Глава 3. Результаты расчётов	19
3.1. Исходные данные.....	19
3.2. Расчет трендовой составляющей.....	20
3.3. Расчет гармонического анализа Фурье и спектра	23
3.4. Расчет автокорреляционного анализа	26
3.5. Расчет суммы градусо-дней мороза	29
3.6. Расчет кластерного анализа	31
Заключение	42
Список источников и литературы	43
Приложение А	46
Приложение Б.....	48

Введение

Арктическое судоходство все больше входит в число политических повесток дня благодаря ресурсам Северного-Ледовитого океана, его более коротким навигационным маршрутам и отсутствием пиратства. Однако холодная и суровая среда данной территории делает судоходство в этом регионе небезопасным.

Исходя из выше перечисленного, можно прийти к выводу о том, что исследование влияния метеорологических параметров, влияющих на нарастание площади льда, представляет большой интерес.

Целью работы является исследование влияния суровости зим на пространственно-временную изменчивость площади льда.

Задачами работы являются:

- Ознакомление с физико-географическими особенностями заданного района;
- Формирование временных рядов по ледовитости и температуре воздуха;
- Полный анализ этих временных рядов:
 - Анализ тренда временного ряда;
 - Спектральный и гармонический анализ;
 - Автокорреляционный анализ;
 - Расчет суммы градусо-дней мороза;
 - Кластерный анализ;
- Выделение классов суровости зим;
- Сравнение данных о площади льда и данных о температуре воздуха с целью нахождения зависимости.

Глава 1. Физико-географическое положение Восточно-Сибирского моря

1.1. Физико-географическое положение Восточно-Сибирского моря

Восточно-Сибирское море расположено между Новосибирскими островами и о. Врангеля. Проливы Этерикан, Дмитрия Лаптева и Санникова соединяют его с морем Лаптева на западе. На востоке пролив Лонга соединяет его с Чукотским морем. Условная северная граница совпадает с краем материкового шельфа. Восточная граница простирается по 180° меридиану до острова Врангеля, затем - по северо-западному берегу этого острова до мыса Блоссом и – по условной линии, соединяющей его с мысом Якан на арктическом побережье Чукотки. Южная граница проходит от мыса Святой нос до мыса Якан [1].

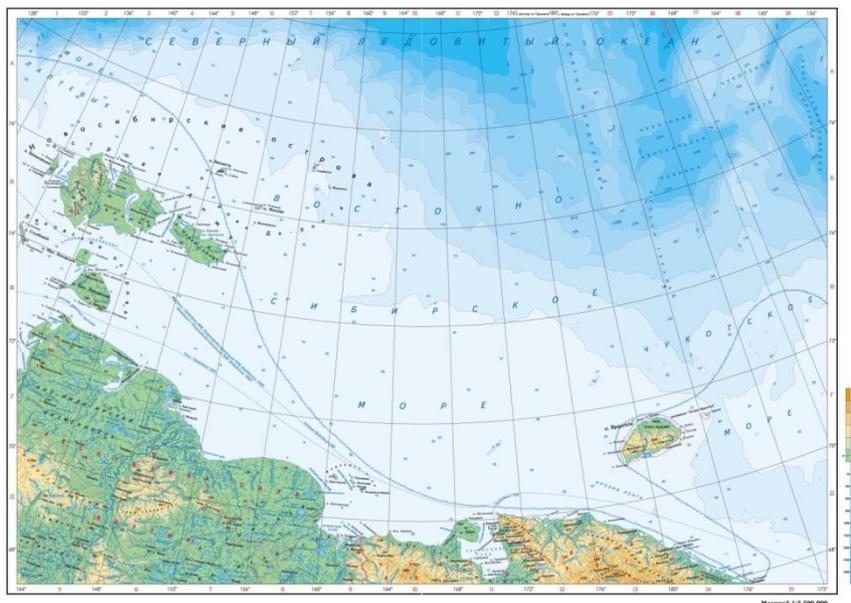


Рисунок 1.1. Восточно-Сибирское море на карте

Краткие характеристики Восточно-Сибирского моря:

- Тип - материковое окраинное;
- Площадь — 913 тыс. км²;

- Объем — 49 тыс. км³;
- Средняя глубина — 54 м;

Годовой сток речных вод – около 250 км³ [1].

1.2. Гидрометеорологический режим Восточно-Сибирского моря

Климат Восточно-Сибирского моря арктический. В зимний период сказывается влияние Сибирского максимума, который приносит холодные юго-западные и южные ветры, в то время как летом наблюдается преобладание ветров северных направлений. В феврале средняя температура воздуха колеблется от –28 до –30 °С (минимум –50 °С); в июле в южной части от 3 до 7 °С, в северной – от 0 до 2 °С. В летнее время погода пасмурная с мелким морозящим дождём, иногда мокрым снегом. В год выпадает 100–200 мм осадков [2].

Обратные связи усиливают современное потепление в арктических морях. Уменьшение ледовитости морских льдов приводит к уменьшению альбедо. Исследования Росгидромета показали, что продолжительность ледового периода в Восточно-Сибирском море уменьшилась на 40 суток, а ледовитость на 31% по сравнению с 1965-1975 годами. На изобатах 2...10 м произошли изменения среднегодовой температуры придонной воды и донных отложений – она повысилась до положительных значений (+0,2...0,3 °С). Исключением является зона припая (изобаты 0-2 м). В этом районе выхолаживание донных осадков происходит за счёт смерзания льда с дном. Это приводит к тому, что осадки в диапазоне температур -10...-12 °С и ниже. Потепление приводит к росту мощности оттаивающей части толщи донных многолетнемёрзлых пород (ММП) сверху. Увеличение объёма поступающего на подводный береговой склон дисперсионного материала происходит за счёт увеличения скорости отступления берегов. Большая часть этого материала расходуется на аккумуляцию [3].

Одной из специализаций региона является судоходство, так как через море проходит Северный морской путь. Основным морским портом является Певек. Также имеются порты Чокурдах и Зелёный мыс, расположенные в устьевых участках рек Индигирка и Колыма. Другими специализациями региона являются горнодобывающая промышленность, оленеводство, рыболовство и добыча цветных металлов [4]. В районе Певека находятся крупнейшие месторождения рудного золота – Майское, Купол, Каральвеем и Двойное. Вместе с тем известно большое количество перспективных золоторудных полей и узлов. В непосредственной близости к центру Певек, находятся крупнейшие в России месторождения олова (Пыркакайские штокверки) и меди (песчанка – Баимская рудная зона) [5].

Формирование ветров в Восточно-Сибирском море связано с общей циркуляцией атмосферы и местными особенностями: на море в зависимости от дрейфующего льда (отсутствие/наличие), а на суше сказывается влияние рельефа местности. Наблюдается движение ветра вдоль берегов в районах устьев рек, проливах и заливах. В открытом море, где нет никаких ограничивающих факторов, скорость ветра достигает 4-6 м/с. Наблюдается сезонность – летом скорость ветра больше, чем зимой. Как правило, повторяемость ветра от 15 м/с в открытом море и на большей прибрежной части моря мала. В некоторых пунктах штормовой ветер больше 20 м/с встречается всего 45, 48 и 65 дней в году. При скорости ветра 20-28 м/с достигается скорость сильных штормов. Зимой встречаются жестокие шторма и ураганы — 30 – 35 м/с. Местные особенности в районе порта Певек приводят к тому, что в отдельные периоды времени наблюдаются ветры скоростью 40 м/с [6].

1.3. Распределение солёности

Наблюдается повышение солёности на поверхности с юго-запада к северо-востоку. Вблизи устьев рек Колымы и Индигирки зимой и весной

составляет 4-5‰, далее у Медвежьих островов 24-26‰, к центру моря солёность увеличивается до 28-30‰ и достигает максимума (31-32‰) в северных окраинах. К уменьшению солёности приводит летний приток речных вод и таяние льдов. В результате в прибрежной зоне значения поверхностной солёности составляет 18-22‰, у Медвежьих островов 20-22‰ и 24-26‰ в северной части моря.

Зимнее вертикальное распределение на большей части моря показывает незначительное повышение солёности от поверхности до дна. Из-за проникновения океанских вод с севера наблюдается увеличение солёности с 23‰ в поверхностном слое до 30‰ у дна. Устья рек создают опреснённый слой толщиной 10-15 м, который подстилают более солёные воды. Талые воды с конца весны и в течение лета создают слой толщиной 20-25 м, далее с глубиной солёность увеличивается. Таким образом, в мелководных районах распределение охватывает всю толщу вод. В северных и восточных более глубоководных районах на горизонтах 5-10 м (местами 10-15 м) наблюдается резкое увеличение солёности, которое далее сменяется плавным и незначительным повышением до дна.

Плотность имеет сезонный ход. Как правило, осенью и зимой она выше, чем весной и летом. Опреснённые воды моря Лаптевых проникают с запада, тем самым понижая плотность (на севере и востоке она больше). Вертикальное распределение плотности схоже с ходом солёности.

Степень переслоенности вод влияет на условия для развития перемешивания. Таким образом, что на свободных ото льдов и слабо стратифицированных водах перемешивание происходит сильными ветрами на горизонтах до 20-25 м. Это говорит о том, что в районах до 25 м ветровое перемешивание достигает дна. Значительные вертикальные градиенты плотности ограничивают ветровое перемешивание. Это происходит в местах резкого расслоения вод по плотности. Тогда перемешивание происходит только до горизонтов 10-15 м.

В Восточно-Сибирском море 70% площади составляют глубины 40-50 м. Осенне-зимняя конвекция распространяется именно до этих глубин, таким образом, достигая дна. Большая вертикальная устойчивость вод ограничивает вертикальную циркуляцию. В Восточно-Сибирском море зимняя вертикальная циркуляция распространяется до горизонтов 70-80 м (к концу холодного сезона) [7].

1.4. Циркуляция вод

Материковый сток поступает в южную часть Восточно-Сибирского моря и составляет 250 км³/год. Из них на сток Колымы приходится 123 км³/год, Индигирки 58,3 км³/год. Около 90% стока поступает в летнее время. Основную часть моря составляют поверхностные арктические воды. В приустьевых районах происходит смешение речных и морских вод. Это оказывает влияние на температуру поверхностных вод зимой – в приустьевых районах она изменяется от –0,2 до –0,6 °С, а у северной границы моря от –1,7 до –1,8 °С. В летний период влияющим фактором является ледовая обстановка - в заливах и бухтах 7–8 °С, в свободных ото льда районах 2–3 °С, а у кромки льда около 0 °С.

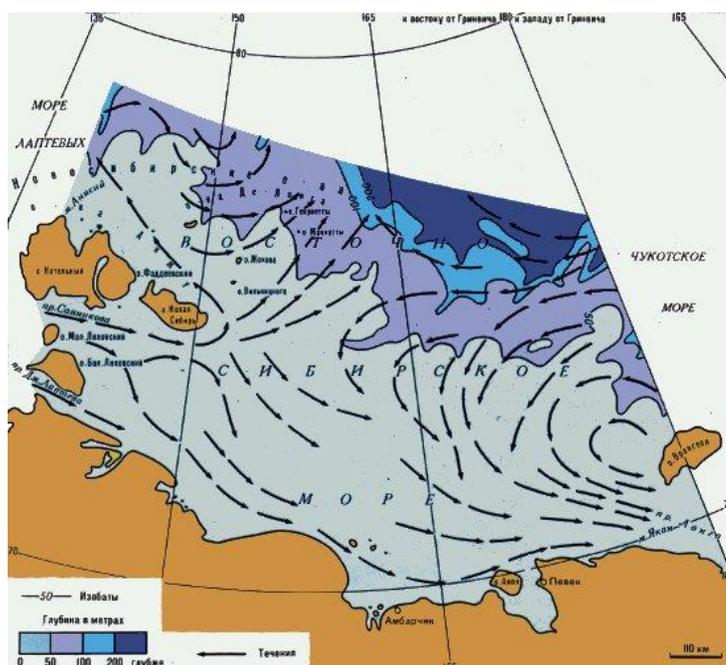


Рисунок 1.2 Схема постоянных течений в поверхностном слое моря

1.5. Ледовые условия в Восточно-Сибирском море

На протяжении всей зимы и по конец весны происходит нарастание ледяного покрова. Снежицы являются первыми признаками таяния. В Восточно-Сибирском море они появляются в начале июня в прибрежной зоне. Далее под влиянием радиационного тепла снежицы распространяются в северные районы моря. Большую часть площади к началу таяния ледяного покрова занимают толстые однолетние льды (толщиной более 120 см) – 80% и 65% в западной и восточной частях соответственно. В северо-западной (12%) и северо-восточной (30%) частях моря наблюдаются поступающие из Арктического бассейна старые льды (двухлетние и многолетние). Образующиеся в зонах заприпайных полыней однолетние тонкие (толщиной 30-70 см) и средние (толщиной 70-120 см) льды составляют незначительную часть [8].

Оба соседних моря оказывают влияние на Восточно-Сибирское море. Влияние моря Лаптевых сказывается на разрушении льда в начальный период (июнь, июль) – тренд положительный. В то время как Чукотское море влияет в заключительный период (сентябрь-ноябрь) – тренд отрицательный [9].

В осенне-зимний период стамухи способствуют становлению припая, а летом они задерживают его взлом и разрушение. В летний период восточная часть моря редко очищается ото льда. Как правило, в северной половине региона в начало периода нового ледообразования наблюдается остаточный лёд с включением многолетнего. В осенний период в мелководной прибрежной зоне образуются стамухи, которые впоследствии вмерзают в припай. В оставшейся части моря они образуются из местного и остаточного льда позднее. Наиболее торосистые и глубокосидящие льдины при дрейфе в сторону суши садятся на дно. При дальнейшем движении происходит нагромождение и набивание льда до дна [10].

Практически весь год море покрыто льдом. Летом в восточной части у берега наблюдаются плавучие льды. Припай является характерной особенностью района - к концу лета его толщина достигает 2 м. Наиболее

широко он распространён в западной мелководной части моря, где его ширина достигает 600–700 км; в центральных районах – 250–300 км, к востоку от мыса Шелагский занимает узкую прибрежную полосу 30–40 км. После припая наблюдаются дрейфующие льды – однолетние и двулетние. Их толщина 2 м. Дрейф обусловлен циркуляцией воздушных масс. Северный морской путь в западной части моря проходит по многолетней полынье. Она расположена между припаем и дрейфующими льдами. Полынья образуется отжимными ветрами и приливными течениями. В восточной части моря полынья закрывается. На севере наблюдается многолетний арктический лёд. Течения образуют циклонический круговорот. В северной и южной частях моря течение направлено в разные стороны – на запад и восток соответственно. Наблюдаются правильные полусуточные приливы с амплитудой колебаний уровня до 25 см [2].

Глава 2. Описание методов исследования

2.1. Анализ тренда временного ряда

Стационарность основных статистических характеристик во времени является одним из главных условий для применения большей части методов анализа. Особенно это относится к среднему значению и дисперсии исследуемого ряда. Именно для этого в первую очередь оценивается его стационарность. Если же она не выявляется, то необходимо привести ряд к стационарному виду.

При нестационарности ряда среднее значение и/или дисперсия могут иметь неравномерное распределение (скачкообразность) или непрерывно изменяться (тренд по математическому ожиданию или дисперсии).

Если в генеральной совокупности есть колебание, которое не охватывается длиной выборки, то оно представляется как тренд.

В результате тренд показывает наличие во временной изменчивости исследуемого параметра длиннопериодного колебания. Период данного колебания существенно превышает исходную длину выборки.

Положение выборки на длиннопериодном колебании определяет тип тренда: линейный или квадратичный (нелинейный).

Уравнение линейного тренда:

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

и нелинейного (квадратичного) тренда:

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

где t - время.

Коэффициент детерминации и величина тренда являются его главными характеристиками.

Вклад тренда в дисперсию ряда показывает коэффициент детерминации r^2 (линейный тренд) и n^2 (нелинейный). При проверке на значимость коэффициента корреляции (r и n) выявляется значимость или не значимость вклада тренда. Если r (или n) не значимы, то тренда нет.

На линейном тренде для определения изменения параметров за конкретный промежуток времени используется величина тренда. Она соответствует коэффициенту a_1 . Размерность аналогична параметру y за единицу дискретности. Для среднемесячных рядов находится за год, а для среднегодовых за 10 лет.

Если при проверке присутствуют и линейный, и квадратичный тренды, то следует обратить на их вклад в дисперсию выборки. Предпочтение следует отдавать наибольшему из них.

В дальнейшем анализе тренд не учитывается и его необходимо удалить. Для этого из исходного ряда вычитаются значения, найденные по тренду.

2.2. Гармонический анализ Фурье и спектр

Внутренняя структура выборки может иметь некоторое количество циклических составляющих. Самые выделяющиеся показываются в автокорреляционной функции.

Циклические составляющие позволяет выявить спектральный или гармонический анализ. Для этого можно не рассчитывать автокорреляционную функцию.

Гармонический анализ предполагает, что любой ряд можно разложить на конечное количество гармоник. Гармоники – это тригонометрические функции с периодом, аликвотным длине ряда.

Формула гармоник:

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

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

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

Полное разложение в ряд Фурье предполагает определение гармоник количеством $N/2$.

Каждая из гармоник нумеруется. При увеличении номера гармоники происходит уменьшение её периода. Таким образом, у первой гармоники период соответствует длине ряда N , затем G_2 имеет период $N/2$; G_3 - $N/3$ и т.д.

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:

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

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

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

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

где D_y - дисперсия исходного ряда.

Наибольшее отклонение параметра от среднего значения в выбранном периоде показывает амплитуда гармоники.

Аналогом коэффициента детерминации r^2 является вклад дисперсии гармоники в общую дисперсию ряда. Таким образом, для него необходимо также делать проверку на значимость.

При последующей подстановке характеристик в формулу гармоники находятся её значения на любой момент времени.

Статистические программы используют метод быстрого преобразования Фурье. Однако при этом происходит потеря некоторых характеристик гармоник. В данной работе использовалась программа «Past3» (существуют ещё «Statistica», «SPSS» и т.п). Результат представляет собой периодограмму (зависимость гармонических компонент от их частоты). «Пики» на графике спектра представляют гармоники с большей дисперсией.

Как правило, в большинстве исследований весьма хватает выделить частоты, для которых указываются пики периодограммы.

Когда необходимо восстановить исходный процесс по значимым гармоникам приходится использовать гармонический анализ на основе рассчитанной периодограммы. Для этого по полученным таблицам и графикам определяют периоды для пиков спектра. Далее рассчитываются характеристики гармоник, составить для них уравнения и составить ряды найденных гармоник. Для получения восстановленного ряда необходимо сложить эти ряды.

2.3. Автокорреляция

Процесс корреляции ряда самого с собой с разными сдвигами во времени называется автокорреляцией. Автокорреляционная функция представляет собой график зависимости r от сдвига (τ).

При проведении расчётов временной ряд можно сдвигать как вперед, так и назад. Автокорреляционная функция одинакова с обеих сторон, так как ряд один и тот же.

Коэффициент автокорреляции на каждом сдвиге можно найти по формуле

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

Где N – длина реализации, τ – сдвиг, который меняется от 1 до максимума. Длина АКФ (наибольшее число сдвигов) зависит от длины ряда N : если ряд короткий (N порядка 30) $\tau_{\max} = N/3$; если ряд длинный (N порядка 1000) $\tau_{\max} = N/10$. Таким образом, чем длиннее ряд, тем меньшую долю составляет количество сдвигов.

Из-за того что автокорреляционная функция является объединением коэффициентов корреляции необходимо провести проверку на значимость каждый из них.

Проверка по критерию Стьюдента нулевой гипотезы $H_0: r = 0$ помогает сократить работу. Необходимо решить квадратное уравнение относительно r и рассчитать критическое значение $r_{\text{кр}}$, соответствующее $t_{\text{кр}}$ при уровне значимости α и числе степеней свободы $\nu = N - \tau - 1$

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

где N – длина реализации, τ – сдвиг АКФ; $t_{\text{кр}}(\alpha, \nu = N - \tau - 1)$ – критерий Стьюдента.

На график автокорреляционной функции наносятся значения $r_{\text{кр}}$ для каждого сдвигав обеих областях r . Таким образом, можно легко определить

значимые АКФ – они будут превышать (по модулю) $r_{кр}$, а не превышающие – случайно отличаться от нуля.

Анализ АКФ

Анализ автокорреляционной функции позволяет сделать выводы о:

- Инерционности процесса

Сдвиг при первом пересечении функцией нуля называется радиусом корреляции ($\tau_{кр}^2$). Позволяет найти инерционность процесса. Она позволяет оценить долгосрочность сохранения параметром предыдущего состояния. Тогда процессы разделяют на малоинерционные ($\tau_{кр}^2=1-2$) и инерционные ($\tau_{кр}^2>4-5$).

- Периодичности процесса

В локальных максимумах на автокорреляционной функции находят отражение циклические колебания. Количество значимых локальных максимумов соответствует количеству периодических составляющих. Сдвиг автокорреляционной функции соответствующий локальному максимуму позволяет определить период циклического колебания. Значимые локальные максимумы на аликвотных сдвигах говорят о наличии в исходном ряду гармоника с периодом, эквивалентным сдвигу первого локального максимума.

- Типе процесса

Форма автокорреляционной функции позволяет узнать тип процесса. Выделяют следующие процессы:

– «белый шум» - является абсолютно случайным процессом (набор чисел не коррелированных между собой). На всех сдвигах, кроме $\tau = 0$, значения автокорреляционной функции равны нулю;

– простая цепь Маркова I порядка – автокорреляционная функция имеет значимый коэффициент автокорреляции на сдвиге $\tau = 1$. Для процесса свойственна связь с предыдущим состоянием. Совпадает с теоретической моделью «красный шум»;

– «красный шум» - имеет на первом сдвиге значимый коэффициент автокорреляции, а на всех оставшихся она равна нулю. Показывает процесс с высокой инерционностью (более 5 единиц дискретности) и периодичность сравнимую с длиной ряда. В автокорреляционной функции отмечается радиус корреляции > 5 ;

– циклический (квазигармонический) процесс – процесс с устойчивым периодическим колебанием.

В отдельных случаях наблюдается смешанный тип (например, простая цепь Маркова + квазигармонический процесс).

- **Возможности автопрогноза**

Значимые коэффициенты автокорреляции на сдвигах кроме нуля наблюдаются на всех формах автокорреляционной функции, кроме «белый шум». Это даёт возможность сделать автопрогноз. Сдвиг со значимым коэффициентом автокорреляции определяет заблаговременность автопрогноза [13].

2.4. Кластерный анализ

Кластерный анализ представляет собой совокупность методов, которые используются для разбиения объектов в однородные группы (кластеры). Элементы находящиеся в одной группе максимально похожи, а сами группы должны иметь самые большие отличия. Поэтому можно считать, что классификация – это эффективное средство выделения наиболее важных особенностей исходных объектов и обобщение наших представлений о них [14], [15].

Далее необходимо выбрать метод кластеризации – способ вычисления расстояния между кластерами. Основные из них:

- Межгрупповая связь;
- Внутригрупповая связь;
- Ближайший сосед;

- Самый дальний сосед;
- Центроидная кластеризация;
- Медианная кластеризация;
- Метод Варда (Уорда).

В данной работе самым оптимальным был выбран метод Варда. Для всех наблюдений производится расчёт средних значений отдельных переменных. Далее необходимо найти квадраты евклидовых расстояний от отдельных наблюдений каждого кластера до среднего значения. Полученные дистанции нужно сложить. Затем в один кластер сводятся кластеры с наименьшим приростом суммы дистанций [15].

2.5. Сумма градусо-дней мороза

Сумма градусо-дней мороза отсчитывается с момента осеннего устойчивого перехода температуры атмосферы через «0» в сторону отрицательных значений.

Рассчитывалась по формуле:

$$\Sigma(-T_a) \quad (2.13)$$

где T_a – температура атмосферы.

Глава 3. Результаты расчётов

3.1. Исходные данные

Районом исследования было выбрано Восточно-Сибирское море, данные по ледовитости были выбраны на портале National Centers for Environmental Information, данные по температуре воздуха были выбраны на сайтах aisoru.meteo.ru и «Погода и климат» на следующих станциях (табл. 3.1):

Таблица 3.1. Выбранные метеорологические станции в Восточно-Сибирском море.

№ п/п	Индекс	Название
1	21432	Остров Котельный
2	21982	Остров Врангеля
3	25034	Бухта Амбарчик
4	25042	Айон Остров
5	25062	Мыс Биллингс
6	25051	Певек

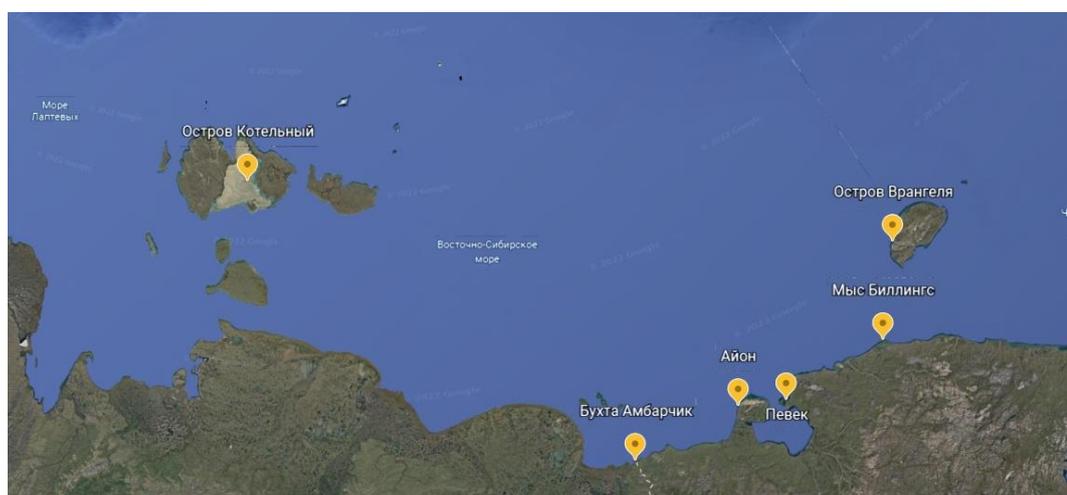


Рисунок 3.1. Расположение выбранных станций на карте.

Период сбора данных 43 года (с 1979 по 2022 года). Данные по ледовитости из ежемесячных были переведены в среднегодовые. В данных на метеорологических станциях наблюдались пропуски. Для их заполнения был рассчитан среднеклиматический год (среднее значение температуры воздуха за

первое января, отдельно за второе и тд). Затем из этого рассчитанного ряда были взяты недостающие данные.

Далее для оценки изменения площади льда в Восточно-Сибирском море были произведены расчёты тренда, выполнены гармонический, спектральный и автокорреляционный анализы.

3.2. Расчет трендовой составляющей

Было сформулировано уравнение линейного тренда для ледовитости (K) и времени (t): $S = -0,006t + 1,275$.

Затем была проведена проверка коэффициентов регрессии (a и b) и коэффициента детерминации (r^2).

Таблица 3.2. Характеристики линейного тренда среднегодового ряда.

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,794
R-квадрат	0,630
Нормированный R-квадрат	0,621
Стандартная ошибка	0,061
Наблюдения	43

<i>Дисперсионный анализ</i>					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	1	0,258	0,258	69,781	2,178E-10
Остаток	41	0,152	0,004		
Итого	42	0,410			

	<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>
У-пересечение	1,275	0,019	67,508	1,18E-43	1,237	1,313	1,237	1,313
ti	-0,006	0,001	-8,353	2,18E-10	-0,008	-0,005	-0,008	-0,005

Выполним проверку коэффициента корреляции на значимость. Для этого: $H_0: r = 0$ и $H_1: r \neq 0$. Далее рассчитываем критерий Стьюдента и сравниваем с $t_{кр}$. $t^*=13,73$ при $t_{кр}=2,02$. $t^* > t_{кр}$ предполагается, что нулевая гипотеза отвергается, т.е. коэффициент корреляции *значим*, т.е. тренд есть.

Выполним проверку коэффициентов регрессии на значимость:

$H_0: a_1 = 0; a_0=0$ при $H_1: a_1 \neq 0, a_0 \neq 0$. Далее рассчитываем критерий Стьюдента и сравниваем с $t_{кр}$.

$t_{кр}=2,02$ для всех значений a .

$a_1 = 8,353$. Это значение больше $t_{кр}$, таким образом нулевая гипотеза отвергается, коэффициент регрессии значим;

$a_0= 67,508$ – больше $t_{кр}$, нулевая гипотеза отвергается, коэффициент регрессии значим.

Таким образом, можно сделать вывод, что наблюдается линейный тренд. Величина тренда равна коэффициенту a_1 линейного тренда и составляет $-0,006$ млн. км²/год. Следовательно величина тренда $T_r = -0,06$ млн. км²/10 лет.

Было сформулировано уравнение нелинейного тренда для ледовитости (S) и времени (t): $S = -0,00007t^2 - 0,003t + 1,254$

Таблица 3.3. Характеристики нелинейного тренда среднегодового ряда.

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,799
R-квадрат	0,638
Нормированный R-квадрат	0,620
Стандартная ошибка	0,061
Наблюдения	43

Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	0,262	0,131	35,298	1,467E-09
Остаток	40	0,148	0,004		
Итого	42	0,410			

	<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								
e	1,254	0,029	42,916	0,000	1,195	1,313	1,195	1,313
ti	-0,003	0,003	-1,104	0,276	-0,010	0,003	-0,010	0,003
t^2i	-0,00007	0,000	-0,965	0,340	-2,02E-04	7,12E-05	-2,02E-04	7,12E-05

Выполним проверку коэффициента корреляции на значимость. Для этого: $H_0: r = 0$ и $H_1: r \neq 0$. Далее рассчитываем критерий Стьюдента и сравниваем с $t_{кр}$. $t^* = 14,14$ при $t_{кр} = 2,02$. $t^* > t_{кр}$ предполагается, что нулевая гипотеза отвергается, т.е. коэффициент корреляции *значим*, т.е. тренд есть.

Выполним проверку коэффициентов регрессии на значимость:

$H_0: a_2 = 0; a_1 = 0; a_0 = 0$ при $H_1: a_2 \neq 0, a_1 \neq 0, a_0 \neq 0$. Далее рассчитываем критерий Стьюдента и сравниваем с $t_{кр}$.

$t_{кр} = 2,02$ для всех значений a .

$a_2 = 0,965$. Это значение меньше $t_{кр}$, таким образом нулевая гипотеза принимается, коэффициент регрессии незначим;

$a_1 = 1,104$. Это значение меньше $t_{кр}$, таким образом нулевая гипотеза принимается, коэффициент регрессии незначим;

$a_0 = 42,916$ – больше $t_{кр}$, нулевая гипотеза отвергается, коэффициент регрессии значим.

Таким образом, можно сделать вывод, что нелинейного тренда нет.

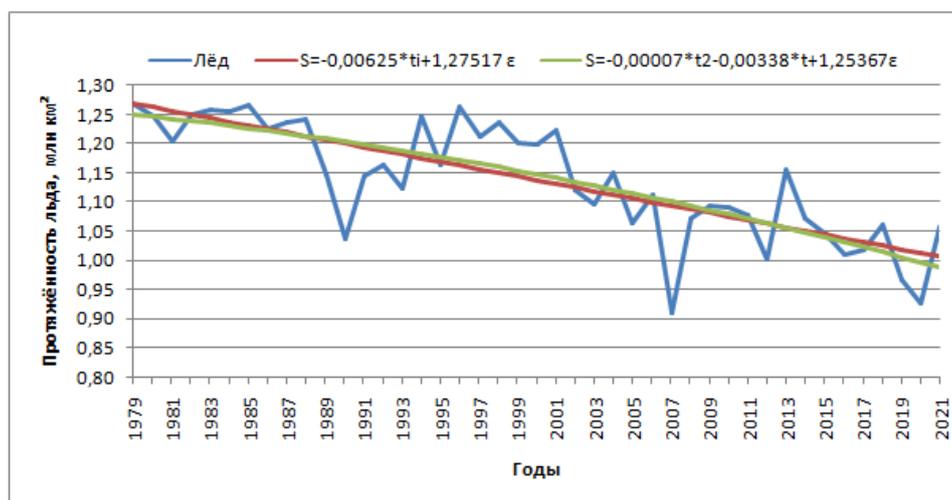


Рисунок 3.2. Среднегодовой ход ледовитости и ее линейный и нелинейный тренды в Восточно-Сибирском море.

Рисунок 3.2 показывает среднегодовой ход изменения площади ледяного покрова в Восточно-Сибирском море. Видно, что он имеет тенденцию уменьшаться со временем. Минимум пришёлся на 2007 год, а максимум на 1985 год.

3.3. Расчет гармонического анализа Фурье и спектра

В предыдущем подразделе было выяснено, что для ряда среднегодового хода ледовитости найден линейный тренд, поэтому для начала он был удалён и в результате найден ряд отклонений. Для полученного ряда строим в программе «PAST 3» периодограмму.

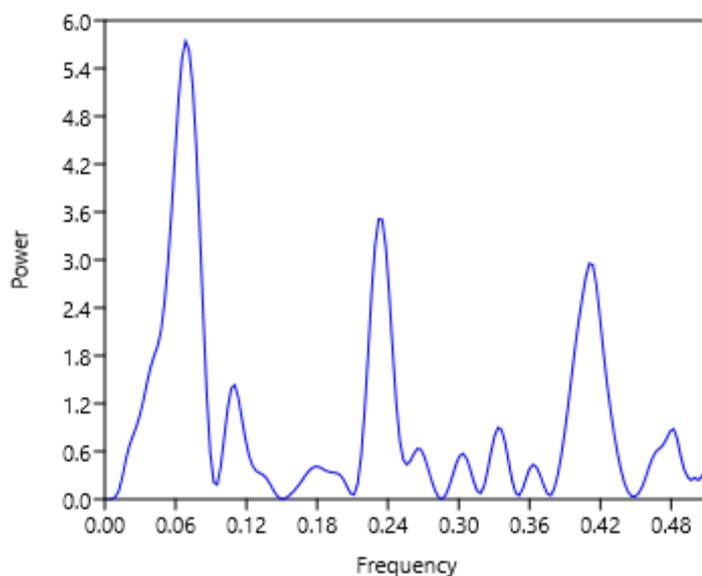


Рисунок 3.3. Спектр для среднегодового ряда ледовитости.

Для дальнейших расчетов были отобраны пять максимальных пиков.

Таблица 3.4. Характеристики гармоник.

	G1	G2	G3	G4	G5
ω лет ⁽⁻¹⁾	0,06845	0,11012	0,23214	0,41071	0,48214
T, лет	15	9	4	2	2
ωk , рад/год	0,43	0,69	1,46	2,58	3,03
a_k	0,026	-0,018	0,034	0,003	-0,012
b_k	-0,04	0,01	0,00	-0,03	-0,01
A_k	0,04	0,02	0,03	0,03	0,02
ϕ рад	2,51	-0,96	1,43	3,04	0,91
ϕ год	5,85	-1,4	1,0	1,2	0,3
D_k	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
V_k	0,266	0,066	0,163	0,133	0,034
σ	0,11	0,15	0,13	0,14	0,15
t^*	4,49	1,76	3,08	2,69	1,23
Dу(откл)	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
ткр	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02
Dу(исх ряд)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Далее производится проверка гармоник на значимость, для этого выбирается критерий Стьюдента и рассчитывается его критическое значение.

1 гармоника: $\sigma_r=0,11$, $t^*=4,49$, $t_{кр}=2,02$. Так как $t^*>t_{кр}$, можно сделать вывод, что нулевая гипотеза отвергается, соответствующий коэффициент регрессии значим. Гармоника вносит значительный вклад в дисперсию ряда отклонений. $G_1=0,04*\cos(0,43*t_i-2,51)$, период 15 лет, амплитуда 0,04 млн. км².

2 гармоника: $\sigma_r=0,15$, $t^*=1,75$, $t_{кр}=2,02$. Так как $t^*<t_{кр}$, можно сделать вывод, что нулевая гипотеза принимается, соответствующий коэффициент регрессии не значим. Гармоника вносит незначительный вклад в дисперсию ряда отклонений.

3 гармоника: $\sigma_r=0,16$, $t^*=3,08$, $t_{кр}=2,02$. Так как $t^*>t_{кр}$, можно сделать вывод, что нулевая гипотеза отвергается, соответствующий коэффициент регрессии значим. Гармоника вносит значительный вклад в дисперсию ряда отклонений. $G_1=0,03*\cos(1,46*t_i-1,43)$, период 4 года, амплитуда 0,03 млн. км².

4 гармоника: $\sigma_r=0,14$, $t^*=2,69$, $t_{кр}=2,02$. Так как $t^*>t_{кр}$, можно сделать вывод, что нулевая гипотеза отвергается, соответствующий коэффициент регрессии значим. Гармоника вносит значительный вклад в дисперсию ряда отклонений. $G_1=0,03*\cos(2,58*t_i-3,04)$, период 2 года, амплитуда 0,03 млн. км².

5 гармоника: $\sigma_r=0,15$, $t^*=1,23$, $t_{кр}=2,02$. Так как $t^*<t_{кр}$, можно сделать вывод, что нулевая гипотеза принимается, соответствующий коэффициент регрессии не значим. Гармоника вносит незначительный вклад в дисперсию ряда отклонений.

По полученным данным строим совмещённый график исходных и восстановленных (сумма гармоник, которая находится по формуле $G=G_1+G_3+G_4$) значений ледовитости.

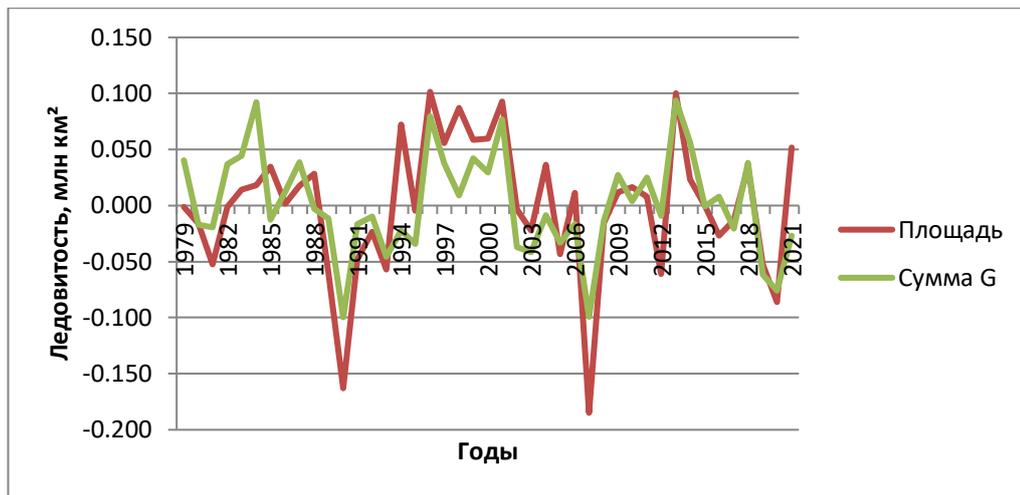


Рисунок 3.3. Совмещенный график исходных значений ледовитости и восстановленных по формулам гармоник.

Можно отметить, что график достаточно точно повторяет ход исходных значений.

3.4. Расчет автокорреляционного анализа

Для дальнейших расчётов необходимо из ряда отклонений вычесть циклические колебания (гармоники). В результате получаем нециклические колебания и шум.

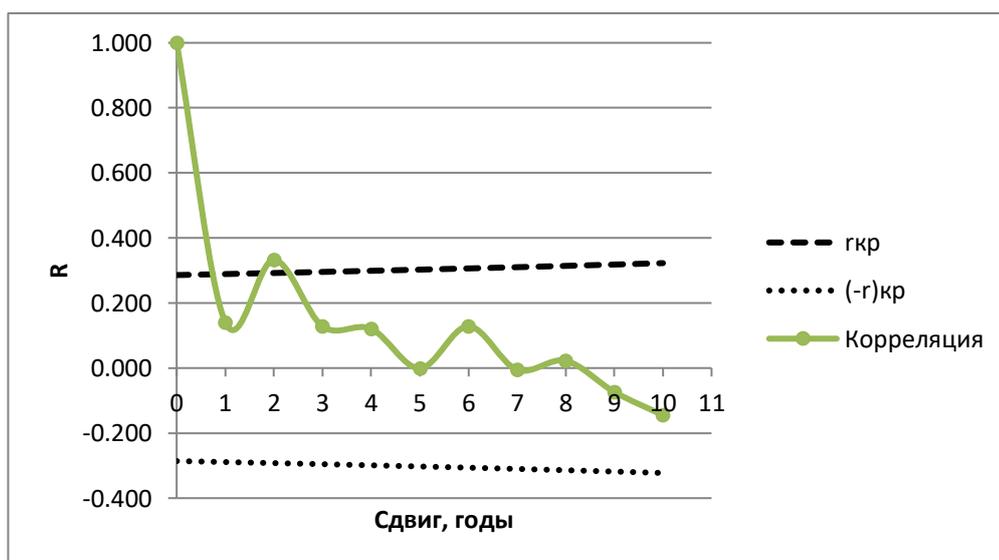


Рисунок 3.4. Автокорреляционная функция межгодовой изменчивости.

При анализе АКФ можно сделать следующие выводы:

1. Инерционность процесса

Инерционность процесса определяется по радиусу корреляции. Радиус корреляции $\tau_{\text{кор}}^2$ – это сдвиг при первом пересечении функцией нуля. Для исследуемого ряда – радиус корреляции равен 5 годам. Процесс инерционный, так как $\tau_{\text{кор}}^2=4-5$. Инерционность процесса показывает, насколько долго характеристика сохраняет свое предыдущее состояние.

2. Периодичность процесса

Если в исследуемом процессе присутствуют циклические колебания, то они отражаются на АКФ в виде локальных максимумов. Сколько выявляется значимых локальных максимумов, столько и периодических составляющих присутствует в процессе. Тогда период циклического колебания определяется по сдвигу АКФ, соответствующему локальному максимуму. На рисунке 1.4 выявляется один локальный максимум, характеризующий наличие в исследуемом процессе колебания с периодом 2 года.

3. Тип процесса

На рисунке 1.4 выделяется смешанный тип (белый шум + циклические колебания). Характеризует процесс с устойчивым ярко выраженным периодическим колебанием. Значения АКФ равны нулю на всех сдвигах, кроме $\tau = 0$ и $\tau = 2$;

4. Возможность автопрогноза

Наблюдается один значимый коэффициент корреляции, тогда можно сделать прогноз с заблаговременностью 2 года. Уравнение имеет вид: $S_{i+2} = 0,347S_i + 0,0007$.

Таблица 3.5. Расчет модели

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,333
R-квадрат	0,111
Нормированный R-квадрат	0,088
Стандартная ошибка	0,038
Наблюдения	41

<i>Дисперсионный анализ</i>					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	1	0,007	0,007	4,860	0,033
Остаток	39	0,055	0,001		
Итого	40	0,062			

	<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>
У-пересечение	0,0007	0,006	0,122	0,904	-0,011	0,013	-0,011	0,013
Переменная X 1	0,347	0,157	2,205	0,033	0,029	0,665	0,029	0,665

Качество линейной регрессии определяется по параметрам модели линейной регрессии:

1. Коэффициенты регрессии и их значимость

$$t^*a_1=2,205, t^*a_0=0,122, t_{кр}=2,02.$$

$t^*a_1 > t_{кр}$ нулевая гипотеза отвергается, соответствующий коэффициент регрессии значим.

$t^*a_0 < t_{кр}$ нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу, соответствующий коэффициент регрессии не значим.

2. Коэффициент детерминации r^2 показывает долю дисперсии исходного ряда, которая описывается моделью регрессии и равен квадрату коэффициента корреляции. В данном случае $r^2=0,11$.

3. Адекватность регрессивной модели исходным данным.
 $F^*=4,860$, $F_{кр}=4,09$. $F^*>F_{кр}$ - нулевая гипотеза отвергается, регрессионная модель адекватна.

4. Стандартная (среднеквадратическая) ошибка модели. Для полученных в ходе работы данных $\sigma_E = 0,038$ °С.

В результате можно сделать вывод о том, что полученная модель адекватна, но независимых переменных недостаточно для описания дисперсии исходного ряда.

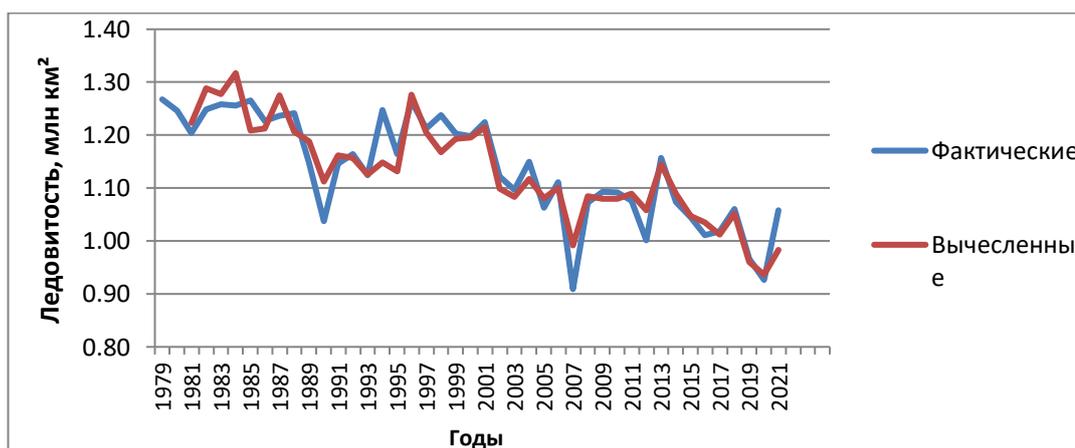


Рисунок 3.5. Совмещенный график исходных данных и вычисленной модели.

Из графика видно, что модель и исходные данные имеют общий ход, но можно заметить расхождения в данных.

3.5. Расчет суммы градусо-дней мороза

Для определения критериев суровости зим в период с 1979 по 2022 года были рассчитаны суммы градусо-дней мороза (СГДМ). Также это необходимо сделать для кластерного анализа.

Таблица 3.6 СГДМ на выбранных десяти станциях с 1979 по 2022 гг.

Год\Станция	21432	21982	25034	25042	25062	25051
1979-1980	-6075,50	-4316,20	-5371,40	-5431,20	-5330,10	-4720,55
1980-1981	-5107,30	-4101,30	-4925,10	-4992,00	-4835,90	-4685,48
1981-1982	-5376,90	-4201,00	-5036,00	-4892,50	-4649,60	-4181,65
1982-1983	-5417,30	-4265,30	-5346,10	-5257,50	-4893,70	-4596,29
1983-1984	-5675,70	-4672,70	-5518,50	-5589,10	-5397,20	-5238,49
1984-1985	-5523,10	-4335,60	-4966,20	-4966,40	-4668,30	-4378,21
1985-1986	-5438,30	-4265,70	-4955,60	-4915,00	-4762,40	-4248,40
1986-1987	-5823,00	-4319,10	-5146,10	-5114,60	-5116,30	-4756,40
1987-1988	-5875,00	-4355,50	-5441,70	-5328,40	-5254,10	-4681,22
1988-1989	-5389,00	-4034,40	-4836,90	-4812,90	-4595,90	-4391,40
1989-1990	-5255,00	-4003,30	-4576,00	-4622,40	-4444,30	-4071,00
1990-1991	-5511,30	-4022,80	-5167,50	-4936,80	-4727,40	-4481,50
1991-1992	-5387,60	-3997,60	-4967,30	-4663,00	-4398,77	-4075,10
1992-1993	-5857,90	-4139,80	-5336,30	-5017,60	-4769,30	-4066,08
1993-1994	-5739,80	-4274,00	-5352,50	-5183,00	-5152,70	-4066,08
1994-1995	-5181,00	-4389,60	-4855,00	-5024,30	-5127,16	-4066,08
1997-1996	-5117,90	-3319,20	-4550,90	-4104,80	-3708,95	-4075,10
1996-1997	-5597,40	-3751,30	-4667,00	-4586,00	-4125,50	-4066,08
1997-1998	-5596,00	-4014,30	-5618,80	-5566,70	-5179,20	-4066,08
1998-1999	-5764,90	-4213,40	-5706,30	-5364,00	-4668,70	-4403,77
1999-2000	-5407,00	-4096,80	-4851,90	-5122,40	-4603,54	-4531,81
2000-2001	-5361,68	-4077,60	-4787,56	-4761,50	-4440,45	-4358,06
2001-2002	-5684,00	-3821,10	-4721,80	-4634,10	-4253,31	-4243,08
2002-2003	-4964,34	-3712,30	-4539,60	-4301,70	-4253,60	-3894,23
2003-2004	-5163,20	-3728,10	-4632,90	-4411,30	-4256,10	-4056,20
2004-2005	-5402,10	-3558,40	-5248,30	-4941,50	-4677,60	-4246,94
2005-2006	-4880,20	-3821,20	-4892,39	-4647,50	-4522,80	-4310,20
2006-2007	-4828,50	-3356,77	-4333,70	-4069,20	-3937,90	-3699,80
2007-2008	-4801,40	-3437,60	-4523,80	-4167,90	-4118,30	-3611,90
2008-2009	-5091,10	-3648,50	-4601,40	-4456,80	-4330,50	-3953,50
2009-2010	-4666,60	-3609,80	-4957,70	-4423,20	-4290,30	-4002,60
2010-2011	-4452,30	-3153,60	-4146,80	-3936,20	-3801,30	-3462,50
2011-2012	-4735,10	-3728,40	-5054,30	-4975,30	-4993,70	-4557,80
2012-2013	-4822,70	-3631,90	-4201,70	-4123,00	-4171,90	-3443,60
2013-2014	-4564,00	-3343,10	-4468,50	-4327,30	-3983,43	-3745,90
2014-2015	-5003,10	-3275,60	-4563,50	-4273,30	-3920,61	-3785,10
2015-2016	-4768,00	-3420,70	-4826,90	-4579,80	-4313,90	-4304,10
2016-2017	-4308,90	-2789,90	-3658,70	-3375,10	-3120,20	-2824,50
2017-2018	-4666,80	-2639,20	-3904,80	-3636,90	-3283,20	-3192,80
2018-2019	-4612,50	-3148,80	-4579,50	-4426,30	-4300,65	-4069,86
2019-2020	-4344,80	-3030,60	-4213,40	-4030,00	-3676,70	-3656,50
2020-2021	-4310,00	-3282,40	-4263,48	-3962,60	-3760,70	-3533,00
2021-2022	-4466,10	-3775,30	-4538,70	-4325,10	-4239,20	-3792,30

3.6. Расчет кластерного анализа

Кластерный анализ проводился по шести метеорологическим станциям, расположенных в районе Восточно-Сибирского моря для разделения зим на 3 класса – мягкая, умеренная и суровая. Ниже приведены три наиболее крупные станции (о. Котельный, бухта Амбарчик и Певек). Оставшиеся станции (о. Врангеля, о. Айон и мыс Биллингс) находятся в Приложении А и Приложении Б.

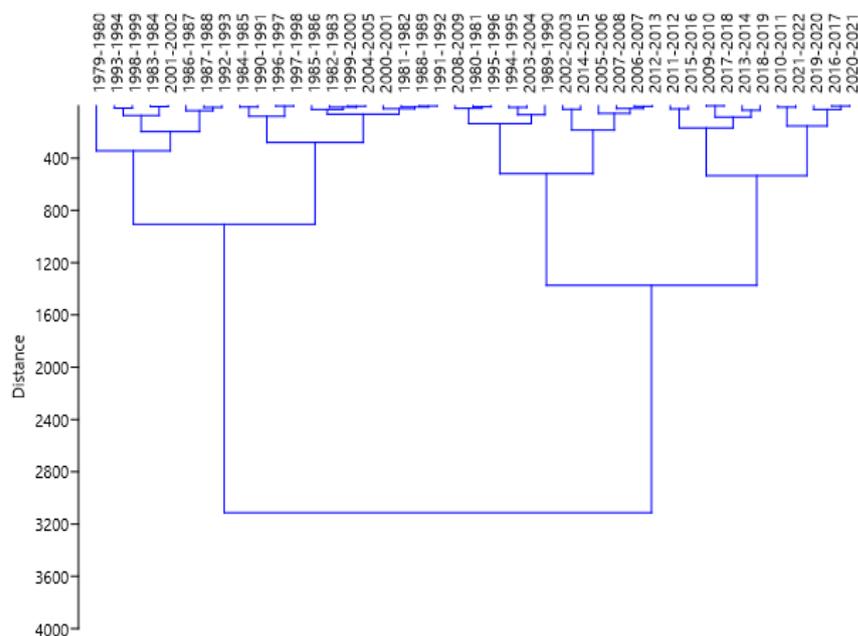


Рисунок 3.6. Дендрограмма станции о. Котельный.

Таблица 3.6. СГДМ по степеням суровости на станции о. Котельный

Мягкая		Умеренная		Суровая	
1980-1981	-5107,30	1981-1982	-5376,90	1979-1980	-6075,5
1989-1990	-5255,00	1982-1983	-5417,30	1983-1984	-5675,70
1994-1995	-5181,00	1984-1985	-5523,10	1986-1987	-5823,00
1995-1996	-5117,90	1985-1986	-5438,30	1987-1988	-5875,00
2002-2003	-4964,34	1988-1989	-5389,00	1992-1993	-5857,90
2003-2004	-5163,20	1990-1991	-5511,30	1993-1994	-5739,80
2005-2006	-4880,20	1991-1992	-5387,60	1998-1999	-5764,90
2006-2007	-4828,50	1996-1997	-5597,40	2001-2002	-5684,00
2007-2008	-4801,40	1997-1998	-5596,00		
2008-2009	-5091,10	1999-2000	-5407,00		
2009-2010	-4666,60	2000-2001	-5361,68		
2010-2011	-4452,30	2004-2005	-5402,10		
2011-2012	-4735,10				
2012-2013	-4822,70				
2013-2014	-4564,00				
2014-2015	-5003,10				
2015-2016	-4768,00				
2016-2017	-4308,90				
2017-2018	-4666,80				
2018-2019	-4612,50				
2019-2020	-4344,80				
2020-2021	-4310,00				
2021-2022	-4466,10				

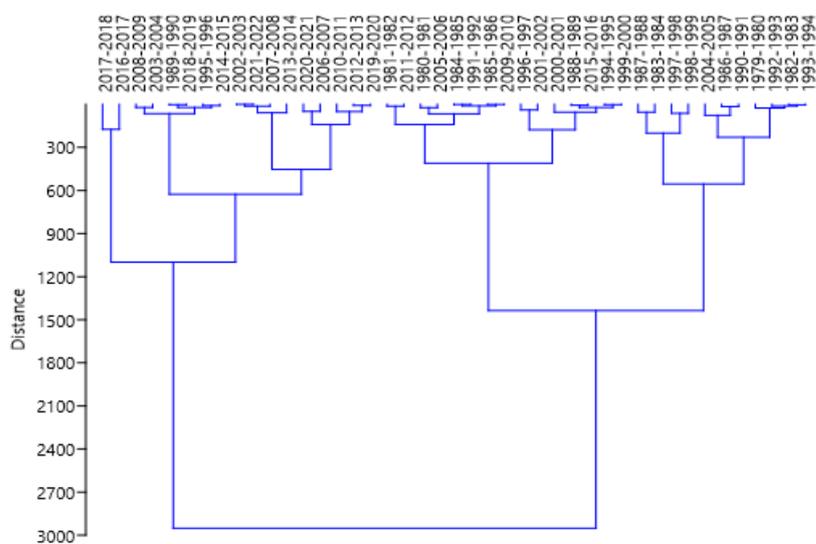


Рисунок 3.7. Дендрограмма станции бухта Амбарчик

Таблица 3.8. СГДМ по степеням суровости на станции бухта Амбарчик

Мягкая		Умеренная		Суровая	
1989-1990	-4576,00	1980-1981	-4925,10	1979-1980	-5371,40
1995-1996	-4550,90	1981-1982	-5036,00	1982-1983	-5346,10
2002-2003	-4539,60	1984-1985	-4966,20	1983-1984	-5518,50
2003-2004	-4632,90	1985-1986	-4955,60	1987-1988	-5441,70
2006-2007	-4333,70	1986-1987	-5146,10	1992-1993	-5336,30
2007-2008	-4523,80	1988-1989	-4836,90	1993-1994	-5352,50
2008-2009	-4601,40	1990-1991	-5167,50	1997-1998	-5618,80
2010-2011	-4146,80	1991-1992	-4967,30	1998-1999	-5706,30
2012-2013	-4201,70	1994-1995	-4855,00		
2013-2014	-4468,50	1996-1997	-4667,00		
2014-2015	-4563,50	1999-2000	-4851,90		
2016-2017	-3658,70	2000-2001	-4787,56		
2017-2018	-3904,80	2001-2002	-4721,80		
2018-2019	-4579,50	2004-2005	-5248,30		
2019-2020	-4213,40	2005-2006	-4892,39		
2020-2021	-4263,48	2009-2010	-4957,70		
2021-2022	-4538,70	2011-2012	-5054,30		
		2015-2016	-4826,90		

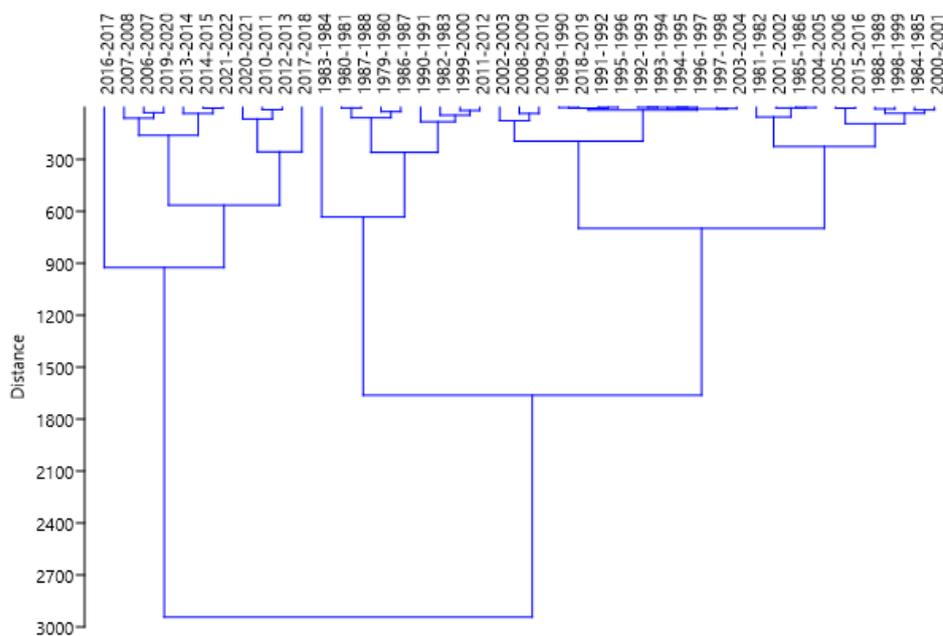


Рисунок 3.8. Дендрограмма станции Певек

Таблица 3.9. СГДМ по степеням суровости на станции Певек

Мягкая		Умеренная		Суровая	
2006-2007	-3699,80	1981-1982	-4181,65	1979-1980	-4720,55
2007-2008	-3611,90	1984-1985	-4378,21	1980-1981	-4685,48
2010-2011	-3462,50	1985-1986	-4248,40	1982-1983	-4596,29
2012-2013	-3443,60	1988-1989	-4391,40	1983-1984	-5238,49
2013-2014	-3745,90	1989-1990	-4071,00	1986-1987	-4756,40
2014-2015	-3785,10	1991-1992	-4075,10	1987-1988	-4681,22
2016-2017	-2824,50	1992-1993	-4066,08	1990-1991	-4481,50
2017-2018	-3192,80	1993-1994	-4066,08	1999-2000	-4531,81
2019-2020	-3656,50	1994-1995	-4066,08	2011-2012	-4557,80
2020-2021	-3533,00	1995-1996	-4075,10		
2021-2022	-3792,30	1996-1997	-4066,08		
		1997-1998	-4066,08		
		1998-1999	-4403,77		
		2000-2001	-4358,06		
		2001-2002	-4243,08		
		2002-2003	-3894,23		
		2003-2004	-4056,20		
		2004-2005	-4246,94		
		2005-2006	-4310,20		
		2008-2009	-3953,50		
		2009-2010	-4002,60		
		2015-2016	-4304,10		
		2018-2019	-4069,86		

Таблица 3.10. Степени суровости на каждый год на всех станциях.

Год\Станция	21432	21982	25034	25042	25062	25051
1979-1980	С	У	С	М	С	С
1980-1981	М	У	У	С	С	С
1981-1982	У	У	У	У	У	У
1982-1983	У	У	С	У	С	С
1983-1984	С	С	С	С	С	С
1984-1985	У	У	У	С	У	У
1985-1986	У	У	У	У	У	У
1986-1987	С	У	У	У	С	С
1987-1988	С	У	С	У	С	С
1988-1989	У	У	У	С	У	У
1989-1990	М	У	М	У	У	У
1990-1991	У	У	У	У	У	С
1991-1992	У	У	У	М	У	У
1992-1993	С	У	С	У	У	У

1993-1994	С	У	С	У	С	У
1994-1995	М	У	У	У	С	У
1997-1996	М	М	М	М	М	У
1996-1997	У	М	У	М	У	У
1997-1998	У	У	С	С	С	У
1998-1999	С	У	С	С	У	У
1999-2000	У	У	У	У	У	С
2000-2001	У	У	У	У	У	У
2001-2002	С	М	У	М	У	У
2002-2003	М	М	М	М	У	У
2003-2004	М	М	М	М	У	У
2004-2005	У	М	У	У	У	У
2005-2006	М	М	У	М	У	У
2006-2007	М	М	М	М	М	М
2007-2008	М	М	М	М	У	М
2008-2009	М	М	М	М	У	У
2009-2010	М	М	У	М	У	У
2010-2011	М	М	М	М	М	М
2011-2012	М	М	У	У	С	С
2012-2013	М	М	М	М	У	М
2013-2014	М	М	М	М	М	М
2014-2015	М	М	М	М	М	М
2015-2016	М	М	У	М	У	У
2016-2017	М	М	М	М	М	М
2017-2018	М	М	М	М	М	М
2018-2019	М	М	М	М	У	У
2019-2020	М	М	М	М	М	М
2020-2021	М	М	М	М	М	М
2021-2022	М	М	М	М	У	М

С помощью кластерного анализа были определены степени суровости зим на каждой станции. Далее были определены года с разными классами зим – 1983-1984 (суровая), 2000-2001 (умеренная) и 2006-2007 (мягкая). По этим годам была сформирована таблица с площадью льда.

Таблица 3.11. Таблица площадей льда за три зимы разной суровости

Месяц	Мягкая	Умеренная	Суровая
	2006-2007, млн. км ²	2000-2001, млн. км ²	1983-1984, млн. км ²
Сентябрь	0,45	0,8	1,02
Октябрь	0,87	1,18	1,3
Ноябрь	1,28	1,31	1,31

Декабрь	1,31	1,31	1,31
Январь	1,31	1,31	1,31
Февраль	1,31	1,31	1,31
Март	1,31	1,3	1,31
Апрель	1,31	1,31	1,31
Май	1,3	1,3	1,31
Июнь	1,13	1,28	1,28
Июль	0,65	1,12	1,21
Август	0,04	0,93	1,14

Далее для наглядности был построен совместный график площади льда за выбранные годы.

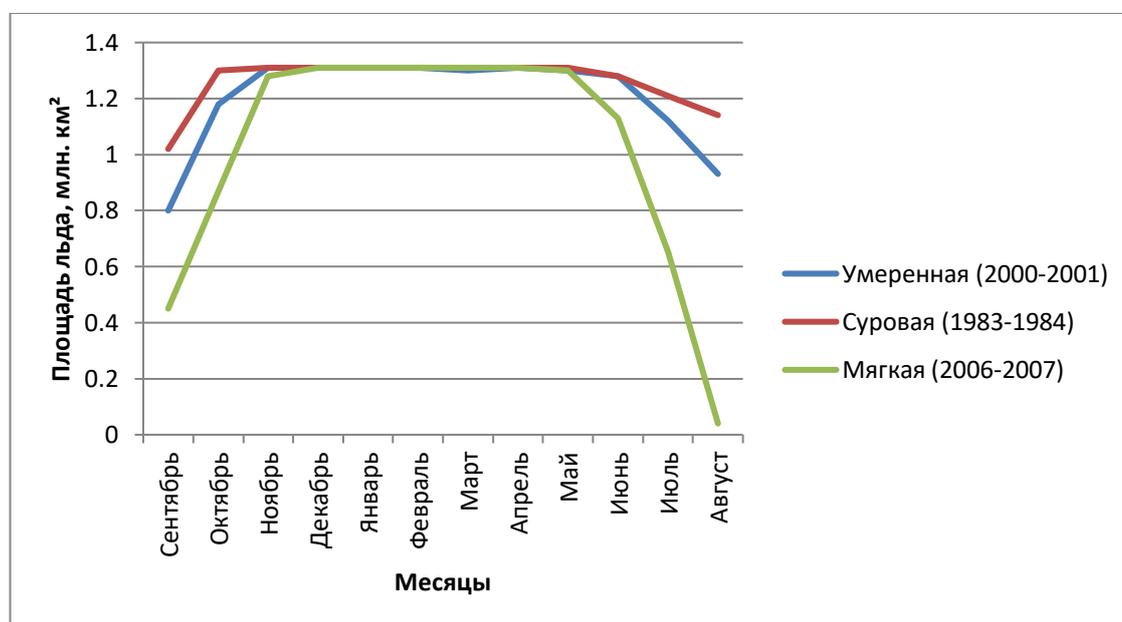


Рисунок 3.9. Годовой ход площади льда за три выбранные зимы

На рисунке 3.9 показан годовой ход площади льда за мягкую, умеренную и суровую зимы. Можно заметить, что площадь льда в мягкую зиму гораздо меньше, чем в суровую или умеренную. Минимум приходится на август и составляет 0,04 млн. км² (море очищается ото льда), в то время как для суровой и умеренной минимальная ледовитость наблюдается в сентябре и составляет 1,02 млн. км² и 0,8 млн. км² соответственно. Максимум в суровой зиме достигается быстрее - в октябре. В умеренной в ноябре, а в мягкой – в декабре.

Для апробации были взяты карты состояния ледяного покрова в сентябре, октябре, июле и августе с сайта ААНИИ за самую мягкую зиму и умеренную (близкую к суровой) за исследуемый период. Таким образом, идёт сравнение зим 2016-2017 и 1998-1999 годов соответственно.

Таблица 3.12. Таблица условных обозначений для карт состояния ледяного покрова в арктических и замерзающих морях России и Гренландского моря

по сплоченности		по возрасту					
чисто	7-8	нач. виды	серо-белый.	толстый.	пак.		
<1	9-10	нилас.	однолетний.	старый.	припай		
1-3	10	молодой.	тонкий.	остаточный.	отдельное поле		
4-6		серый.	средний.	двухлетний.	айсберг		

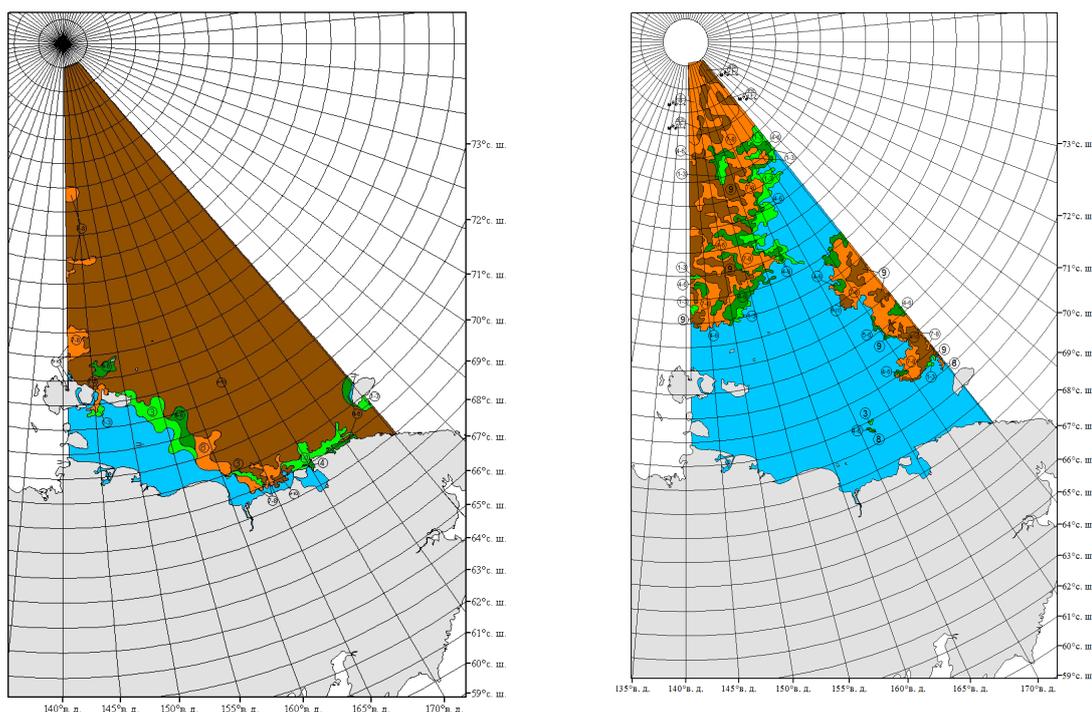


Рисунок 3.10. Карта состояния ледяного покрова в Восточно-Сибирском море на 02.09.1998 г. (умеренная зима)

Рисунок 3.11. Карта состояния ледяного покрова в Восточно-Сибирском море на 06.09.2016 г. (мягкая зима)

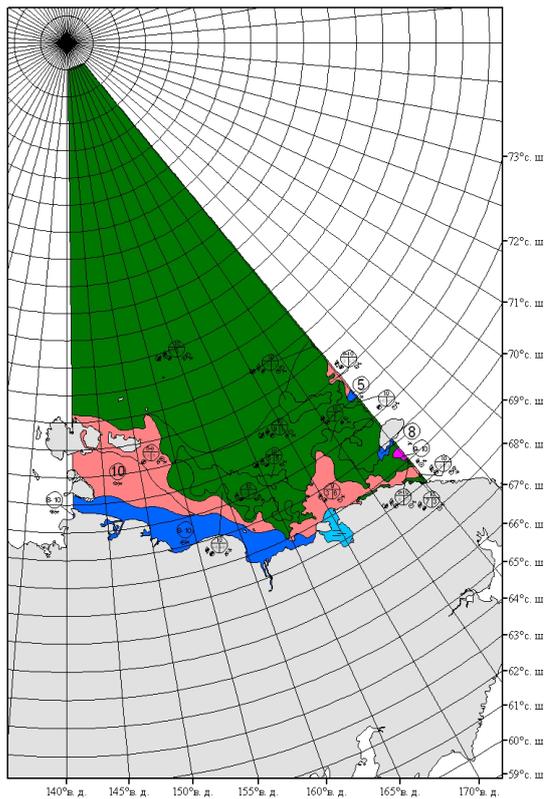


Рисунок 3.12. Карта состояния ледяного покрова в Восточно-Сибирском море на 07.10.1998 г. (умеренная зима)

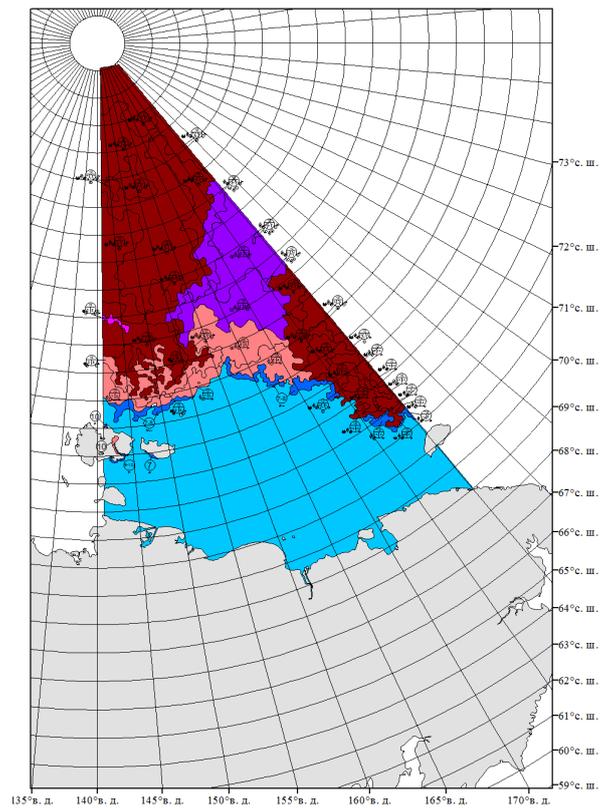


Рисунок 3.13. Карта состояния ледяного покрова в Восточно-Сибирском море на 04.10.2016 г. (мягкая зима)

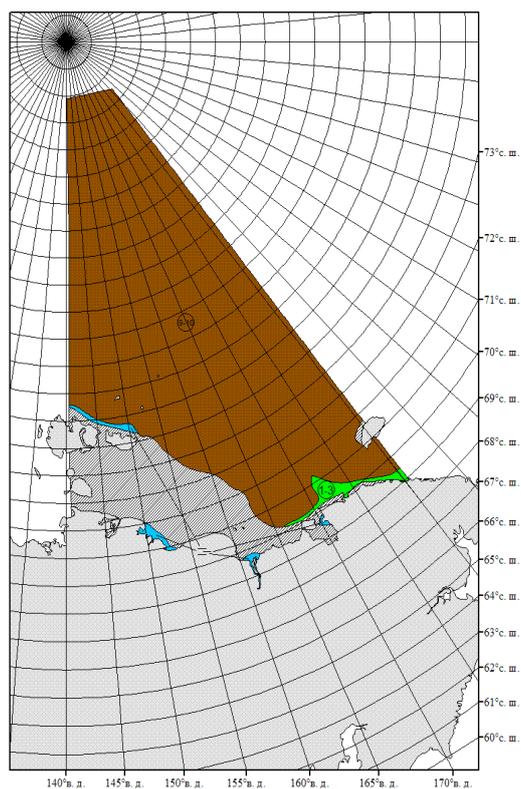


Рисунок 3.14. Карта состояния ледяного покрова в Восточно-Сибирском море на 07.07.1999 г. (умеренная зима)

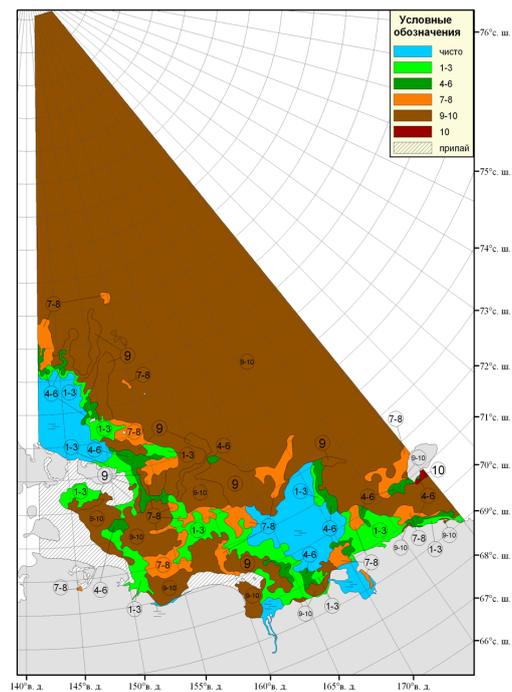


Рисунок 3.15. Карта состояния ледяного покрова в Восточно-Сибирском море на 04.07.2017 г. (мягкая зима)

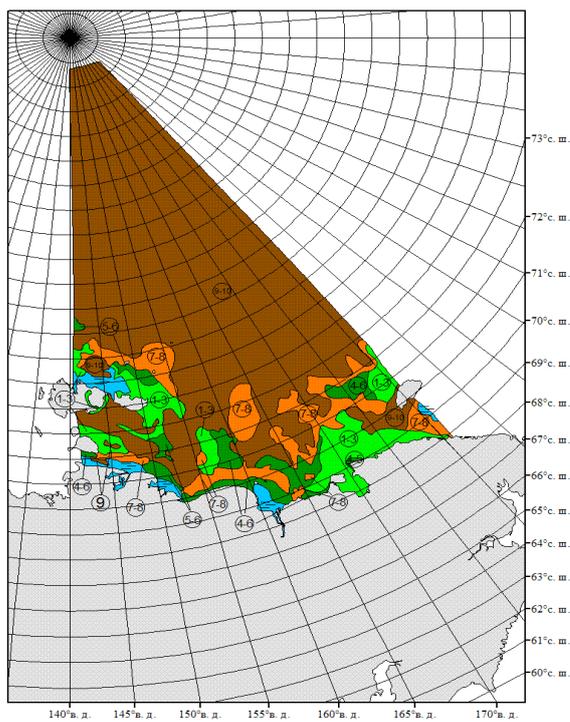


Рисунок 3.16. Карта состояния ледяного покрова в Восточно-Сибирском море на 04.08.1999 г. (умеренная зима)

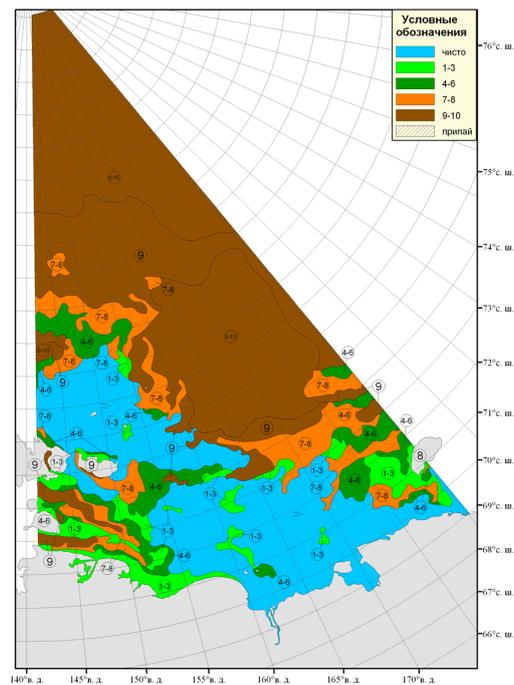


Рисунок 3.17. Карта состояния ледяного покрова в Восточно-Сибирском море на 01.08.2017 г. (мягкая зима)

Рисунки 3.10-3.13 показывают состояние ледяного покрова на начало ледостава, а 3.14-3.17 на его конец.

Из рисунков 3.10-3.11 видно, что в сентябре в мягкую зиму море практически полностью свободно ото льда. На востоке и северо-западе моря наблюдаются ледяные поля сплочённостью 9 баллов. Средняя сплочённость 6 баллов. В то время как в умеренную зиму лёд отсутствует только в юго-западной части моря. Основную часть ледового покрова моря составляют льды сплочённостью 10 баллов. В незначительном количестве присутствуют льды сплочённостью 3-8 баллов.

Рисунки 3.12-3.13 демонстрируют состояние ледяного покрова в октябре. По сравнению с сентябрём в мягкую зиму наблюдается прирост льда с

северных районов. Появляется серо-белый и серый лёд, а также нилас. Сплочённость льдов увеличилась до 10 (в некоторых районах составляет 7 баллов). В умеренную зиму в ранее чистых участках появился серый лёд и нилас сплочённостью 8-10 баллов. Льда нет только в Чаунской бухте.

На рисунке 3.15 показано состояние ледяного покрова в мягкую зиму в июле. Видно, что в восточной и северо-западной части наблюдаются участки открытой воды, в юго-западной части – припай. Большую часть моря составляют льды сплочённостью 9-10 баллов, но при этом достаточно много участков с меньшей сплочённостью. В умеренную зиму (рисунок 3.14) наблюдается припай в юго-западной и южной частях моря, в юго-восточной части – тонкий лёд сплочённостью 1-3 балла. Оставшуюся часть акватории занимает лёд сплочённостью 9-10 баллов. Есть участки открытой воды в районе пролива Певек, Колымского залива и севернее островов Анжу.

На рисунке 3.17 в августе после мягкой зимы участки открытой воды увеличились и распространились в центральную часть моря. Много льдов сплочённостью 1-8 баллов на юго-западе и востоке моря. В северной части преимущественно льды 9-10 баллов. В умеренную зиму (рисунок 3.16) припай сменился льдами со сплочённостью от 4 до 10 баллов.

Таким образом, карты наглядно демонстрируют различие развития ледовых процессов при зимах разной суровости – чем суровее зима, тем больше образуется льда высокой сплочённости и тем дольше происходит его таяние.

Заключение

В работе использовались данные по площади льда в Восточно-Сибирском море и температуре воздуха на шести прибрежных станциях (о. Котельный, о. Врангеля, бухта Амбарчик, о. Айон, м. Биллингс и Певек) за период с 1979 по 2022 года.

В ходе работы были произведены расчёты тренда, выполнены гармонический, спектральный и автокорреляционный анализы по ледовитости в Восточно-Сибирском море в период с 1979 по 2021 годы. Было сформулировано уравнение линейного тренда для ледовитости (K) и времени (t): $S = -0,006t + 1,275$. Величина тренда $Tr = -0,06$ млн. км²/10 лет. Так как тренд отрицательный можно сделать вывод, что площадь льда с течением времени уменьшается. Выделено три значимые гармоники с периодами 15 лет, 4 и 2 года. Модель, полученная при выполнении автокорреляционного анализа, повторяет ход фактических значений площади льда, но максимумы и минимумы сглажены. Уравнение автокорреляционного анализа имеет вид: $S_{i+2} = 0,347S_i + 0,0007$.

Для выполнения кластерного анализа были посчитаны СГДМ на станциях о. Котельный, о. Врангеля, бухта Амбарчик, о. Айон, м. Биллингс и Певек за тот же период. В программе PAST3 были построены кластеры с помощью которых стало возможным разделение зим по трём классам. В результате анализа зим по всем шести станциям мягкой зимой была выбрана зима 2006-2007 года, умеренной 2000-2001 года и суровой 1983-1984 года. По этим годам были взяты данные по площади льда и построен совместный график, который позволил сделать вывод о том, что площадь льда зависит от суровости зимы. Наибольшая ледовитость наблюдается в суровую зиму, а наименьшая в мягкую. Площадь льда в умеренную зиму не выходит за пределы суровой и мягкой зим.

Сравнение карт ледовой обстановки за мягкую и умеренную зимы показывают значительные расхождения в распределении и сплочённости льдов. В умеренную зиму наибольшее распространение имеют льды, сплочённостью 8-10 баллов, а в мягкую наблюдаются участки открытой воды.

Список источников и литературы

1. Атлас. Целый мир в твоих руках № 122. Восточно-Сибирское море в краю вечного холода. Deagostini, 2012.-17 стр. URL: http://identityworld.ru/rusimg/region/chukotka/atlas_122-vostochno-sibirskoe_more.pdf;
2. Чернякова А. М. ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ МОРЕ // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2018); <https://bigenc.ru/geography/text/5287994> Дата обращения: 18.10.2021;
3. А.В. Гаврилов, Е.И. Пижанкова. Криолитоморфогенез на мелководьях арктических морей в связи с современным потеплением-ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 2. С. 77–89. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-77-89;
4. Харлампыева, Н. К. Межрегиональное сотрудничество регионов моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря / Н. К. Харлампыева, Д. А. Лутфуллин, Т. М. Лемешева // Арктика XXI век. Гуманитарные науки. – 2017. – № 4(14). – С. 38-46;
5. Порт Певек [сайт]. – URL: <https://www.pevek-morport.com/blank-c20r9>
6. Шаронов Андрей Юрьевич, Шматков Владимир Антонович Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2018. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zadachi-gidrometeorologicheskogo-obespecheniya-kruglogodichnoy-navigatsii-v-vostochno-sibirskom-more> (дата обращения: 24.10.2021).
7. База знаний [Электронный ресурс] // Данные по Восточно-Сибирскому морю: сайт. – URL: <http://proznania.ru> (последняя дата обращения: 18.04.2021)

8. Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря / А. В. Юлин, М. В. Шаратунова, Е. А. Павлова, В. В. Иванов // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2018. – Т. 64. – № 3(117). – С. 229-240. – DOI 10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240;
9. Плотников, В. В. Изменчивость и сопряженность ледовых условий в системе морей Восточной Арктики (Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) / В. В. Плотников, В. И. Пустошнова // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 7. – С. 54-65;
10. Горбунов, Ю. А. Стамухи Восточно-Сибирского и Чукотского морей / Ю. А. Горбунов, С. М. Лосев, Л. Н. Дымент // Материалы гляциологических исследований. – 2007. – № 102. – С. 41-47;
11. Амбросимов, А. К. Сипы Восточно-Сибирского моря / А. К. Амбросимов // Проблемы экоинформатики : Сборник докладов XIV Международного симпозиума Московского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, Москва, 01–03 декабря 2020 года / Под редакцией Ф.А. Мкртчяна. – Москва: Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2020. – С. 183-185;
12. Большая советская энциклопедия: [в 30 т.] / гл. ред. А. М. Прохоров. — 3-е изд. — М. : Советская энциклопедия, 1969—1978;
13. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации» – СПб.: РГГМУ, 2010. – 74с.
14. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник.– СПб.: изд. РГГМУ, 2008. – 404 с.
15. НАФИ [Электронный ресурс] // SPSS Учебный курс. Тема 9. Кластерный анализ: сайт. – URL: <https://nafi.ru/academy/prepodavatelyam-spss/> (последняя дата обращения: 30.05.2022).

16. National Centers for Environmental Information: [сайт]. – URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/snow-and-ice/regional-sea-ice/area/ESiberian/0> (дата обращения: 22.03.2022).

17. Справочно-информационный портал "Погода и климат": [сайт]. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 17.04.2022).

18. Гидрометцентр России [Электронный ресурс] // Данные по температуре воздуха для метеостанций: сайт. – URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (последняя дата обращения: 30.05.2021).

19. ААНИИ [Электронный ресурс] // Генерализованные карты состояния ледяного покрова в арктических и замерзающих морях России и Гренландского моря: сайт. – URL: http://old.aari.ru/odata/_d0004.php?m=Ess&lang=0&mod=0&yу=1999 (последняя дата обращения: 30.05.2022).

Приложение А

Дендрограммы на станциях о. Врангеля, о. Айон и мыс Биллингс.

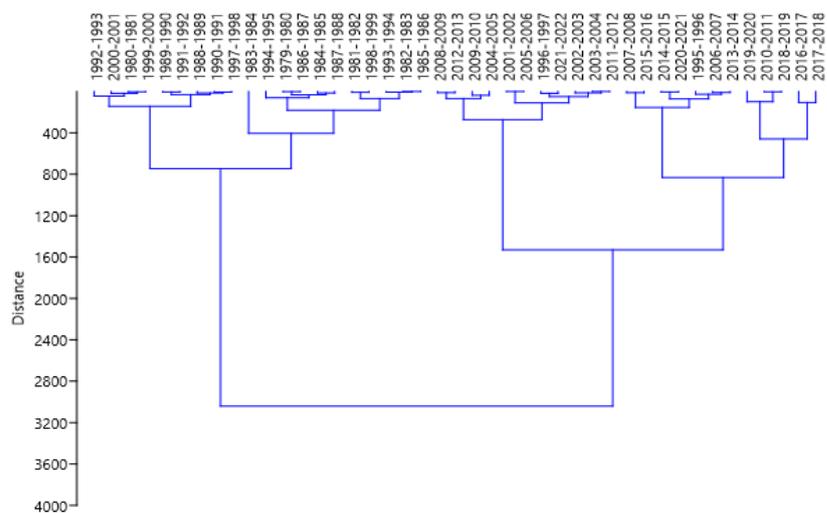


Рисунок А.1. Дендрограмма станции о. Врангеля.

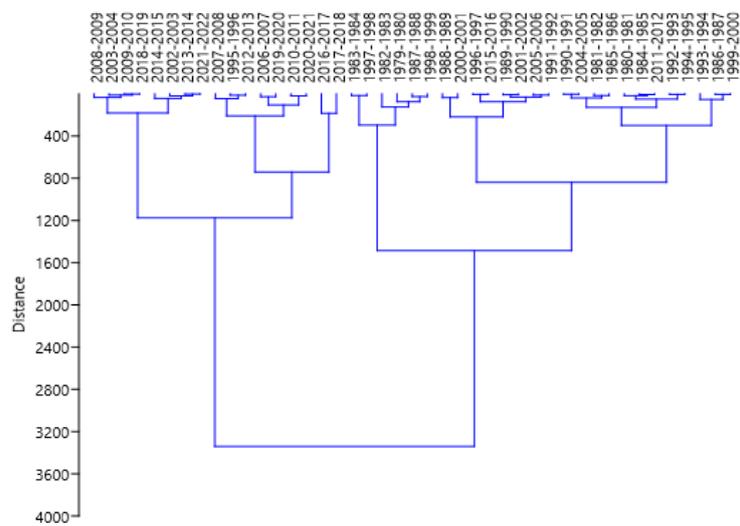


Рисунок А.2. Дендрограмма станции о. Айон.

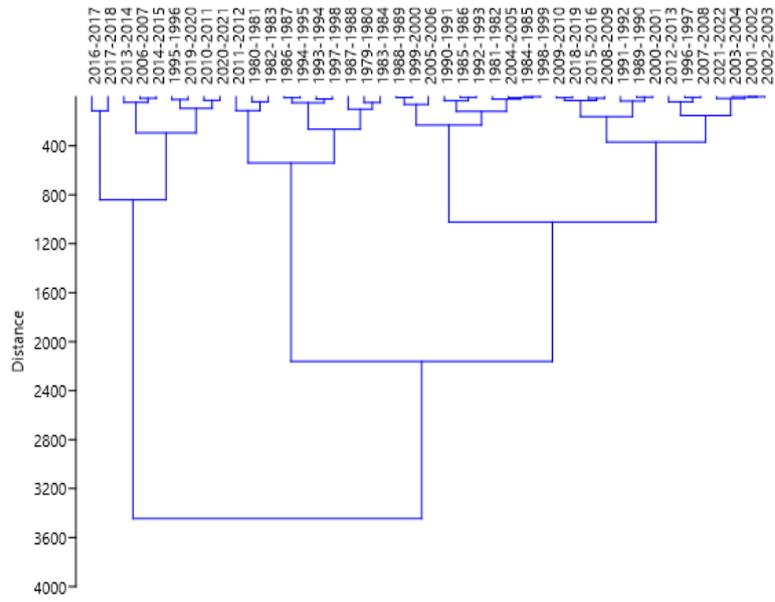


Рисунок А.3. Дендрограмма станции м. Биллингс

Приложение Б

СГДМ по степеням суровости на станциях о. Врангеля, о. Айон и мыс Биллингс.

Таблица Б.1. СГДМ по степеням суровости на станции о. Врангеля

Мягкая		Умеренная		Суровая	
1995-1996	-3319,20	1979-1980	-4316,20	1983-1984	-4672,70
1996-1997	-3751,30	1980-1981	-4101,30		
2001-2002	-3821,10	1981-1982	-4201,00		
2002-2003	-3712,30	1982-1983	-4265,30		
2003-2004	-3728,10	1984-1985	-4335,60		
2004-2005	-3558,40	1985-1986	-4265,70		
2005-2006	-3821,20	1986-1987	-4319,10		
2006-2007	-3356,77	1987-1988	-4355,50		
2007-2008	-3437,60	1988-1989	-4034,40		
2008-2009	-3648,50	1989-1990	-4003,30		
2009-2010	-3609,80	1990-1991	-4022,80		
2010-2011	-3153,60	1991-1992	-3997,60		
2011-2012	-3728,40	1993-1994	-4274,00		
2012-2013	-3631,90	1993-1994	-4274,00		
2013-2014	-3343,10	1994-1995	-4389,60		
2014-2015	-3275,60	1997-1998	-4014,30		
2015-2016	-3420,70	1998-1999	-4213,40		
2016-2017	-2789,90	1999-2000	-4096,80		
2017-2018	-2639,20	2000-2001	-4077,60		
2018-2019	-3148,80				
2019-2020	-3030,60				
2020-2021	-3282,40				
2021-2022	-3775,30				

Таблица Б.2. СГДМ по степеням суровости на станции о. Айон

Мягкая		Умеренная		Суровая	
1989-1990	-4622,40	1980-1981	-4992,00	1983-1984	-5589,10
1991-1992	-4663,00	1981-1982	-4892,50	1979-1980	-5431,20
1996-1997	-4586,00	1984-1985	-4966,40	1982-1983	-5257,50
1997-1996	-4104,80	1985-1986	-4915,00	1987-1988	-5328,40
2001-2002	-4634,10	1986-1987	-5114,60	1997-1998	-5566,70
2002-2003	-4301,70	1988-1989	-4812,90	1998-1999	-5364,00
2003-2004	-4411,30	1990-1991	-4936,80		
2005-2006	-4647,50	1992-1993	-5017,60		
2006-2007	-4069,20	1993-1994	-5183,00		

2007-2008	-4167,90	1994-1995	-5024,30
2008-2009	-4456,80	1999-2000	-5122,40
2009-2010	-4423,20	2000-2001	-4761,50
2010-2011	-3936,20	2004-2005	-4941,50
2012-2013	-4123,00	2011-2012	-4975,30
2013-2014	-4327,30		
2014-2015	-4273,30		
2015-2016	-4579,80		
2016-2017	-3375,10		
2017-2018	-3636,90		
2018-2019	-4426,30		
2019-2020	-4030,00		
2020-2021	-3962,60		
2021-2022	-4325,10		

Таблица Б.3. СГДМ по степеням суровости на станции м. Биллингс

Мягкая		Умеренная		Суровая	
2006-2007	-3699,80	1981-1982	-4181,65	1979-1980	-4720,55
2007-2008	-3611,90	1984-1985	-4378,21	1980-1981	-4685,48
2010-2011	-3462,50	1985-1986	-4248,40	1982-1983	-4596,29
2012-2013	-3443,60	1988-1989	-4391,40	1983-1984	-5238,49
2013-2014	-3745,90	1989-1990	-4071,00	1986-1987	-4756,40
2014-2015	-3785,10	1991-1992	-4075,10	1987-1988	-4681,22
2016-2017	-2824,50	1992-1993	-4066,08	1990-1991	-4481,50
2017-2018	-3192,80	1993-1994	-4066,08	1999-2000	-4531,81
2019-2020	-3656,50	1994-1995	-4066,08	2011-2012	-4557,80
2020-2021	-3533,00	1995-1996	-4075,10		
2021-2022	-3792,30	1996-1997	-4066,08		
		1997-1998	-4066,08		
		1998-1999	-4403,77		
		2000-2001	-4358,06		
		2001-2002	-4243,08		
		2002-2003	-3894,23		
		2003-2004	-4056,20		
		2004-2005	-4246,94		
		2005-2006	-4310,20		
		2008-2009	-3953,50		
		2009-2010	-4002,60		
		2015-2016	-4304,10		
		2018-2019	-4069,86		