



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение
Высшего Образования
**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра метеорологии, климатологии и охраны атмосферы
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему «Особенности климатических измерений температуры и осадков
над акваторией Берингова моря»

Исполнитель Острякова Валерия Алексеевна

**Руководитель
Лебедев Андрей Борисович**

**«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой**

Подпись

Кандидат физико-математических наук, доцент
Сероухова Ольга Станиславовна

« 19 » 06 2023г.

Санкт-Петербург
2023

Введение

В земной атмосфере ежедневно происходят самые разнообразные явления, которые возникают в результате протекания различных физических процессов. Процессы, происходящие в атмосфере, не изолированы, а тесно связаны с процессами, происходящими в верхних слоях почвы и воды. Эти процессы и явления происходят в основном благодаря солнечной энергии, которая поступает на поверхность Земли. В наше время все чаще затрагивают вопрос о происходящих изменениях в климате, для более точной информации необходимо рассматривать отдельные регионы планеты, что мы и сделаем в данной работе.

Изменения климата в Арктике происходят наиболее интенсивно. Предметом рассмотрения выбрана акватория Берингова моря, а рассматриваемыми величинами являются годовая сумма осадков и среднемесячные температуры воздуха за летний (июль) и зимний (январь) месяцы.

Актуальность исследований с практической точки зрения вызвана тем, что акватория Берингова моря является самой крупной среди дальневосточных морей и в будущем будет играть ключевую роль при эксплуатации Северного морского пути, освоении биоресурсов и полезных ископаемых, и обеспечении обороноспособности данного региона.

Целью данной работы является оценка современных климатических изменений в Беринговом море.

Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ физико-географических и синоптико-климатических акватории Берингова моря.
2. Сформировать базу временных рядов для анализа и проверить их качество.

3. Выполнить статистическое моделирование для оценивания современных климатических изменений температуры воздуха и осадков.

В первой главе рассматриваются физико-географические и климатические особенности акватории Берингова моря.

Вторая и третья глава посвящена оцениванию современных климатических изменений температуры воздуха и осадков в данном регионе.

1. Физико-географические и климатические особенности Берингова моря

1.1 Географическое положение Берингова моря

Берингово море расположено на севере Тихого океана между материками Евразия и Северная Америка (рисунок 1.1). На северо-западе оно соседствует с берегами Северной Камчатки, Корякского нагорья и Чукотки; на северо-востоке – Западной Аляски. С Северным Ледовитым океаном на севере море соединено Беринговым проливом. Естественной границей моря на юге является цепь Командорских и Алеутских островов.

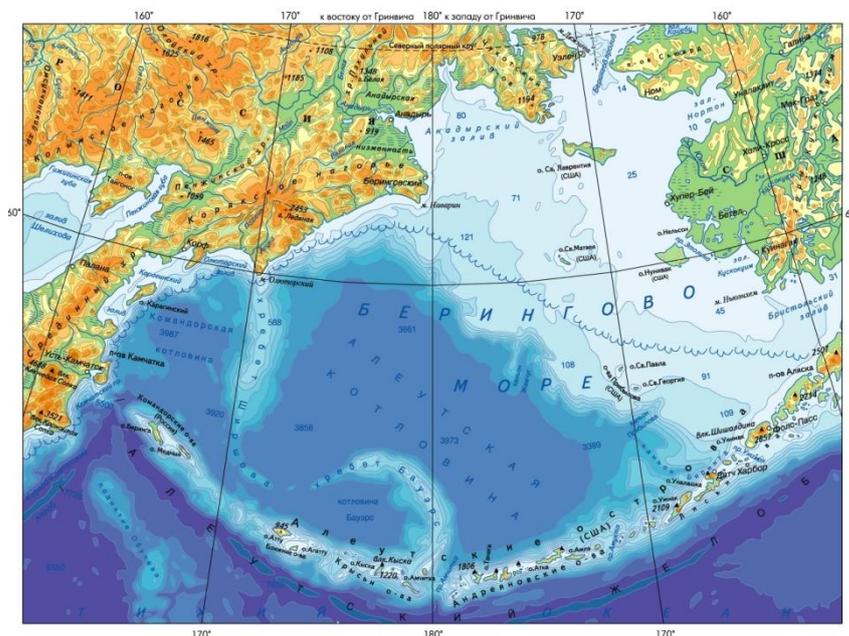


Рисунок 1.1 – Физическая карта Берингова моря

Площадь моря составляет 2315 тыс. км², его объём – 3796 тыс. км³ [22]. Берингово море является самым крупным дальневосточным морем Российской Федерации. Наибольшая глубина – 5,5 тыс. м. Площадь с глубинами менее 500 м занимает около половины всей площади Берингова моря. Поэтому Берингово море относят к морям смешанного материково-океанического типа.

Вследствие своего географического положения, Берингово море характеризуется отрицательной годовой суммой баланса тепла на его поверхности, за исключением самых южных районов акватории, где происходит смена знака этой характеристики. Летний радиационный прогрев поверхностных вод не компенсирует значительные потери тепла на эффективное излучение, испарение и конвективно-турбулентный обмен с атмосферой. Поэтому важную роль в их восполнении играет адвекция теплых тихоокеанских вод через проливы Алеутской гряды.

Среднее годовое поле теплового баланса поверхности моря характеризуется его преимущественно зональным распределением: наибольшие результирующие потоки тепла в атмосферу наблюдаются в северной части моря (более 3500 МДж/м²), уменьшаясь в южном направлении до 500 МДж/ м² вблизи границы шельфовой зоны. Над южными глубоководными районами отмечаются малые отрицательные значения теплового баланса, которые сменяются слабыми положительными вблизи Алеутских островов.

1.2 Рельеф и геологическое строение Берингова моря

Береговая линия Берингова моря сильно изрезана, образует много заливов, бухт, полуостровов и мысов. Самые крупные из заливов: Карагинский, Алюторский, Анадырский находятся в Евразии; Нортон, Бристольский – в Северной Америке. Самые крупные острова: Карагинский (Россия), Святого Лаврентия, Нунивак, Нельсон, Святого Матвея, Прибылова (США).

Берега Берингова моря разнообразны. Имеются как высокие, скалистые, сильно изрезанные бухтовые берега (рисунок 1.2), фьордовые, так и выровненные абразионно-аккумулятивные. аккумулятивные берега (преобладают на востоке в дельтах крупных рек Юкон и Кускокуим).



Рисунок 1.2 – Побережье о. Святого Матвея в Беринговом море

Как было сказано выше, по характеру рельефа дна Берингово море чётко разделяется на мелководную и глубоководную части. Граница проходит примерно по линии от мыса Наварин до о. Унимак.

Северная и северо-восточная части лежат на шельфе и представляют собой обширную равнину, слабо наклонённую на юго-запад. Ширина на северо-востоке составляет до 750 км и занимает по площади 46 % от площади моря. Преобладают глубины 50–80 м, как правило, не превышают 200 м. В четвертичном периоде шельф периодически осушался и возникал сухопутный мост между материками Евразия и Северная Америка.

Западнее расположен узкий материковый склон с глубинами от 200 м до 3000 м, который занимает 13 % площади моря, и с большими уклонами дна почти на всём протяжении переходит в глубоководное ложе.

В центральной и юго-западной частях Берингова моря находится район с глубинами свыше 3000 м, которая занимает 37 % площади моря и простирается до узкой прибрежной шельфовой полосы. Подводный хребет Ширшова, протянувшийся от Олюторского полуострова в южном направлении, делит глубоководную часть моря на Командорскую (к западу от хребта) и Алеутскую (к востоку) котловины. Дно обеих котловин слабо наклонено к юго-западу. От

Алеутских островов на север дугой отходит хребет Бауэрс, оконтурившая одноимённую котловину. Максимальные глубины Берингова моря расположены в Камчатском проливе и около Алеутских островов.

Геологическое строение дна моря формировалось под влиянием различных геодинамических процессов; выделяются структуры с континентальным, океаническим и субокеаническим типами земной коры. Земной корой континентального типа характеризуются шельфовые области моря.

Внутренние районы моря (на архипелаге Прибылова, о. Святого Лаврентия и о. Нунивак), а также районы к западу и к юго-востоку от Берингова моря – полуострова Камчатка, Аляска, Алеутская островная дуга – характеризуются активной вулканической деятельностью.

Таким образом, следует предположить, что горные хребты, расположенные на северо-востоке Евразии и северо-западе Северной Америки не сильно прикрывают Берингово море от проникновения воздушных масс с востока, севера и запада. Командорские и Алеутские острова на юге не являются препятствием для проникновения циклонов с южных направлений. Мелководная восточная часть Берингова моря может способствовать прогреву данной части акватории в теплое время года и его быстрому охлаждению в зимние месяцы.

1.3 Гидрологический режим Берингова моря

Особенности гидрологического режима определяются ограниченным водообменом с Северным Ледовитым океаном, относительно свободной связью с Тихим океаном, материковым стоком и опреснением поверхностного слоя при таянии льда.

Для образования многих природных процессов Берингова моря важны проливы, обеспечивающие водообмен с Тихим океаном. Они имеют поперечное сечение общей площадью 730 км² с глубинами свыше 4 тыс. м

(Камчатский пролив), что способствует хорошему водообмену с тихоокеанскими водами.

Исследования распределения водных масс в Беринговом море, свидетельствуют о том, что оно лежит в области субарктической структуры вод, главной особенностью которой является наличие холодного и теплого промежуточных слоев.

В глубоководной части Берингова моря выделяют четыре водные массы: поверхностную, подповерхностную промежуточную холодную, промежуточную тихоокеанскую тёплую и глубинную. Изменения солёности с глубиной невелики. Обе промежуточные водные массы отсутствуют лишь близ Алеутских островов. В отдельных частях Берингова моря, в частности в прибрежных районах, в зависимости от местных условий формируются другие водные массы.

Обмен с Чукотским морем затруднён из-за малой площади сечения Берингова пролива (ширина – 3,4 км², средняя глубина – 39 м). Воды Чукотского моря практически не оказывают влияния на формирование климата Берингова моря.

Материковый сток в море равен примерно 400 км³ в год. Большая часть речной воды попадает в его самую северную часть, куда впадают наиболее крупные реки: Юкон (176 км³/г), Анадырь (50 км³/г), Кускокуим (41 км³/г). Более 85 % стока приходится на весенне-летнее время.

Величина пресного стока невелика, но речные воды поступают главным образом в северные районы моря, приводя летом к заметному опреснению поверхностного слоя.

Поверхностные течения Берингова моря образуют круговорот против часовой стрелки, на который существенное влияние оказывают господствующие ветры (рисунок 1.3). Вдоль берегов Аляски на север следует берингоморская ветвь тёплых течений Куроисио. Часть этих вод уходит через Берингов пролив, а остальные, смешиваясь с холодными водами Чукотского моря, движутся вдоль азиатского берега на юг, образуя холодное Камчатское

течение, усиливающееся в летнее время. Скорости постоянных течений в открытом море невелики, порядка 6 см/с, в проливах скорость возрастает до 25–50 см/с.

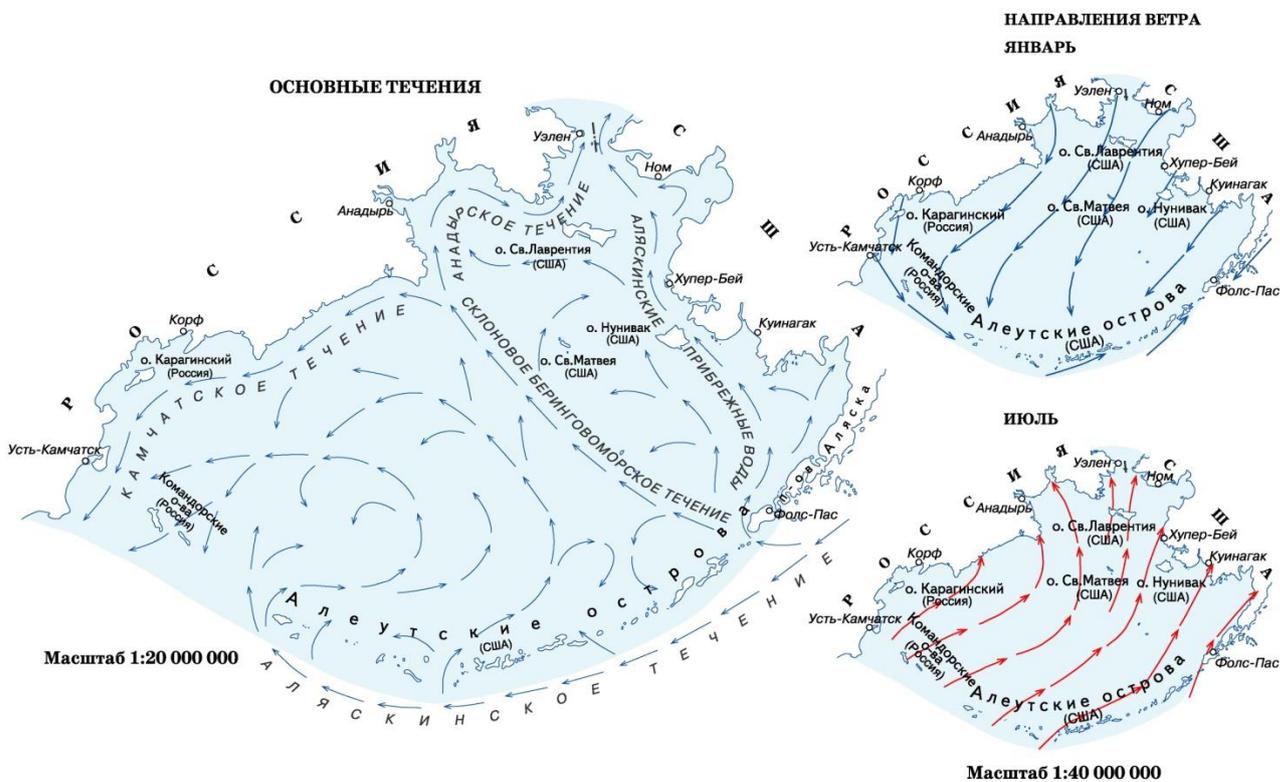


Рисунок 1.3 – Основные течения и направления ветров (в январе и июле) в акватории Берингова моря

Температура воды на поверхности в феврале изменяется от $-1,5^{\circ}\text{C}$ на севере до 3°C на юге, в августе соответственно от $4-8^{\circ}\text{C}$ до $9-11^{\circ}\text{C}$ (рисунок 1.4).

Распределение океанологических характеристик по глубине свидетельствует о сравнительно слабой вертикальной стратификации вод Берингова моря. В сочетании с сильными ветрами это создает благоприятные условия для развития ветрового перемешивания. В холодный сезон оно охватывает верхние слои до горизонтов 100–125 м; в теплое время года, когда воды расслоены более резко, а ветры слабее, чем осенью и зимой, ветровое

перемешивание проникает до горизонтов 75–100 м в глубоких районах и до 50–60 м в прибрежных районах.

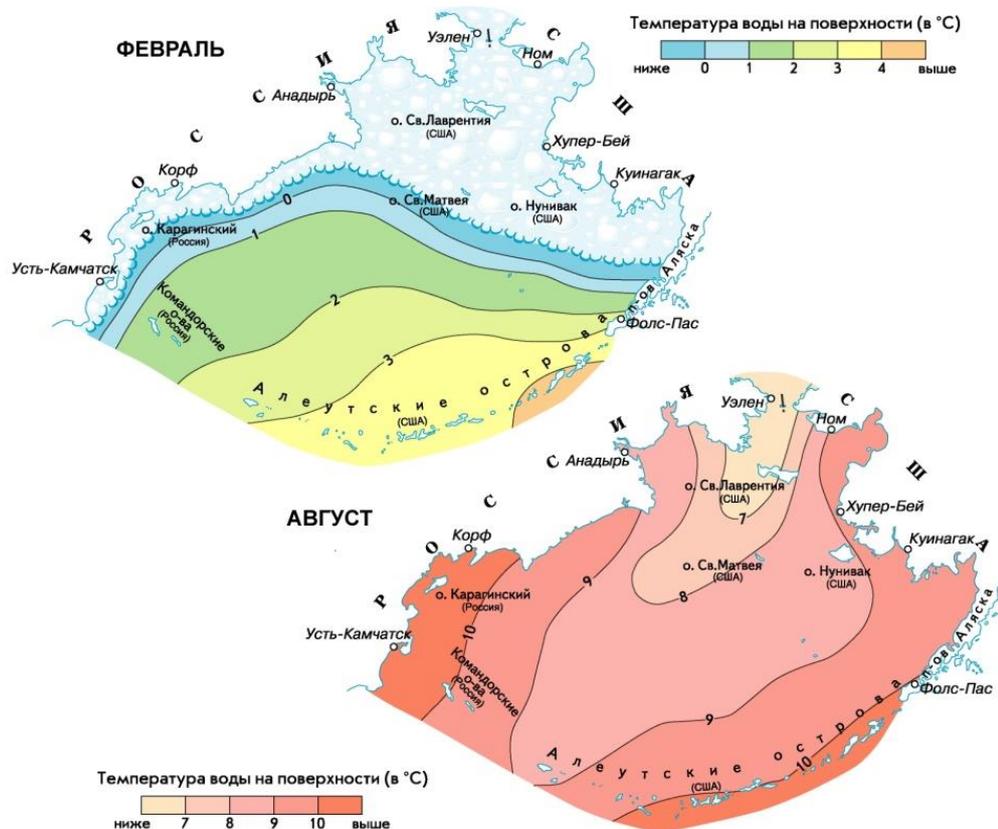


Рисунок 1.4 – Температура воды на поверхности Берингова моря в феврале и в августе

Северная и северо-восточная части моря ежегодно покрываются льдом. Первые льды появляются в сентябре в Беринговом проливе, на северо-западе – в октябре и постепенно распространяются к югу. В течение зимы Берингово море до 60°с.ш. покрывается тяжёлыми льдами. Все льды как образуются, так и тают в самом Беринговом море. Только небольшая часть льда выносятся через Берингов пролив в Чукотское море и Камчатским течением в северо-западный район Тихого океана. Ледовый покров разрушается и тает в мае – июне.

Анализ динамики ледяного покрова позволил проследить генеральное направление дрейфа льда (с северо-востока на юг, юго-запад). В закрытых бухтах и заливах моря в зимний период формируются припайные льды, которые могут сохраняться с октября по июнь. Граница плавучих льдов в целом повторяет очертания изобаты 200 м, смещаясь в наиболее суровые зимние месяцы к югу от нее. В центральной части моря лед не проникает южнее 56°с.ш.

1.4 Синоптические особенности акватории Берингова моря

Акватория Баренцева моря находится под влиянием трех основных центров действия атмосферы: алеутского минимума, северотихоокеанского максимума и сибирского зимнего антициклона, которые формируют генеральную систему ветров в данном районе.

В холодный период года центр алеутского минимума расположен в восточной части Алеутской гряды, а сам минимум занимает всю северную часть Тихого океана, при этом северотихоокеанский максимум смещается к берегам Калифорнии. На Азиатском континенте развивается область повышенного давления, которая совместно с алеутским минимумом приводит к устойчивому северо-восточному ветру в западной части Берингова моря и лишь на самой юго-восточной его периферии наблюдаются ветры юго-западного и южного направлений. Из-за больших градиентов давления скорость ветра в северо-западной части Берингова моря имеет характерные значения 7-12 м/с.

В холодное время года, ветры северо-восточных и северных и направлений несут с собой с Северного Ледовитого океана холодный морской арктический воздух, а ветры западных и восточных направлений с Азиатского и Американского материков – холодный и сухой континентальный арктический и континентальный полярный воздух. С ветрами южных направлений сюда приходит морской полярный, а временами и морской тропический воздух.

Над морем взаимодействуют преимущественно массы континентального арктического и морского полярного воздуха, на границе которых образуется арктический фронт. Он расположен несколько севернее Алеутской дуги и протягивается в общем с юго-запада на северо-восток. На фронтальном разделе этих воздушных масс образуются циклоны, перемещающиеся примерно вдоль фронта на северо-восток. Передвижение этих циклонов способствует усилению северных ветров на западе и ослаблению их или даже перемене на южные на востоке моря. Большие градиенты давления, обусловленные Якутским отрогом Сибирского антициклона и Алеутского минимума, вызывают очень сильные ветры в западной части моря. Во время штормов скорость ветра нередко достигает 30—40 м/с. Обычно штормы продолжаются около суток, но иногда они с некоторым ослаблением длятся 7—9 суток. Число дней со штормами в холодное время года равно 5—10, местами доходит до 15—20 в месяц.

В теплое время года сибирский максимум отсутствует, сильно ослабевает алеутский минимум, смещаясь вглубь Арктического бассейна, а северотихоокеанский максимум смещается к северу и усиливается. Над всей акваторией Баренцева моря наблюдается ветры южного и юго-западного направлений при скорости в среднем 4-7 м/с.

Таким образом, муссонные перемещения воздуха наблюдаются повсеместно, за исключением юго-восточной части Берингова моря, где круглый год преобладают южные ветры, влияет на все динамические процессы в верхнем слое моря.

Значительные размеры, большие глубины и интенсивная штормовая деятельность способствуют развитию на его акватории сильного волнения в любое время года.

Имеющиеся результаты инструментальных измерений течений свидетельствуют о том, что основные элементы циркуляции вод Берингова моря сохраняются в течение всего года. Главной особенностью циркуляции вод Берингова моря, как и большинства морей северного полушария, является общее циклоническое движение вод в глубоководном бассейне.

1.5 Климатические особенности акватории Берингова моря

Берингово море почти полностью находится в субарктической климатической зоне, северная его часть (севернее 64° с.ш.) находится в арктической зоне, а самая южная часть (южнее 55° с.ш.) – в зоне умеренных широт. В соответствии с этим определяются и климатические различия между разными районами моря.

К северу от $55-56^{\circ}$ с.ш. в климате моря, в особенности, в его прибрежных районах, заметно выражены черты континентальности. Однако по мере удаления от берегов эти черты ослабевают. Южнее этих параллелей климат мягкий, типично морской. Для него характерны небольшая суточная и годовая амплитуды температуры воздуха, большая облачность и значительное количество осадков.

Вследствие более сильного выхолаживания и менее значительного прогрева прилегающей к морю части Азиатского материка западные районы моря холоднее восточных.

Зимой акватория Баренцева моря находится под влиянием Алеутской депрессии. На восточную часть моря поступает относительно теплый и влажный воздух с Тихого океана, а в западную часть – холодный и сухой арктический воздух. Средняя температура воздуха в феврале изменяется с -24° С на севере до $0 \div -4^{\circ}$ С на юге.

Летом Алеутская депрессия практически исчезает и над акваторией Баренцева моря господствуют ветры южных направлений. Средняя температура воздуха в августе изменяется от $+5^{\circ}$ С на севере до $+10^{\circ}$ С на юге.

Среднее количество облачности составляет 5–7 баллов на севере акватории, и 7–8 баллов – на юге.

Среднее количество осадков изменяется от 200–400 мм в год на севере до 1500 мм в год на юге.

2. Анализ многолетних рядов температуры воздуха и осадков

2.1 Выбор пунктов наблюдений

Для анализа климатических изменений температуры воздуха и осадков над акваторией Берингова моря следует выбрать несколько метеорологических станций, каждая из которых характеризовала бы различные его части. Наблюдательные станции расположены вдоль побережья Северной Камчатки, Корякского нагорья, Чукотки и Западной Аляски, а также на Командорских и Алеутских островах.

Было выбрано 6 метеостанций, расположение которых показано на рис. 2.1, а названия и координаты указаны в табл. 2.1. Наблюдательные станции были выбраны таким образом, чтобы они равномерно были распределены по границам Берингова моря и наилучшим образом отражали климатические условия в различных его районах. Исключение составляет станция 70308, которая расположена внутри Берингова моря в его юго-восточной части.



Рисунок 2.1 – Расположение пунктов наблюдения в Беринговом море

Названия и координаты выбранных в Беринговом море станций

Индекс	Наименование	Продолжительность наблюдений	Кол-во лет	Широта, град	Долгота, град
25563	Анадырь	1967-2018	52	64,8	177,6
32618	Никольское	1967-2018	52	55,2	166
70200	Nome	1907-2018	112	64,5	-165,4
70308	Saint Paul	1871-2018	148	57,2	-170,2
70316	Cold Bay	1943-2018	76	55,2	-162,7
70454	Adak	1943-1990	48	51,9	-176,6

Многолетние ряды среднемесячных температур воздуха и сумм месячных осадков скачаны с сайта «Погода и климат» [18] и сайта Королевского метеорологического института Нидерландов[19].

2.2 Оценивание качества исходных данных

Когда собраны многолетние наблюдения, следует оценить качество исходной информации для расчета климатических характеристик. Оценка однородности многолетних рядов наблюдений - первая процедура, которая выполняется перед климатической обработкой. Статистической однородностью временных рядов называют принадлежность всех элементов ряда метеорологических наблюдений и его выборочных статистических параметров (среднего арифметического и дисперсии) к одной совокупности.

Причинами нарушений однородности могут являться естественные или методические. Нарушение однородности обусловлено естественной климатической изменчивостью и более длительными изменениями климата. Принято считать, что естественная климатическая изменчивость – это

случайность, хотя периодически происходят определенные изменения климатических характеристик в результате смены типа циркуляции атмосферы. В качестве основных методических причин нарушения однородности можно назвать следующие:

- изменение времени проведения метеорологических наблюдений;
- изменения в методике расчета климатических характеристик.
- замена типа и вида измерительных приборов;
- перенос обсерватории в другое место;
- различия условий наблюдения на станции (естественное или антропогенное изменение рельефа, ландшафта или гидрографии)
- малый процент наблюдений;
- индивидуальные нарушения в наблюдении.

Сначала климатические данные, представленные в виде хронологических графиков изменения среднесуточной температуры января и июля, за годовой суммой осадков были изучены методом визуального анализа. При помощи визуального анализа можно выявить неоднородность климатических рядов без использования статистических методов, когда естественная изменчивость климатической характеристики резко меняется. Для обнаружения наличия (отсутствия) пропусков в данных наблюдениях необходим визуальный анализ.

В гидрометеорологии различают два вида однородности[1]:

- однородность эмпирического распределения, которая проявляется в наличии резко отклоняющихся от общей совокупности экстремумов;
- стационарность – однородность средних значений и дисперсий последовательных частей временного ряда (т. е. однородность во времени).

Методика оценивания однородности климатологических рядов включает в себя три этапа:

- проверка однородности эмпирического распределения на экстремумы;
- проверка стационарности дисперсий;

- оценивание стационарности средних значений с учетом нестационарности экстремумов и дисперсий.

Чтобы использовать метод, необходимо создать базу данных однородных непрерывных и длительных рядов климатических характеристик для статистического моделирования.

Проверка качества исходных данных начинается с оценивания однородности экстремумов, так как они влияют на параметры ряда и дисперсию. Неоднородность экстремумов обусловлена малой длительностью наблюдений, не соответствующей фактической повторяемости редких событий.

На основе статистического и генетического анализа оценивают однородность рядов наблюдений. В статистике для проверки однородности экстремумов используются критерии Диксона и Смирнова-Граббса. Исследования генетических причин являются частью генетического анализа. Он позволяет выявить физические причины, которые вызывают неоднородность исходных данных наблюдений.

Статистики критериев Диксона позволяют последовательно оценить до трех экстремумов, отклоняющихся от эмпирического распределения, и рассчитываются по формулам:

1) для максимального члена Y_n ранжированной в возрастающем порядке выборки $\{Y_n\}$ [2]:

$$D1_n = (Y_n - Y_{n-1}) / (Y_n - Y_1) \quad (2.1)$$

$$D2_n = (Y_n - Y_{n-1}) / (Y_n - Y_2) \quad (2.2)$$

$$D3_n = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_2) \quad (2.3)$$

$$D4_n = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_3) \quad (2.4)$$

$$D5_n = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_1) \quad (2.5)$$

где $D1_n, \dots, D5_n$ – собственно статистики критериев Диксона для максимального члена выборки; $Y_1, Y_2, \dots, Y_{n-1}, Y_n$ – элементы ранжированной в возрастающем порядке выборки $\{Y_n\}$; n – объем выборки;

2) для минимального члена Y_1 ранжированной в возрастающем порядке выборки $\{Y_n\}$ [2]:

$$D1_1 = (Y_1 - Y_2)/(Y_1 - Y_n) \quad (2.6)$$

$$D2_1 = (Y_1 - Y_2)/(Y_1 - Y_{n-1}) \quad (2.7)$$

$$D3_1 = (Y_1 - Y_3)/(Y_1 - Y_{n-1}) \quad (2.8)$$

$$D4_1 = (Y_1 - Y_3)/(Y_1 - Y_{n-2}) \quad (2.9)$$

$$D5_1 = (Y_1 - Y_3)/(Y_1 - Y_n) \quad (2.10)$$

где $D1_1, \dots, D5_1$ – статистики критериев Диксона для минимального члена выборки.

Критерии однородности Смирнова-Граббса позволяют оценить однородность только одного экстремума и является параметрическим, так как для ее расчета используются такие параметры распределения как среднее значение и среднее квадратическое отклонение. Статистика критерия Смирнова-Граббса для максимального члена Y_n ранжированной последовательности $\{Y_n\}$ рассчитывается по формуле [2]:

$$G_n = (Y_n - Y_{cp})/\sigma_Y, \quad (2.11)$$

где: Y_{cp} , σ_Y – среднее значение и среднее квадратическое отклонение анализируемой выборки.

Статистика критерия Смирнова-Граббса для минимального члена Y_1 рассчитывается по формуле [2]:

$$G_{n1} = (Y_{cp} - Y_1)/\sigma_Y. \quad (2.12)$$

Расчетные значения статистик критериев Диксона и Смирнова-Граббса сравниваются с их критическими табличными значениями [2], полученными методом статистических испытаний, при уровне значимости $\alpha = 5\%$, что соответствует принятию нулевой гипотезы об однородности с вероятностью 95%. Гипотеза об однородности достоверно принимается в случае, если расчетное

значение статистики меньше соответствующего критического при уровне значимости $\alpha \geq 5\%$.

В случаях, если расчетные значения статистик больше критических, но ненамного, дополнительно определяется уровень значимости, соответствующий расчетному значению. Если уровень значимости α находится в промежутке от 3 до 5 % гипотеза однородности может быть принята условно, а в промежутке – от 1 до 3 %, гипотеза также условно отклоняется. В случае если уровень значимости, соответствующий расчетному значению статистики $\alpha < 1\%$ гипотеза однородности достоверно отклоняется.

С помощью статистических критериев Диксона и Смирнова-Граббса можно определить выборки, которые соответствуют нормальному (симметричному) закону распределения. Отличие же выборки гидрометеорологических данных состоит в том, что их эмпирические распределения часто несимметричны. К тому же, их временный ряд не является полностью случайной выборкой из-за циклических колебаний различных масштабов времени. Критические табличные значения используются для учета влияния асимметрии и автокорреляции. Как правило, для критериев оценки однородности асимметрия увеличивает критические значения и автокорреляция их уменьшает.

Второй и третий этап проверки качества климатических рядов – это оценивание стационарности дисперсий и средних значений. Для этого используется критерий Фишера и Стьюдента. Сформированный временный ряд делится на две подвыборки, при этом границы разбиения выбираются исходя из дат предполагаемого нарушения стационарности. В случаях отсутствия априорной информации о сроках нарушения стационарности выборка делится на две одинаковых подвыборки.

По каждой подвыборке вычисляются значения средних ($Y_{cpj}, j = 1, 2$) и дисперсий ($\sigma_j, j = 1, 2$), которые используются для получения расчетных значений статистики Фишера:

$$F = \sigma_j^2 / \sigma_{j+1}^2, \text{ при } \sigma_j^2 \geq \sigma_{j+1}^2 \quad (2.13)$$

где σ_j^2 , σ_{j+1}^2 – соответственно дисперсии двух подвыборок объемом n_1 и n_2 .

Условие, содержащееся в выражении (2.13) означает, что вне зависимости от хронологии периодов n_1 и n_2 , в числителе находится наибольшая из двух дисперсий.

Гипотеза о стационарности дисперсий принимается при заданном уровне значимости α , если расчетное значение статистики критерия F меньше критического F^* при степенях свободы, соответствующих объемам подвыборок n_1 и n_2 :

$$F < F^* . \quad (2.14)$$

Критические табличные значения статистики Фишера F^* получены методом статистических испытаний в зависимости от уровня значимости α , коэффициентов внутрирядной r и межрядной R корреляции.

При объемах подвыборок больше или равных 25 корректно использовать классическое F-распределение для нормально распределенных независимых случайных величин со степенями свободы n_{1F} и n_{2F} , зависящими от коэффициентов автокорреляции и асимметрии:

$$n_{1F} = \frac{n_1 g}{1 + \frac{2r^2}{1-r^2} \left[1 - \frac{1-r^{2n_1}}{n_1(1-r^2)} \right]} , \quad (2.15)$$

$$n_{2F} = \frac{n_2 g}{1 + \frac{2r^2}{1-r^2} \left[1 - \frac{1-r^{2n_2}}{n_2(1-r^2)} \right]} , \quad (2.16)$$

где: g – коэффициент, учитывающий влияние асимметрии исходной совокупности, r – коэффициент автокорреляции между смежными членами ряда.

Оценивание стационарности средних значений осуществляется по критерию Стьюдента также путем сравнения расчетных и критических значений статистик.

Расчетное значение статистики критерия Стьюдента определяется по формуле:

$$t = \frac{Y_{cpI} - Y_{cpII}}{\sqrt{n_1 \sigma_I^2 + n_2 \sigma_{II}^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (2.17)$$

где Y_{cpI} , Y_{cpII} , σ_I^2 , σ_{II}^2 – средние значения и дисперсии двух смежных выборок.

Критические значения статистики Стьюдента t'_α определяются по формуле:

$$t'_\alpha = C_t t_\alpha, \quad (2.18)$$

где C_t – эмпирический коэффициент, зависящий от коэффициента автокорреляции; t_α – критическое значение статистики Стьюдента для случайной совокупности при том же числе степеней свободы $k = n_1 + n_2 - 2$.

Как следует из анализа формулы (2.18), на критические значения статистик критерия Стьюдента влияет только автокорреляция.

Оценивание стационарности средних значений по критерию Стьюдента осуществляется путем сравнения расчетных и критических значений статистик: если расчетное значение меньше критического при заданном уровне значимости, гипотеза о стационарности принимается.

2.3 Оценка однородности и стационарности количества осадков

Анализ однородности эмпирических распределений среднегодового количества осадков было осуществлено по методике, описанной в п. 2.2.

Первоначально были построены хронологические графики годовых сумм осадков для выбранных метеостанций, представлены на рисунках 2.2–2.7.

Визуальный анализ рисунка 2.2 показал, что в Анадыре в 1989 г. наблюдался резко выраженный максимум, который приблизительно на 100 мм больше экстремальных значений в другие годы за рассматриваемый период. Кроме того, в период 1967-1976 гг наблюдалось тенденция к уменьшению количества осадков, а после 1976 г количество осадков увеличилось в среднем на 50 мм.

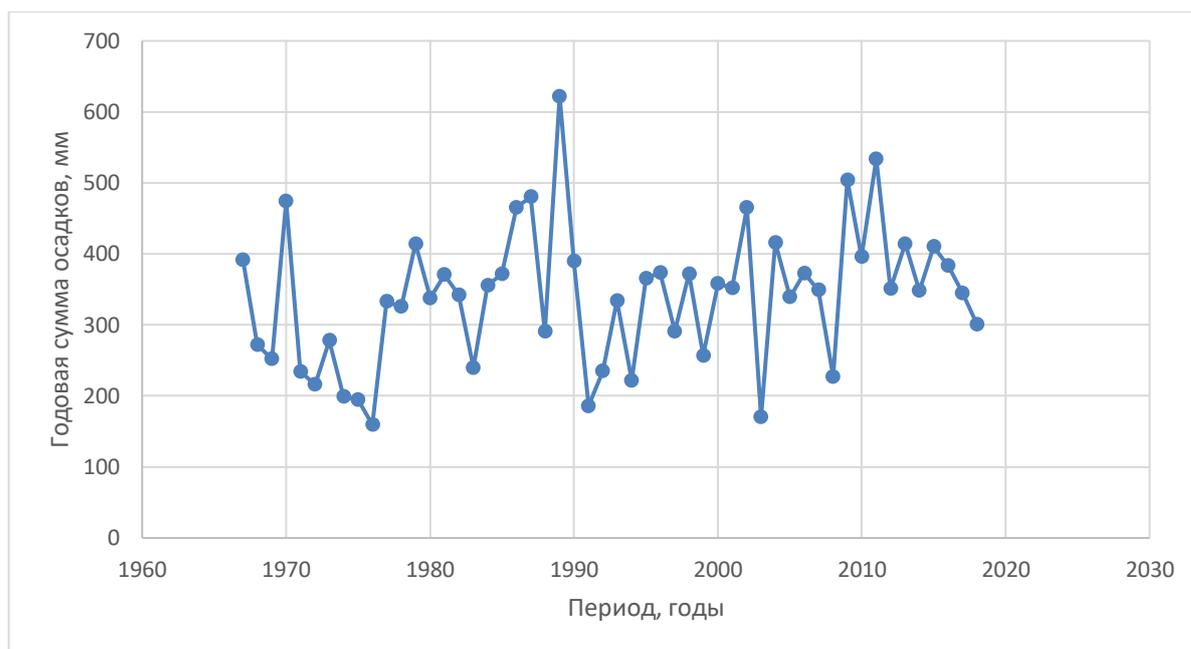


Рисунок 2.2 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции Анадырь

По формулам (2.1)-(2.12) произведены расчеты статистик по критериям Диксона и Смирнова-Граббса. Результаты оценивания однородности для станции Анадырь представлены в табл. 2.2.

Из анализа данных табл. 2.2 следует сделать вывод, что временной ряд годовых сумм осадков на станции Анадырь за рассматриваемый период является однородным, включая резко выраженный максимум 1989 г.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений по критериям Фишера и Стьюдента временной ряд годовых сумм осадков на

станции Анадырь был разбит на две не равные подвыборки: с 1967 по 1976 гг. и с 1977 по 2018 гг. Для каждой подвыборки были рассчитаны средние значения $Y_{cpj}, j = 1, 2$ и дисперсии $\sigma_j, j = 1, 2$.

Таблица 2.2

Результаты оценивания однородности эмпирического распределения годовых сумм осадков для метеостанции Анадырь

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,19	0,27	однороден
max	Диксон 2	0,19	0,29	однороден
max	Диксон 3	0,26	0,35	однороден
max	Диксон 4	0,27	0,37	однороден
max	Диксон 5	0,26	0,33	однороден
max	Смирнов-Граббс	2,90	3,30	однороден
min	Диксон 1	0,02	0,16	однороден
min	Диксон 2	0,03	0,20	однороден
min	Диксон 3	0,07	0,23	однороден
min	Диксон 4	0,08	0,25	однороден
min	Диксон 5	0,06	0,17	однороден
min	Смирнов-Граббс	1,86	2,58	однороден

По полученным значениям по формулам (2.13) и (2.17) получены расчетные значения статистик критериев Фишера и Стьюдента. По методике, описанной в п. 2.2. определены критические значения статистик Фишера и Стьюдента. Результаты оценивания стационарности для станции Анадырь представлены в Табл. 2.3.

Результаты оценивания стационарности эмпирического распределения годовых сумм осадков для метеостанции Анадырь

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,148818	2,12	однороден
Стьюдент	2,756055	2,16972	неоднороден

Расчетное значение статистики критерия Фишера на станции Анадырь меньше критического, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии. В результате оценивания стационарности средних значений на станции Анадырь по критерию Стьюдента гипотеза стационарности отклоняется.

На рисунке 2.3 изображена хронология годовых сумм осадков на станции Никольское.



Рисунок 2.3 - Хронологический график годовых сумм осадков для станции Никольское

Визуальный анализ графика 2.3 показал, что в Никольском в 1997 г. наблюдался резко выраженный минимум, который приблизительно на 130 мм

меньше экстремальных значений в другие годы за рассматриваемый период. Кроме того, в период 1998-2012 гг наблюдалось тенденция к уменьшению количества осадков.

Результаты оценивания однородности для станции Никольское представлены в Табл. 2.4. Анализ табл. 2.4 показывает, что временной ряд годовых сумм осадков на станции Никольское за рассматриваемый период является однородным, включая резко выраженный минимум в 1997 году.

Таблица 2.4

Результаты оценивания однородности эмпирического распределения годовых сумм осадков для метеостанции Никольское

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,02	0,22	однороден
max	Диксон 2	0,02	0,22	однороден
max	Диксон 3	0,05	0,30	однороден
max	Диксон 4	0,05	0,32	однороден
max	Диксон 5	0,05	0,28	однороден
max	Смирнов-Граббс	2,13	3,0	однороден
min	Диксон 1	0,05	0,21	однороден
min	Диксон 2	0,06	0,22	однороден
min	Диксон 3	0,17	0,28	однороден
min	Диксон 4	0,17	0,30	однороден
min	Диксон 5	0,17	0,26	однороден
min	Смирнов-Граббс	2,41	3,00	однороден

По критериям Фишера и Стьюдента временной ряд годовых сумм осадков на станции Никольское был разделен на две неравные подвыборки: с 1967 по 1996 гг. и с 1997 по 2018 гг.

Для каждой подвыборки были рассчитаны средние значения Y_{cpj} , $j = 1, 2$ и дисперсии σ_j , $j = 1, 2$. Расчетные значения статистик критериев Фишера и Стьюдента получены по формулам (2.13) и (2.17). Как было сказано ранее по методике, описанной в п 2.2. определены критические величины статистик Фишера и Стьюдент. В таблице 2.5 приведены результаты оценки стационарности для станции Никольское.

Таблица 2.5

Результаты оценивания стационарности эмпирического распределения годовых сумм осадков для метеостанции Никольское

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,273195	2,035218	однороден
Стьюдент	1,421511	2,04918	однороден

Расчетное значение статистики критерия Фишера на станции Никольское меньше критического, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии. В результате оценивания стационарности средних значений на станции Никольское по критерию Стьюдента гипотеза стационарности принимается.

Анализ рисунка 2.4 показывает, что на станции Nome в 1922 году наблюдался резко выраженный максимум, который приблизительно на 150 мм больше экстремальных значений других лет за этот период. Кроме того, в период 1920-1971 гг наблюдалась тенденция к снижению осадков, после 1976 года количество осадков увеличилось на 100 мм и стабилизировалось.

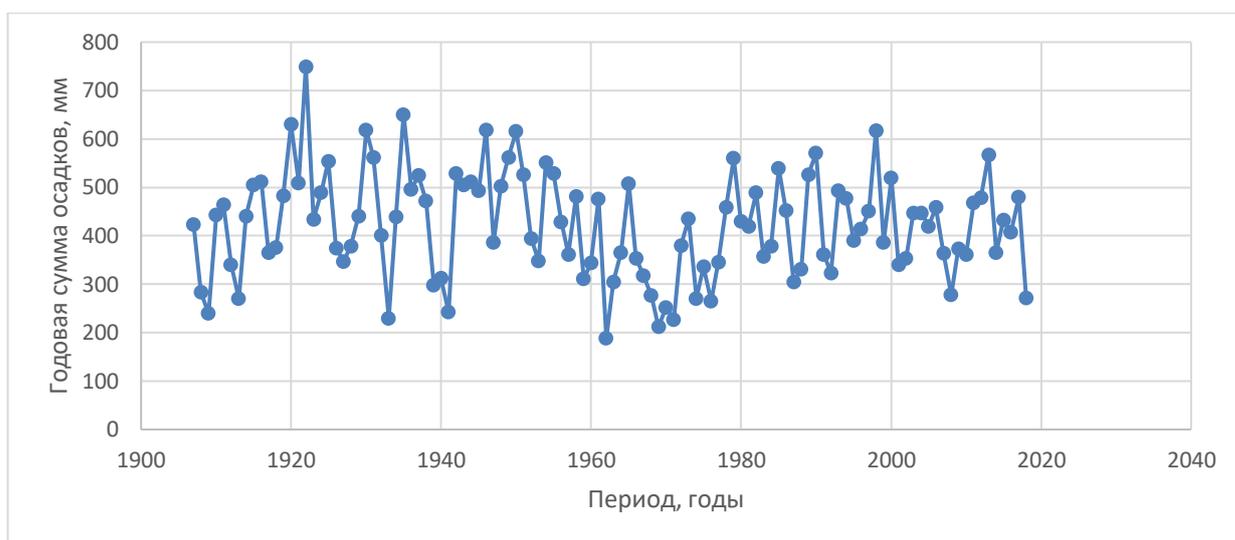


Рисунок 2.4 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции Nome

Оценки однородности приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6

Оценки однородности годовых сумм осадков для метеостанции Nome

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,18	0,19	однороден
max	Диксон 2	0,18	0,20	однороден
max	Диксон 3	0,22	0,24	однороден
max	Диксон 4	0,23	0,25	однороден
max	Диксон 5	0,21	0,24	однороден
max	Смирнов-Граббс	3,00	3,34	однороден
min	Диксон 1	0,04	0,13	однороден
min	Диксон 2	0,05	0,14	однороден
min	Диксон 3	0,08	0,18	однороден
min	Диксон 4	0,09	0,19	однороден

min	Диксон 5	0,07	0,17	однороден
min	Смирнов-Граббс	2,13	2,92	однороден

Таблица 2.6 показывает, что временной ряд годовых сумм осадков на станции Nome за рассматриваемый период является однородным, включая резко выраженный максимум 1922 г.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений по критериям Фишера, Стьюдента временной ряд годовых сумм осадков был разбит на две не равные подвыборки: 1920-1971 гг и 1972-2018 гг. Период до 1920 г исключен из рассмотрения, т.к. не отражает современных климатических изменений.

В таблице 2.7 приведены оценки стационарности для станции Nome. Расчетные значения статистики Фишера и Стьюдента меньше критических значений, что говорит о принятии гипотезы стационарности. Расчетные значения статистики Фишера больше критических значений, что говорит об отклонении гипотезы стационарности.

Таблица 2.7

Результаты оценивания стационарности эмпирического распределения годовых сумм осадков для метеостанции NOME

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	2,266974	1,758	неоднороден
Стьюдент	0,812805	2,75915	однороден

Анализ рисунка 2.5 показал, что на станции Saint Paul до 1911 г наблюдения за количеством осадков проводились не регулярно, поэтому статистический анализ проводился для данных с 1911 г. На станции Saint Paul в 1915 и в 1987 гг наблюдались резко выраженные максимумы, а в 1943 г

наблюдался резко выраженный минимум, которые более чем на 50 мм в год отличались от других экстремальных значений.

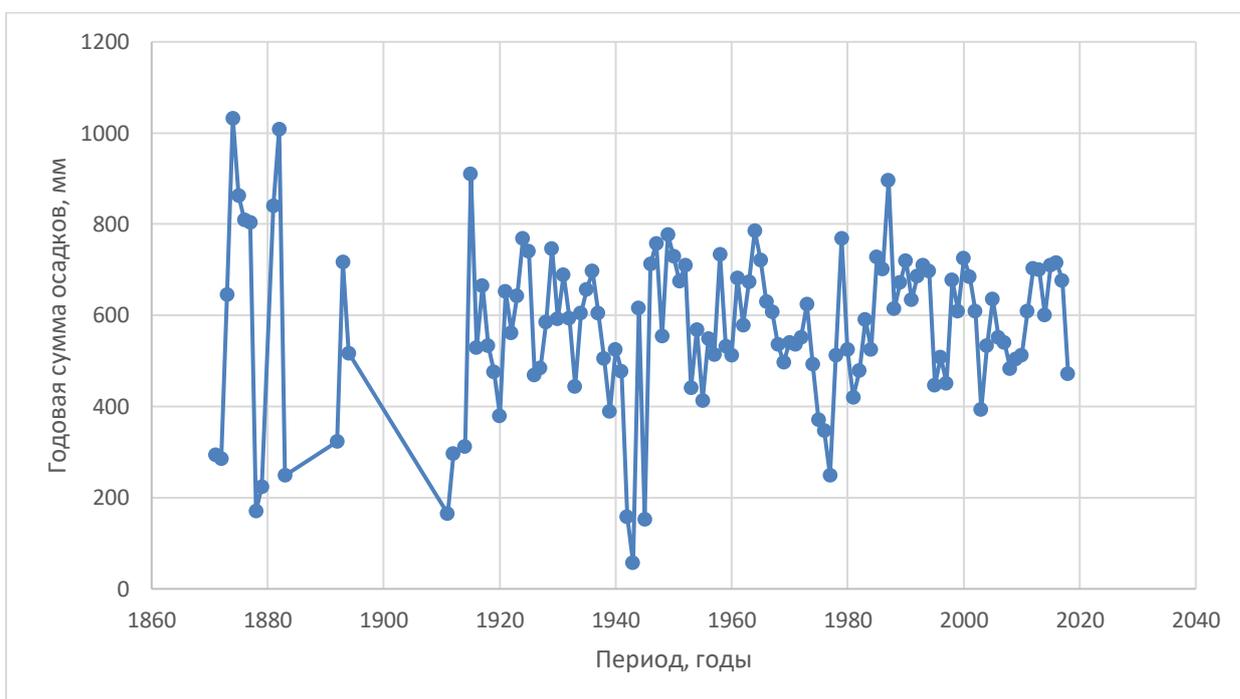


Рисунок 2.5- Хронологический график годовых сумм осадков для станции Saint Paul

Оценки проверки однородности представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8

Оценки однородности годовых сумм осадков для метеостанции Saint Paul

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,02	0,20	однороден
max	Диксон 2	0,03	0,25	однороден
max	Диксон 3	0,14	0,29	однороден
max	Диксон 4	0,14	0,30	однороден
max	Диксон 5	0,13	0,29	однороден

max	Смирнов-Граббс	2,58	3,70	однороден
min	Диксон 1	0,10	0,11	однороден
min	Диксон 2	0,10	0,12	однороден
min	Диксон 3	0,10	0,16	однороден
min	Диксон 4	0,11	0,16	однороден
min	Диксон 5	0,10	0,15	однороден
min	Смирнов-Граббс	2,84	2,54	неоднороден

Таблица 2.8 показывает, что не весь временной ряд годовых сумм осадков на станции Saint Paul за рассматриваемый период является однородным. Не однороден по критерию min Смирнов-Граббс.

В целях оценивания стационарности дисперсии и средних значений по критериям Стьюдента и Фишера временной ряд годовых сумм осадков на станции Saint Paul был разбит на равные выборки. В таблице 2.9 приведены оценки стационарности. Расчетное значение статистики критерия Стьюдента на станции Saint Paul меньше критического, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии. В результате оценивания стационарности средних значений на станции Saint Paul по критерию Фишера гипотеза стационарности отклоняется.

Таблица 2.9

Оценки стационарности годовых сумм осадков для метеостанции Saint Paul

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	3,271605	1,64	неоднороден
Стьюдент	1,164175	2,7918	однороден

Анализ графика 2.6 показал, что на станции Cold Bay в 2000 г наблюдался максимум, который приблизительно на 80 мм больше экстремальных значений

в другие годы за рассматриваемый период. На протяжении всего периода наблюдалась тенденция к увеличению количества осадков.

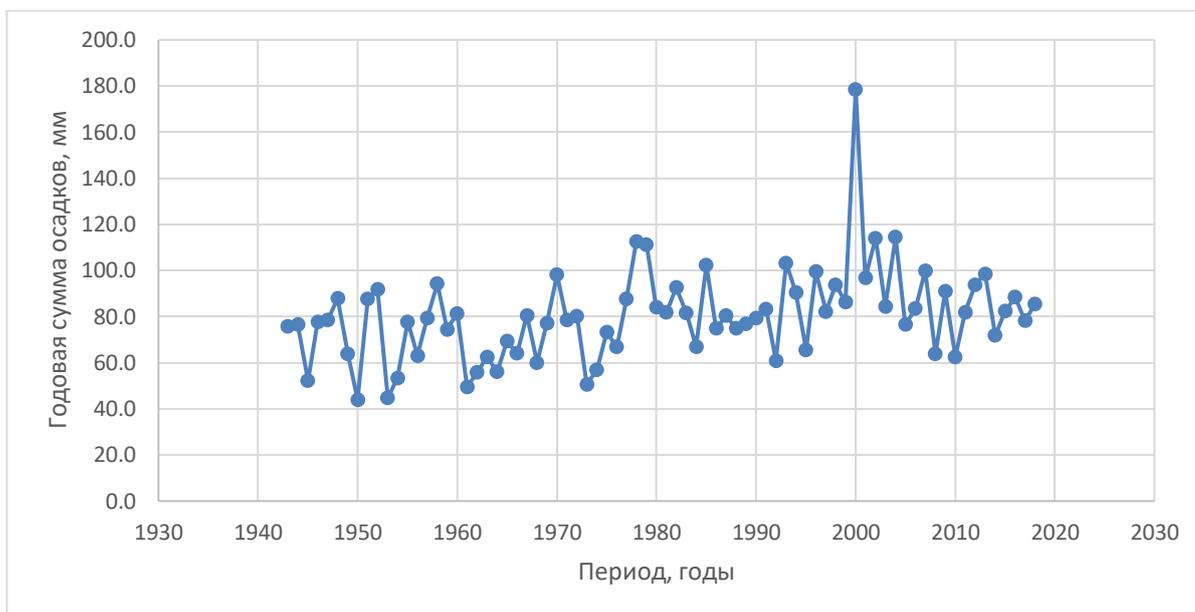


Рисунок 2.6 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции Cold Bay

Анализ однородности эмпирических распределений среднегодового количества осадков было осуществлено по методике, описанной в п. 2.2.

В таблице 2.10 приведены результаты оценки однородности для станции Cold Bay.

Таблица 2.10

Результаты оценивания однородности эмпирического распределения годовых сумм осадков для метеостанции Cold Bay

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,46	0,34	неоднороден
max	Диксон 2	0,48	0,38	неоднороден

max	Диксон 3	0,48	0,46	неоднороден
max	Диксон 4	0,48	0,46	неоднороден
max	Диксон 5	0,47	0,46	неоднороден
max	Смирнов-Граббс	4,90	4,65	неоднороден
min	Диксон 1	0,03	0,04	однороден
min	Диксон 2	0,05	0,05	неоднороден
min	Диксон 3	0,06	0,06	неоднороден
min	Диксон 4	0,06	0,07	однороден
min	Диксон 5	0,03	0,05	однороден
min	Смирнов-Граббс	1,97	1,60	неоднороден

Из анализа данных табл. 2.10 следует сделать вывод, что временной ряд годовых сумм осадков на станции Cold Bay за рассматриваемый период является неоднородным, исключения по критериям min Диксон 1, 4, 5.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений по критериям Фишера и Стьюдента временной ряд годовых сумм осадков на станции Cold Bay был разбит на две равные подвыборки. Результаты оценивания стационарности представлены в Табл. 2.11.

Таблица 2.11

Результаты оценивания стационарности эмпирического распределения годовых сумм осадков для метеостанции Cold Bay

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,401981	2,03	однороден
Стьюдент	3,32274	2,4278	неоднороден

Расчетное значение статистики критерия Фишера на станции Cold Bay меньше критического, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии. В результате оценивания стационарности средних значений на станции Cold Bay по критерию Стьюдента гипотеза стационарности отклоняется.

Визуальный анализ графика 2.7 показал, что на станции Adak в 1981 г. наблюдался резко выраженный минимум, который приблизительно на 600 мм меньше экстремальных значений в другие годы за рассматриваемый период. Кроме того, в период 1943-1955 гг наблюдалась тенденция к увеличению количества осадков до максимума равного 2323 мм, а затем падение до уровня 950мм в 1960 году.

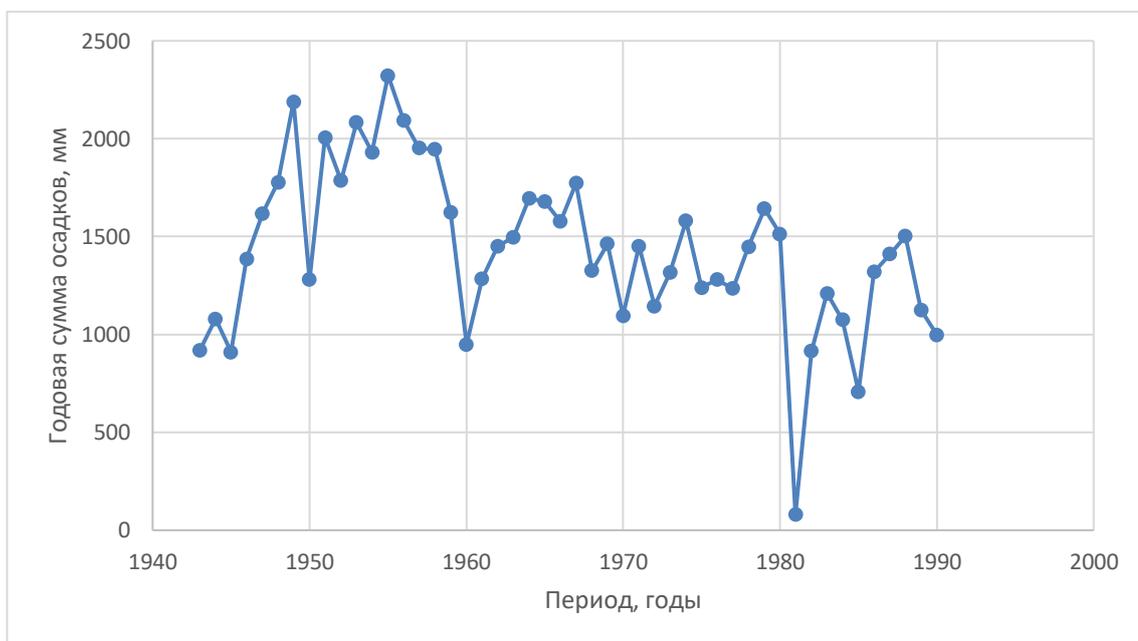


Рисунок 2.7 - Хронологический график годовых сумм осадков для станции Adak

Результаты расчета статистик по критериям Диксона и Смирнова-Граббса для станции Adak представлены в табл. 2.12.

Результаты оценивания однородности эмпирического распределения годовых сумм осадков для метеостанции Adak

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,06	0,26	однороден
max	Диксон 2	0,06	0,28	однороден
max	Диксон 3	0,11	0,30	однороден
max	Диксон 4	0,14	0,36	однороден
max	Диксон 5	0,10	0,34	однороден
max	Смирнов-Граббс	2,02	3,21	однороден
min	Диксон 1	0,06	0,13	однороден
min	Диксон 2	0,06	0,14	однороден
min	Диксон 3	0,30	0,19	неоднороден
min	Диксон 4	0,31	0,20	неоднороден
min	Диксон 5	0,28	0,17	неоднороден
min	Смирнов-Граббс	2,94	2,38	неоднороден

По данным таблицы 2.12 можно сделать вывод, что временной ряд годовых сумм осадков на станции Adak неоднороден в четырех случаях, при оценке критериев min Диксон 3-5 и Смирнова-Граббс. В остальных случаях ряд однороден.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений по критериям Фишера и Стьюдента временной ряд годовых сумм осадков на станции Анадырь был разбит на две не равные подвыборки: с 1946 по 1967 гг. и с 1968 по 1990 гг. Оценки стационарности для станции Adak представлены в табл. 2.13.

Оценки стационарности годовых сумм осадков для метеостанции Adak

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,000413	2,98	однороден
Стьюдент	4,915141	3,589904	неоднороден

В результате оценивания стационарности средних значений на станции Adak по критерию Фишера гипотеза стационарности принимается. По критерию Стьюдента- гипотеза отклоняется.

2.4 Оценка однородности и стационарности среднемесячных температур воздуха для января

Для анализа однородности эмпирических распределений среднемесячной температуры была использована методика, описанная в п. 2.2.

Сначала были построены хронологические графики среднемесячной температуры за январь и июль на метеостанциях.

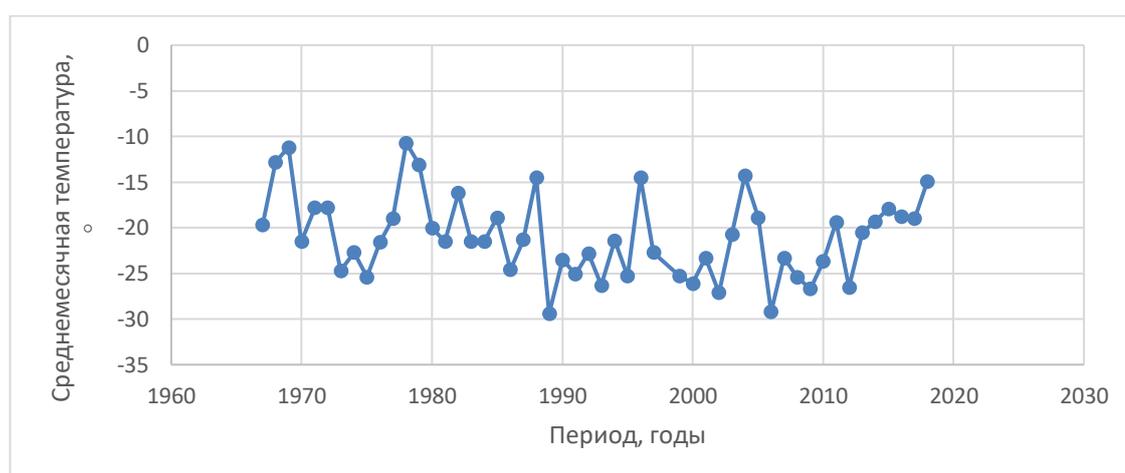


Рисунок 2.8 – Хронологический график среднемесячных температур января для станции Анадырь

Визуальный анализ графика 2.8 показал, что в Анадыре в январе наблюдалась тенденция к похолоданию до 2006 г, затем тенденция к потеплению. Максимально низкая среднемесячная температура наблюдалась в 1989 году и составляла $-29,4^{\circ}\text{C}$.

Результаты оценивания однородности по критериям Диксона и Смирнова-Граббса для станции Анадырь представлены в Табл. 2.14.

Таблица 2.14

Результаты оценивания однородности эмпирического распределения среднемесячных температур января для станции Анадырь

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,03	0,26	однороден
max	Диксон 2	0,03	0,28	однороден
max	Диксон 3	0,11	0,35	однороден
max	Диксон 4	0,13	0,36	однороден
max	Диксон 5	0,11	0,34	однороден
max	Смирнов-Граббс	2,26	3,35	однороден
min	Диксон 1	0,01	0,16	однороден
min	Диксон 2	0,01	0,18	однороден
min	Диксон 3	0,13	0,22	однороден
min	Диксон 4	0,14	0,23	однороден
min	Диксон 5	0,12	0,18	однороден
min	Смирнов-Граббс	1,86	2,51	однороден

Из анализа данных табл. 2.14 следует сделать вывод, что временной ряд среднемесячных температур на станции Анадырь за рассматриваемый период является однородным. Включая минимумы и максимумы за весь период.

Далее временной ряд был разбит на две не равные подвыборки: с 1967 по 1989 гг. и с 1990 по 2018 гг. По методике, описанной в п. 2.2. определены критические значения статистик Фишера и Стьюдента. Результаты оценивания стационарности для станции Анадырь представлены в Табл. 2.15.

Таблица 2.15

Оценки стационарности эмпирического распределения среднемесячных температур января для метеостанции Анадырь

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,389251	2,23	однороден
Стьюдент	2,203271	2,59161	однороден

Расчетные значение статистики критерия Фишера, а также критерия Стьюдента меньше их критических значений. Это говорит о принятии гипотезы стационарности.

На графике 2.9 изображена хронология среднемесячных температур января на станции Никольское. Визуальный анализ графика 2.9 показал, что в Никольском в 1996 г. наблюдался резко выраженный максимум , который составляет $0,2^{\circ}\text{C}$, а в 2001 году выраженный минимум равный -7°C .



Рисунок 2.9 – Хронологический график среднемесячных температур января для станции Никольское

Произведены расчеты статистик по критериям Диксона и Смирнова-Граббса. Результаты представлены в Табл. 2.16.

Таблица 2.16

Результаты оценивания однородности эмпирического среднемесячных температур января для метеостанции Никольское

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,11	0,22	однороден
max	Диксон 2	0,14	0,24	однороден
max	Диксон 3	0,21	0,30	однороден
max	Диксон 4	0,22	0,32	однороден
max	Диксон 5	0,17	0,28	однороден
max	Смирнов-Граббс	2,48	3,00	однороден
min	Диксон 1	0,22	0,21	не однороден
min	Диксон 2	0,25	0,22	не однороден

min	Диксон 3	0,27	0,28	однороден
min	Диксон 4	0,28	0,30	однороден
min	Диксон 5	0,24	0,26	однороден
min	Смирнов-Граббе	2,71	3,00	однороден

По результатам табл. 2.16 следует сделать вывод, что временной ряд годовых сумм осадков на станции Никольское за рассматриваемый период не является однородным по двум критериям.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений по критериям Фишера и Стьюдента временной ряд разбиваем на две равные подвыборки. Получены расчетные и критические значения статистик критериев Фишера и Стьюдента. Результаты представлены в таблице 2.17.

Таблица 2.17

Оценки стационарности эмпирического распределения среднемесячных температур января для метеостанции Никольское

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,321384	1,98	однороден
Стьюдент	1,02402	2,02909	однороден

Расчетное значение статистики по обоим критериям меньше их критических значений, следовательно обе гипотезы стационарности принимаются.

Из анализа графика 2.10 видно, что на станции Nome хронология температур за январь не равномерна, с большими скачками температур и с резко выраженными минимумами в 1989 и 2012 годах, равными $-26,2^{\circ}\text{C}$ и $-26,9^{\circ}\text{C}$ соответственно.

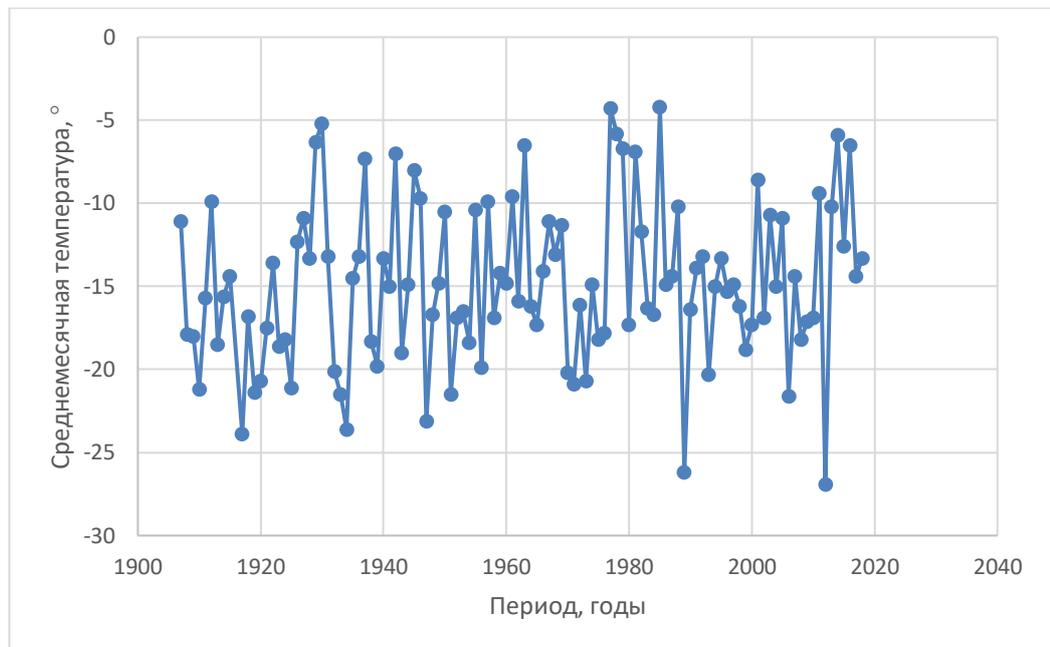


Рисунок 2.10 – Хронологический график среднемесячных температур января для станции Nome

Оценки однородности для станции Nome представлены в Табл. 2.18.

Таблица 2.18

Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячных температур января для метеостанции Nome

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,00	0,20	однороден
max	Диксон 2	0,00	0,21	однороден
max	Диксон 3	0,04	0,26	однороден
max	Диксон 4	0,05	0,27	однороден
max	Диксон 5	0,04	0,25	однороден
max	Смирнов-Грabbс	2,23	3,37	однороден
min	Диксон 1	0,02	0,14	однороден
min	Диксон 2	0,02	0,15	однороден

min	Диксон 3	0,03	0,20	однороден
min	Диксон 4	0,03	0,21	однороден
min	Диксон 5	0,03	0,18	однороден
min	Смирнов-Граббс	2,41	2,98	однороден

Из табл. 2.18 следует сделать вывод, что временной ряд годовых сумм осадков на станции Nome за рассматриваемый период является однородным, включая резко выраженные минимумы.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений по критериям Фишера и Стьюдента временной ряд среднемесячных температур января на станции был разбит на две равные подвыборки. Оценки стационарности для станции Nome представлены в Табл. 2.19.

Расчетные значения статистики Фишера и Стьюдента больше критических значений, что говорит об отклонении гипотез стационарности.

Таблица 2.19

Результаты оценивания стационарности эмпирического распределения среднемесячных температур января для метеостанции Nome

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,122348	1,62	однороден
Стьюдент	0,586849	2,1384	однороден

Из графика 2.11 видны пропуски, что говорит о перерывах в наблюдениях на станции Saint Paul в период 1895 года по 1916 год. Максимально низкие среднемесячные температуры наблюдались в 1919 году ($-14,9^{\circ}\text{C}$).

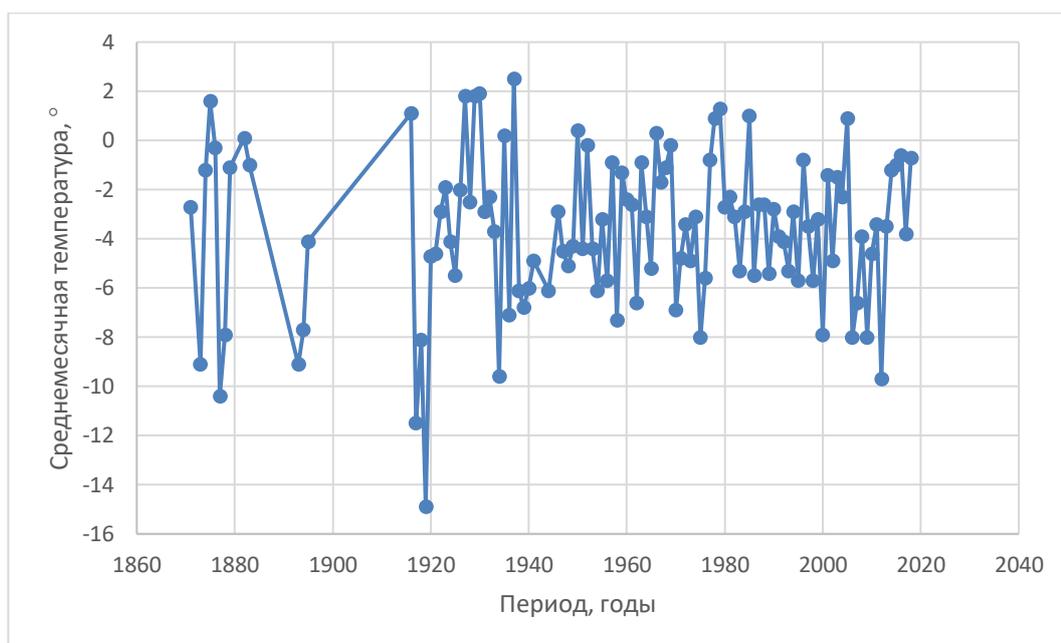


Рисунок 2.11 – Хронологический график среднемесячных температур января для станции Saint Paul

Произведены расчеты статистик по критериям Диксона и Смирнова-Граббса, результаты которых представлены в Табл. 2.20, из анализа которых следует сделать вывод, что временной ряд среднемесячных температур января однороден только по максимальным критериям.

Таблица 2.20

Результаты оценивания однородности эмпирического распределения среднемесячных температур января для метеостанции Saint Paul

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,03	0,25	однороден
max	Диксон 2	0,04	0,26	однороден
max	Диксон 3	0,05	0,31	однороден
max	Диксон 4	0,05	0,32	однороден
max	Диксон 5	0,04	0,30	однороден

max	Смирнов-Граббс	1,94	3,85	однороден
min	Диксон 1	0,20	0,10	не однороден
min	Диксон 2	0,20	0,12	не однороден
min	Диксон 3	0,27	0,15	не однороден
min	Диксон 4	0,27	0,16	не однороден
min	Диксон 5	0,26	0,14	не однороден
min	Смирнов-Граббс	3,56	3,42	не однороден

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений по критериям Фишера и Стьюдента временной ряд температуры января на станции Saint Paul с 1920 г был разбит на две равные подвыборки. Оценки стационарности для станции Saint Paul представлены в Табл. 2.21.

Расчетное значение статистики критерия Фишера и Стьюдента на станции Saint Paul меньше критического, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии.

Таблица 2.21

Результаты оценивания стационарности эмпирического распределения среднемесячных температур января для метеостанции SAINT PAUL

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,191986	1,62	однороден
Стьюдент	0,651757	2,0988	однороден

Анализ графика 2.11 показал, что на станции Cold Bay в январе 1956 г и 2012 г наблюдался минимум, который приблизительно на 2°C меньше экстремальных значений в другие годы за рассматриваемый период. В общем за весь период наблюдалась тенденция к потеплению.

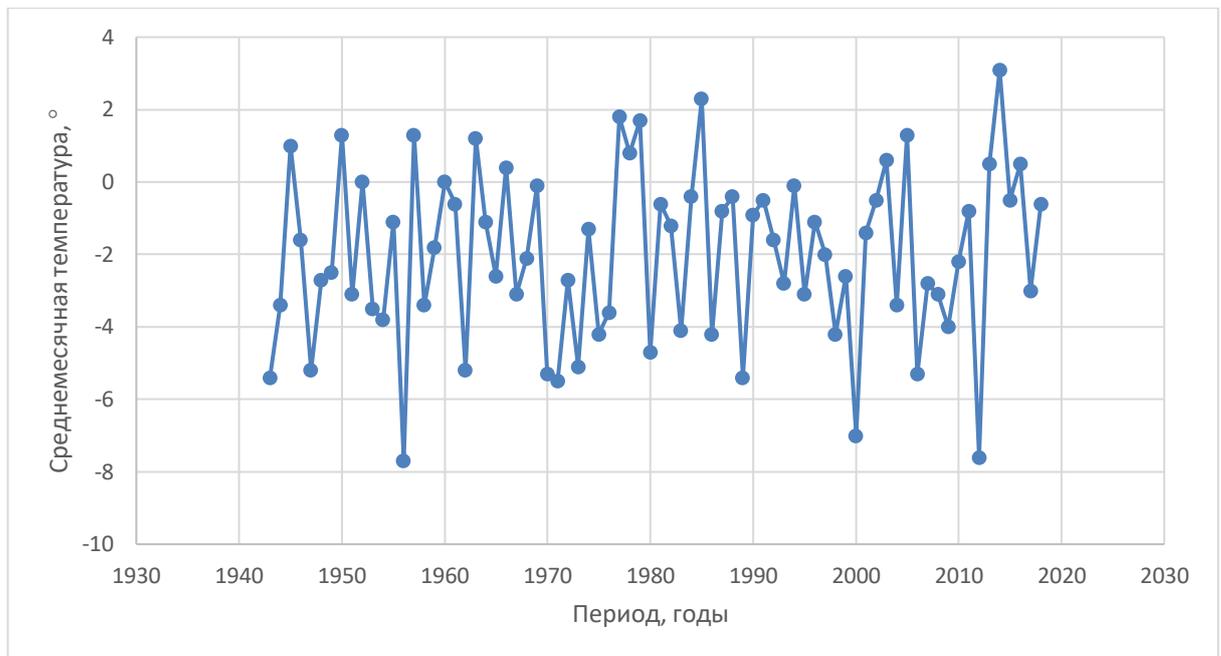


Рисунок 2.12 – Хронологический график среднемесячных температур января для станции Cold Bay

Оценки однородности представлены в Табл. 2.22. За весь рассматриваемый период ряд является однородным.

Далее был разбит на две равные подвыборки. Оценки стационарности для станции Cold Bay представлены в Табл. 2.23. На станции COLD BAY оба расчетных значения меньше критических, что говорит о принятии гипотезы стационарности.

Таблица 2.22

Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячных температур января для метеостанции Cold Bay

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,07	0,22	однороден
max	Диксон 2	0,07	0,24	однороден

max	Диксон 3	0,12	0,29	однороден
max	Диксон 4	0,13	0,30	однороден
max	Диксон 5	0,12	0,28	однороден
max	Смирнов-Граббс	2,14	3,37	однороден
min	Диксон 1	0,01	0,15	однороден
min	Диксон 2	0,01	0,16	однороден
min	Диксон 3	0,07	0,20	однороден
min	Диксон 4	0,07	0,21	однороден
min	Диксон 5	0,06	0,19	однороден
min	Смирнов-Граббс	2,38	2,78	однороден

Таблица 2.23

Оценки стационарности эмпирического распределения среднемесячных температур января для метеостанции Cold Bay

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,096934	1,64	однороден
Стьюдент	0,613372	2,2288	однороден

Визуальный анализ графика 2.13 показал, что на станции Adak в январе 1957 г. наблюдался резко выраженный максимум, который приблизительно на $1,5^{\circ}$ больше экстремальных значений в другие годы за рассматриваемый период. Кроме того, в период 1963-1983гг наблюдалась тенденция к похолоданию, а затем – тенденция к потеплению.

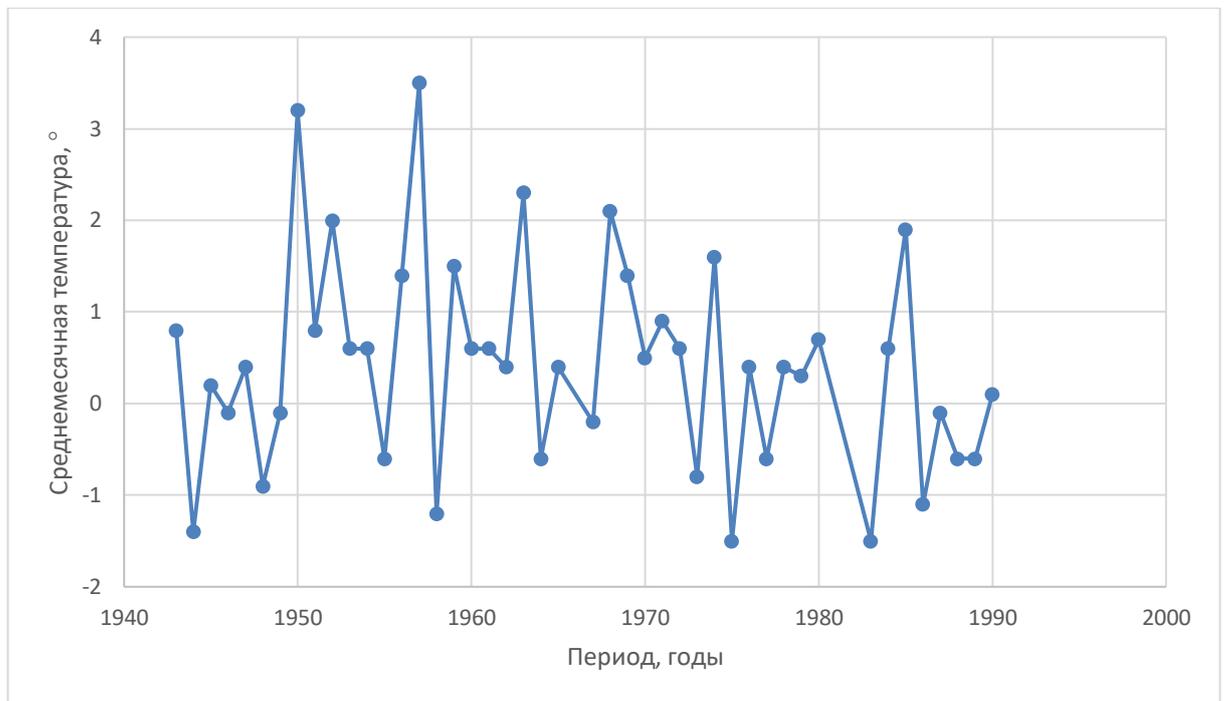


Рисунок 2.13 - Хронологический график среднемесячных температур января для станции Adak

Для оценивания однородности распределения среднемесячных температур января были произведены расчеты статистик по критериям Диксона и Смирнова-Граббса (табл. 2.24). Во всех случаях временной ряд является однородным, включая его выраженный максимум в 1957 году.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений ряд был разбит на две равные выборки. Результаты оценивания стационарности для станции Adak представлены в Табл. 2.25.

В результате оценивания стационарности средних значений на станции Adak по критерию Фишера и Стьюдента гипотеза стационарности принимается.

Таблица 2.24

Результаты оценивания однородности эмпирического распределения
среднемесячных температур января для метеостанции Adak

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,06	0,30	однороден
max	Диксон 2	0,06	0,32	однороден
max	Диксон 3	0,24	0,39	однороден
max	Диксон 4	0,24	0,41	однороден
max	Диксон 5	0,24	0,38	однороден
max	Смирнов-Граббс	2,66	3,45	однороден
min	Диксон 1	0,00	0,14	однороден
min	Диксон 2	0,00	0,18	однороден
min	Диксон 3	0,02	0,21	однороден
min	Диксон 4	0,03	0,23	однороден
min	Диксон 5	0,02	0,16	однороден
min	Смирнов-Граббс	1,66	2,30	однороден

Таблица 2.25

Результаты оценивания стационарности эмпирического распределения
среднемесячных температур января для метеостанции Adak

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,612366	2,001	однороден
Стьюдент	1,151322	2,26352	однороден

2.5 Оценка однородности и стационарности среднемесячных температур воздуха для июля

Визуальный анализ графика 2.14 видно, что в Анадыре в июле наблюдается тенденция к потеплению. Однако в июле 1970 и 2009 гг наблюдался выраженный минимум среднемесячных температур и составляет он $8,1^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 2.14 – Хронологический график среднемесячных температур июля для станции Анадырь

Оценки однородности отражены в Табл. 2.26. Из анализа данных табл. 2.26 следует сделать вывод, что временной ряд среднемесячных температур июля за рассматриваемый период является однородным.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений по критериям Фишера и Стьюдента временной ряд разделили на две равные части. Оценки стационарности для станции представлены в Табл. 2.27. Расчетное значение статистики критерия Фишера и критерия Стьюдента больше критического значения, следовательно гипотеза стационарности отклоняется.

Таблица 2.26

Результаты оценивания однородности эмпирического распределения
среднемесячных температур июля для метеостанции Анадырь

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,08	0,22	однороден
max	Диксон 2	0,08	0,24	однороден
max	Диксон 3	0,11	0,30	однороден
max	Диксон 4	0,11	0,32	однороден
max	Диксон 5	0,11	0,28	однороден
max	Смирнов-Граббс	2,04	3,00	однороден
min	Диксон 1	0,00	0,21	однороден
min	Диксон 2	0,00	0,22	однороден
min	Диксон 3	0,05	0,28	однороден
min	Диксон 4	0,05	0,30	однороден
min	Диксон 5	0,05	0,26	однороден
min	Смирнов-Граббс	2,03	3,00	однороден

Таблица 2.27

Результаты оценивания стационарности эмпирического распределения
среднемесячных температур июля для метеостанции Анадырь

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	2,027482	1,97	неоднороден
Стьюдент	3,25401	2,121484	неоднороден

На графике 2.15 изображена хронология среднемесячных температур июля на станции Никольское.

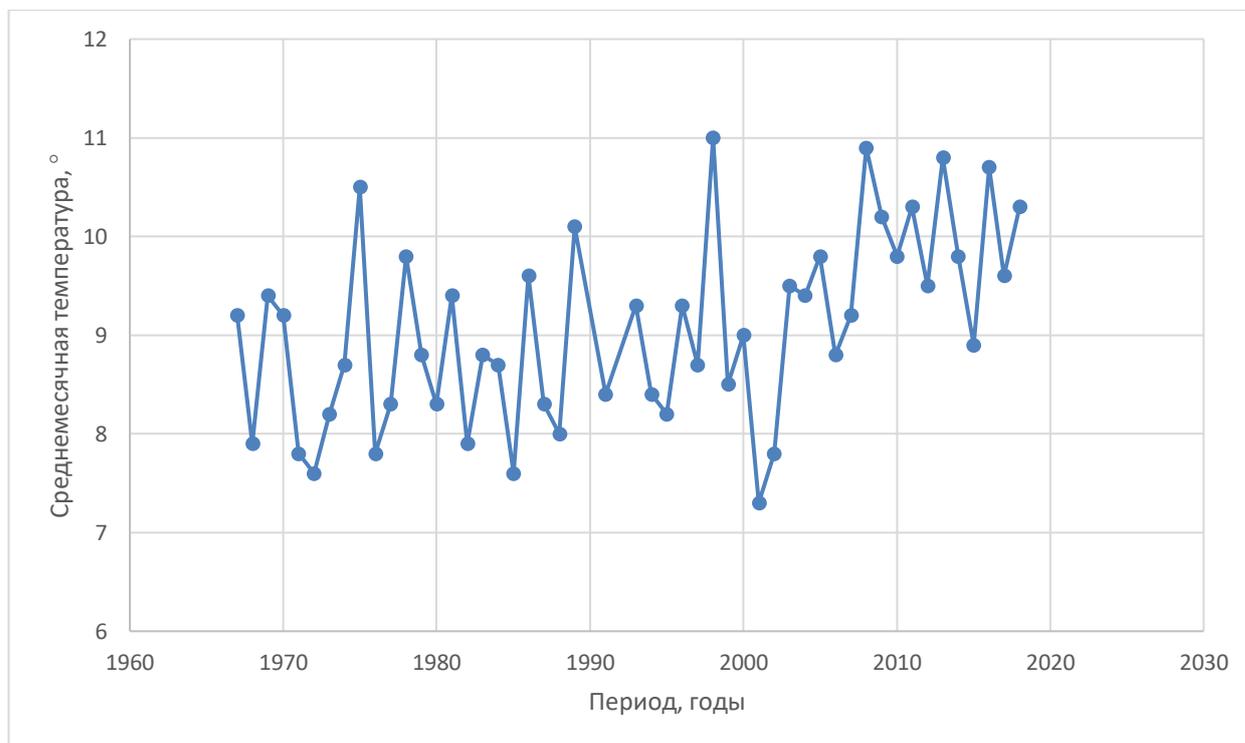


Рисунок 2.15 – Хронологический график среднемесячных температур июля для станции Никольское

График 2.15 показывает общую хронологию потепления на станции Никольское, не смотря на выраженный минимум в 2001 году ($7,1^{\circ}\text{C}$). Максимум температур приходится на 1998 год (11°C).

Произведены расчеты статистик по критериям Диксона и Смирнова-Граббса, они представлены в Табл. 2.28. Из анализа таблицы 2.28 следует, что временной ряд однороден.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений по критериям Фишера и Стьюдента ряд разделили на две равные части. Получены расчетные и критические значения статистик критериев Фишера и Стьюдента.

Результаты оценивания стационарности для станции Никольское представлены в Табл. 2.29. По критерию Фишера на станции Никольское можно сделать вывод о стационарности дисперсии. В результате оценивания по критерию Стьюдента гипотеза стационарности не принимается.

Таблица 2.28

Результаты оценивания однородности эмпирического среднемесячных температур июля для метеостанции Никольское

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,03	0,24	однороден
max	Диксон 2	0,03	0,26	однороден
max	Диксон 3	0,06	0,32	однороден
max	Диксон 4	0,06	0,34	однороден
max	Диксон 5	0,05	0,31	однороден
max	Смирнов-Граббс	2,02	3,18	однороден
min	Диксон 1	0,08	0,18	однороден
min	Диксон 2	0,08	0,20	однороден
min	Диксон 3	0,08	0,25	однороден
min	Диксон 4	0,09	0,26	однороден
min	Диксон 5	0,08	0,21	однороден
min	Смирнов-Граббс	1,84	2,73	однороден

Таблица 2.29

Результаты оценивания стационарности эмпирического распределения среднемесячных температур июля для метеостанции Никольское

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,392442	1,99	однороден
Стьюдент	2,815032	2,27017	не однороден

Анализ графика 2.16 показал, что на станции Nome в период 1912-1959 гг наблюдалось тенденция к похолоданию, а после 1960 г среднемесячная температура июля начала увеличиваться.

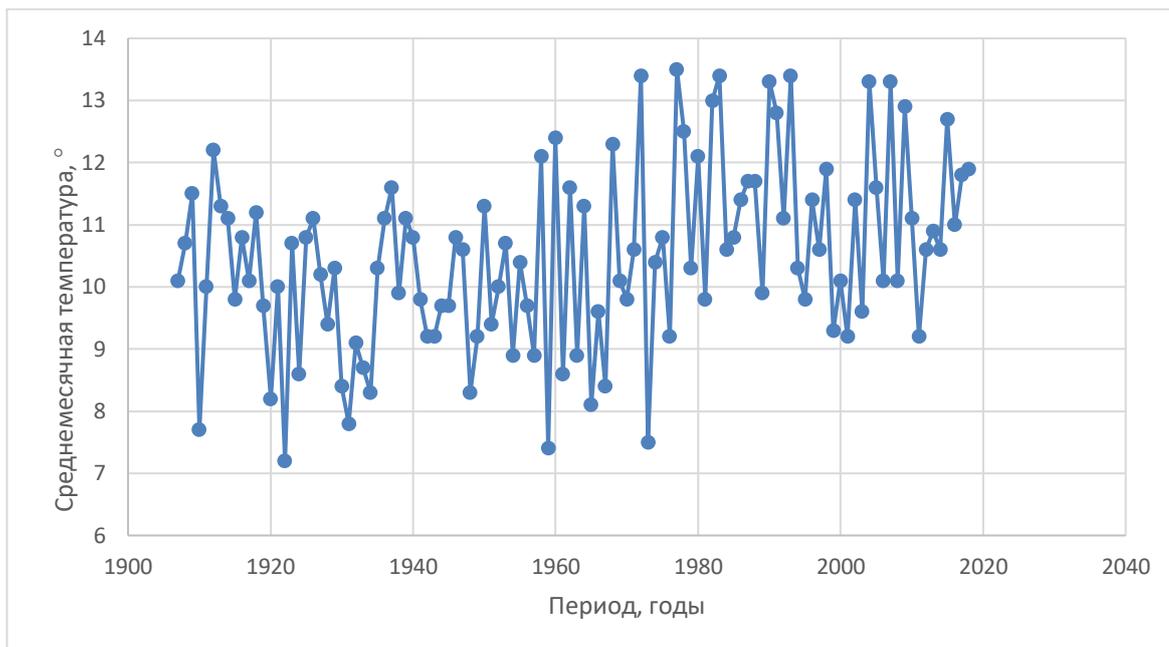


Рисунок 2.16 - Хронологический график среднемесячных температур июля для станции Nome

Результаты оценивания однородности для станции Nome представлены в Табл. 2.30. Из анализа данных табл. 2.30 следует сделать вывод, что временной ряд на станции Nome за рассматриваемый период является однородным.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений по критериям Фишера и Стьюдента временной ряд среднемесячных температур июля на станции Nome был разбит на две не равные подвыборки: с 1907 по 1959 гг. и с 1960 по 2018 гг. Результаты оценивания стационарности для станции Nome представлены в Табл. 2.31.

Расчетное значение статистики критерия Фишера на станции Nome меньше критического, делается вывод о стационарности дисперсии, а по критерию Стьюдента гипотеза стационарности не принимается.

Таблица 2.30

Результаты оценивания однородности эмпирического распределения
среднемесячных температур июля для метеостанции NOME

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,02	0,18	однороден
max	Диксон 2	0,02	0,19	однороден
max	Диксон 3	0,02	0,24	однороден
max	Диксон 4	0,02	0,25	однороден
max	Диксон 5	0,02	0,23	однороден
max	Смирнов-Граббс	2,04	3,21	однороден
min	Диксон 1	0,03	0,16	однороден
min	Диксон 2	0,03	0,17	однороден
min	Диксон 3	0,05	0,22	однороден
min	Диксон 4	0,05	0,23	однороден
min	Диксон 5	0,05	0,20	однороден
min	Смирнов-Граббс	2,25	3,21	однороден

Таблица 2.31

Результаты оценивания стационарности эмпирического распределения
среднемесячных температур июля для метеостанции NOME

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,591	1,67	однороден
Стьюдент	4,198547	2,0196	не однороден

На станции Saint Paul в период с 1894-1916 гг. наблюдения за температурой воздуха отсутствовали (рисунок 2.17), поэтому временной ряд рассматривался после 1916 г. В 2005 году наблюдался резкий скачок тепла. Общая обстановка указывает на потепление в летний в этом регионе.

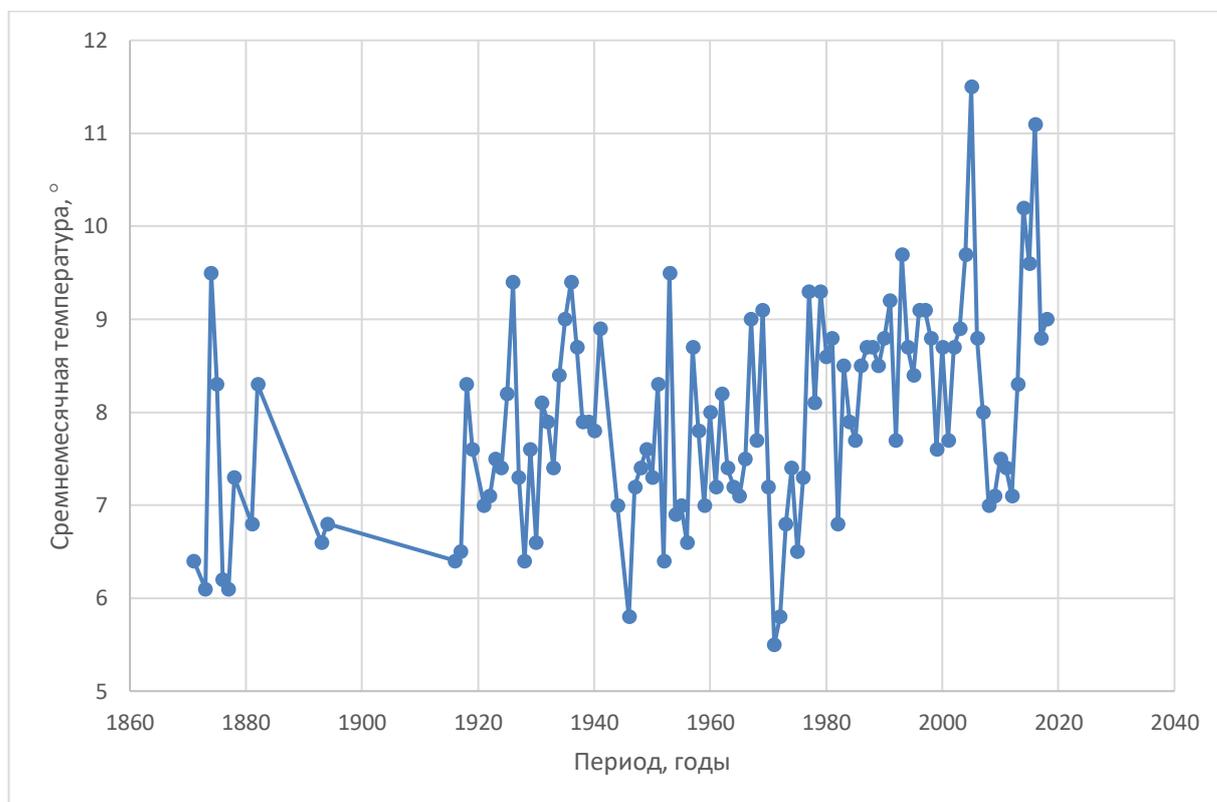


Рисунок 2.17- Хронологический график среднемесячных температур июля для станции Saint Paul

Результаты оценивания однородности для станции Saint Paul представлены в Табл. 2.32, анализ которых позволяет сделать вывод о том что весь временной ряд однороден.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений по критериям Фишера и Стьюдента временной ряд был разбит на две не равные части: с 1916 по 1943 гг. и с 1944 по 2018 гг. Временной ряд разделен в момент предполагаемой смены тенденции от похолодания к потеплению.

Оценки стационарности для станции Saint Paul представлены в Табл. 2.33. В результате оценивания стационарности на станции Saint Paul по критерию Фишера и Стьюдента гипотеза стационарности принимается.

Таблица 2.32

Результаты оценивания однородности эмпирического распределения среднемесячных температур июля для метеостанции Saint Paul

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,07	0,22	однороден
max	Диксон 2	0,07	0,24	однороден
max	Диксон 3	0,23	0,28	однороден
max	Диксон 4	0,23	0,29	однороден
max	Диксон 5	0,22	0,28	однороден
max	Смирнов-Граббс	3,23	3,62	однороден
min	Диксон 1	0,05	0,11	однороден
min	Диксон 2	0,05	0,12	однороден
min	Диксон 3	0,05	0,16	однороден
min	Диксон 4	0,06	0,17	однороден
min	Диксон 5	0,05	0,15	однороден
min	Смирнов-Граббс	2,17	2,60	однороден

Таблица 2.33

Результаты оценивания стационарности эмпирического распределения среднемесячных температур июля для метеостанции Saint Paul

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,70374	1,94	однороден
Стьюдент	1,106367	3,15615	однороден

Анализ графика 2.18 показывает, что на станции Cold Bay происходит постепенное потепление. Минимум среднемесячной температуры приходится на 1982 год ($8,2^{\circ}$), а максимум – на 2014 год ($13,2^{\circ}$).

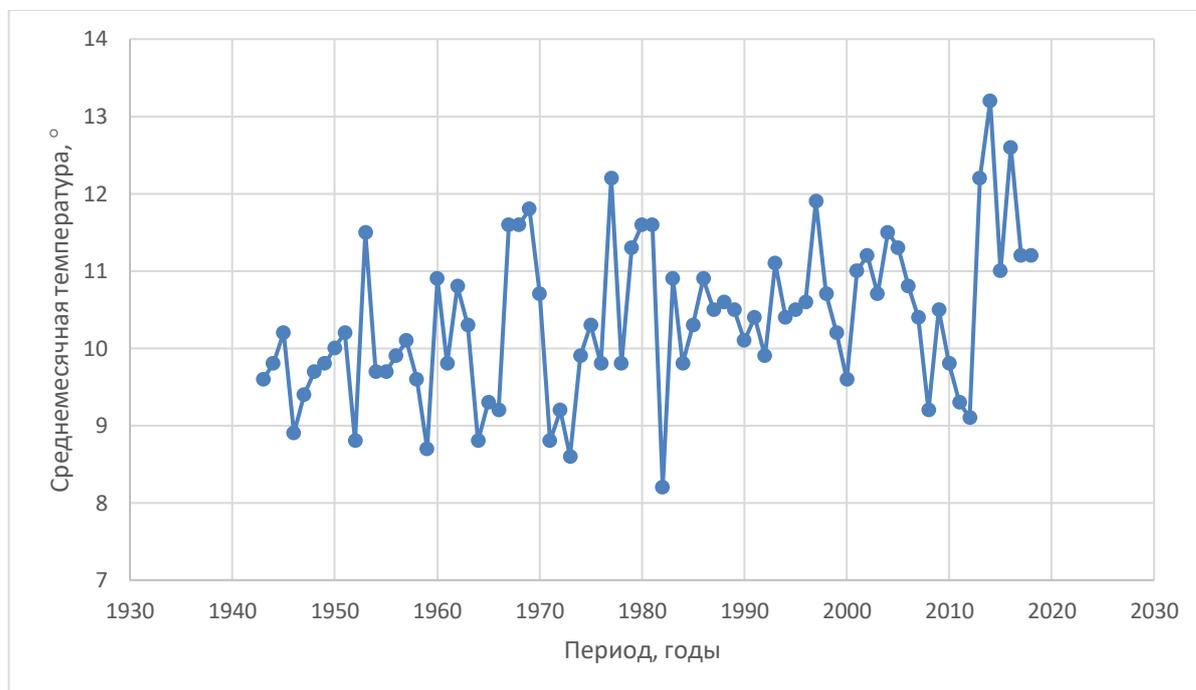


Рисунок 2.18 – Хронологический график среднемесячных температур июля для станции Cold Bay

Оценки однородности для станции Cold Bay представлены в Табл. 2.34, из анализа которых следует сделать вывод, что временной является однородным.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений по критериям Фишера и Стьюдента временной ряд был разбит на две приблизительно равные выборки: с 1943 по 1982 гг. и с 1983 по 2018 гг. Временной ряд разделен в момент предполагаемой смены тенденции от стационарного хода к потеплению.

Оценки стационарности для станции представлены в Табл. 2.35. Расчетное значение статистики критерия Фишера на станции Cold Bay меньше

критического, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии. В результате оценивания стационарности средних значений на станции Cold Bay по критерию Стьюдента гипотеза стационарности отклоняется.

Таблица 2.34

Результаты оценивания однородности эмпирического распределения среднемесячных температур июля для метеостанции Cold Bay

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,12	0,23	однороден
max	Диксон 2	0,13	0,25	однороден
max	Диксон 3	0,22	0,31	однороден
max	Диксон 4	0,22	0,30	однороден
max	Диксон 5	0,20	0,29	однороден
max	Смирнов-Граббс	2,85	3,44	однороден
min	Диксон 1	0,08	0,14	однороден
min	Диксон 2	0,09	0,15	однороден
min	Диксон 3	0,11	0,19	однороден
min	Диксон 4	0,13	0,20	однороден
min	Диксон 5	0,10	0,18	однороден
min	Смирнов-Граббс	2,15	2,68	однороден

Таблица 2.35

Результаты оценивания стационарности эмпирического распределения среднемесячных температур июля для метеостанции Cold Bay

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,312262	1,89	однороден
Стьюдент	2,95686	2,5671	неоднороден

Визуальный анализ графика 2.19 показал, что на станции Adak тенденция потепления климата. При этом в период 1967-1971 гг. произошел резкий скачок температур от максимума (12,3°C) к минимуму (7,0°C).



Рисунок 2.19 – Хронологический график среднемесячных температур июля для станции Adak

Результаты оценивания однородности для станции Adak представлены в таблице. 2.36, в результате анализа которых можно сделать вывод, что временной ряд среднемесячных температур за июль неоднороден в шести случаях, при оценке критериев \min Диксон 1-5 и Смирнова-Граббс. В остальных случаях ряд однороден.

Для оценки стационарности дисперсий и средних значений по критериям Фишера и Стьюдента временной ряд годовых сумм осадков на станции Adak был разбит на две не равные подвыборки: с 1943 по 1967 гг. и с 1968 по 1990 гг.

Результаты оценивания стационарности для станции Adak представлены в Табл. 2.37. В результате оценивания стационарности средних значений на станции Adak по критерию Фишера и Стьюдента гипотеза стационарности принимается.

Таблица 2.36

Результаты оценивания однородности эмпирического среднемесячных температур июля для метеостанции АДАК

Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
max	Диксон 1	0,13	0,26	однороден
max	Диксон 2	0,17	0,28	однороден
max	Диксон 3	0,31	0,35	однороден
max	Диксон 4	0,33	0,36	однороден
max	Диксон 5	0,25	0,32	однороден
max	Смирнов-Граббс	2,89	3,20	однороден
min	Диксон 1	0,21	0,18	не однороден
min	Диксон 2	0,24	0,21	не однороден
min	Диксон 3	0,30	0,25	не однороден
min	Диксон 4	0,35	0,23	не однороден
min	Диксон 5	0,26	0,21	не однороден
min	Смирнов-Граббс	2,70	2,67	не однороден

Таблица 2.37

Результаты оценивания стационарности эмпирического распределения среднемесячных температур июля для метеостанции Adak

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,027125	1,75	однороден
Стьюдент	0,083424	2,014	однороден

3. Оценивание современных климатических изменений температуры воздуха и осадков

3.1 Статистические методы оценивания современных климатических изменений

Следующим этапом исследований является моделирование климатических изменений. Под моделью понимается система взглядов о строении и эволюции атмосферы, выраженная с использованием некоторого формального языка.

Климатическая система Земли постоянно меняется и формирует целый спектр колебаний климатических характеристик на любом временном интервале. Изменчивость климатической системы оценивается на основе анализа большого числа показателей, к которым относятся, в первую очередь, температура воздуха и количество осадков.

Изменение климатической системы может быть представлено с помощью двух основных видов моделей: стационарного и нестационарного. В настоящей работе для оценивания климатических изменений использовались три модели:

- стационарная модель;
- модель линейного тренда;
- модель ступенчатых изменений.

В основе стационарной модели лежит предположение, что основные параметры временного ряда (среднее значение и среднее квадратическое отклонение) являются неизменными (стационарными) во времени, что может быть математически описано с помощью условий:

$$Y_{cp}(t) = const, \quad (3.1)$$

$$\sigma(t) = const. \quad (3.2)$$

Данная модель может корректно применяться для некоторых районов Земного шара или для некоторых промежутков времени.

Методика проверки стационарности временного ряда описана в п. 2.2, и сводится к сравнению расчетных и критических значений статистик Фишера и Стьюдента.

Кроме случайных флуктуаций имеют место нестационарные составляющие, обусловленные влиянием факторов климатической системы с большими периодами. Если предположить, что нестационарные составляющие являются реакцией климатической системы на внешние воздействия, то проявления этих воздействий могут быть двух основных видов: монотонные (тренд или циклические колебания) и ступенчатые изменения.

Механизм монотонных изменений имеет место в равновесной системе, которая практически сразу же откликается на направленные внешние воздействия. В настоящее время наибольшее распространение получила модель линейного тренда, которая может быть описана с помощью регрессионного уравнения вида:

$$Y(t) = b_1 t + b_0, \quad (3.3)$$

где b_1, b_0 – коэффициенты уравнения регрессии.

Коэффициенты b_1 и b_0 определяются с помощью метода наименьших квадратов по формулам:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})(t_i - t_{cp})}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2}, \quad (3.4)$$

$$b_0 = Y_{cp} - b_1 t_{cp}, \quad (3.5)$$

где Y_{cp}, t_{cp} – средние значения для рядов климатической характеристики и времени.

Статистическая значимость модели линейного тренда оценивается по статистической значимости коэффициента b_1 или коэффициента корреляции R зависимости (3.5), который может быть рассчитан по формуле:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})(t_i - t_{cp})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})^2 \sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2}}. \quad (3.6)$$

Статистическая значимость модели линейного тренда определяется из условия:

$$R \geq R^*, \quad (3.7)$$

где R^* – критическое значение коэффициента корреляции.

Критическое значение R^* – табличное значение, которое изменяется в зависимости от числа степеней свободы ν ($\nu = n - 2$) и уровня значимости α .

Механизм ступенчатых изменений характеризует неравновесную систему, которая некоторое время может сопротивляться внешним воздействиям. Модель ступенчатых изменений аналогична двум (или более) стационарным моделям, что характеризуется неизменностью во времени среднего значения и СКО для каждой части ряда:

$$Y_{cp,j}(t_j) = const1_j, \quad j = 1, (1), m, \quad (3.8)$$

$$\sigma_j(t_j) = const2_j, \quad j = 1, (1), m, \quad (3.9)$$

где $Y_{cp,j}(t_j)$, $\sigma_j(t_j)$ – среднее значение и СКО i -ой части ряда, t_j – периоды временного ряда, которые предполагают стационарными, m – число ступенчатых изменений во временном ряду.

Периоды перехода из одного стационарного состояния в другое определяется либо визуально, либо на основании дополнительной информации о моменте нарушения стационарности.

Следующим шагом является оценивание эффективности моделей. Наиболее распространенной мерой оценки эффективности любой модели является ее остаточная дисперсия σ_ε :

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{cp})^2}{(n-1)}}, \quad (3.10)$$

где ε_i – остатки, рассчитываемые как разность между фактическими Y_i и

полученными по модели значениями Y_i^* ($\varepsilon_i = Y_i - Y_i^*$); ε_{cp} – среднее значение остатков (при несмещенности значения равно нулю).

Оценивание эффективности моделей осуществляется относительно стационарной модели. Стандартизированный остаток σ_ε стационарной модели равен стандартному отклонению временного ряда σ_Y :

$$\varepsilon_i = \sigma_Y. \quad (3.11)$$

Условие (3.10) выполняется в случае, если закономерности во временном ряду полностью отсутствуют.

Для модели линейного тренда стандартизированный остаток рассчитывается по формуле:

$$\sigma_\varepsilon = \sigma_Y \sqrt{1 - R^2}, \quad (3.12)$$

где R – коэффициент корреляции модели линейного тренда, рассчитываемый по формуле (3.6).

Для модели ступенчатых изменений стандартизированный остаток определяется с помощью формулы:

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \sigma_j^2 m_j}{(n-1)}}, \quad (3.13)$$

где σ_j , m – СКО и объем i -ой части ряда.

Для количественного оценивания качества моделей рассчитываются их относительные погрешности Δ относительно стационарной модели по формуле:

$$\Delta = \left(\frac{\sigma_Y - \sigma_\varepsilon}{\sigma_Y} \right) 100\% \quad (3.14)$$

Можно считать, что рассматриваемая модель будет эффективнее стационарной модели при выполнении условия:

$$\Delta \geq 10 \%. \quad (3.15)$$

Условие (3.14) можно назвать достаточным условием, так как оно гарантирует, что отличие между моделями превышает погрешность процесса или погрешность рассматриваемой характеристики.

Для оценивания статистической значимости рассматриваемых моделей используется статистический критерий Фишера для оценивания однородности дисперсий (если дисперсии неоднородны, то данная модель статистически значимо отличается от стационарной модели) Статистика критерия Фишера рассчитывается по формуле:

$$F = \sigma_Y^2 / \sigma_\varepsilon^2 . \quad (3.16)$$

В случае если расчетное значение статистики Фишера больше критического, то дисперсии двух моделей имеют статистически значимое различие, и рассматриваемая модель статистически эффективнее стационарной модели.

3.2 Оценивание климатических изменений количества осадков

Многолетние ряды годовых сумм осадков использовались для построения моделей климатических изменений количества осадков. В таблице 3.1 приведены основные параметры стационарной модели для рассматриваемых станций Берингова моря.

Таблица 3.1

Основные параметры стационарных модели для выбранных станций

Название метеостанции	Среднее $Y_{cp}(t)$, мм	СКО $\sigma(t)$, мм
Анадырь	340,0	97,23
Никольское	653,9	116,59
Nome	423,3	108,06
Saint Paul	596,8	120,18
Cold Bay	80,3	19,75
Adak	1435,4	421,66

Проверка стационарности временного ряда осуществляется путем проверки выполнения условий (3.1)-(3.2) и была осуществлена ранее в п. 2.3-2.4 по критериям Стьюдента и Фишера.

В таблице 3.2 приведены основные параметры линейной модели для рассматриваемых станций Берингова моря.

Таблица 3.2

Основные параметры линейной модели для выбранных станций

Название метеостанции	b_0	b_1	R	R^*	Вывод
Анадырь	-3153,6	1,7534	0,273	0,273	Значима
Никольское	35,56	0,31	0,04	0,273	Незначима
Nome	1148,5	-0,37	-0,11	0,273	Незначима
Saint Paul	877,35	-0,14	-0,02	0,273	Незначима
Cold Bay	-597,20	0,35	0,38	0,273	Значима
Adak	26118,44	-12,55	-0,41	0,273	Значима

Для проверки статистической значимости модели линейного тренда выполняется проверка условия (3.7). В таблице 3.2 приведены критические коэффициенты корреляции для уровня значимости $\alpha = 5 \%$. Для станций Анадырь, Cold Bay и Adak условие (3.7) выполняется, таким образом, линейная модель для данных станций является статистически значимой (рисунок 3.1). Соответственно для всех остальных станций линейная модель не является статистически значимой.

В таблице 3.3 приведены основные параметры модели ступенчатых изменений для рассматриваемых станций Берингова моря.

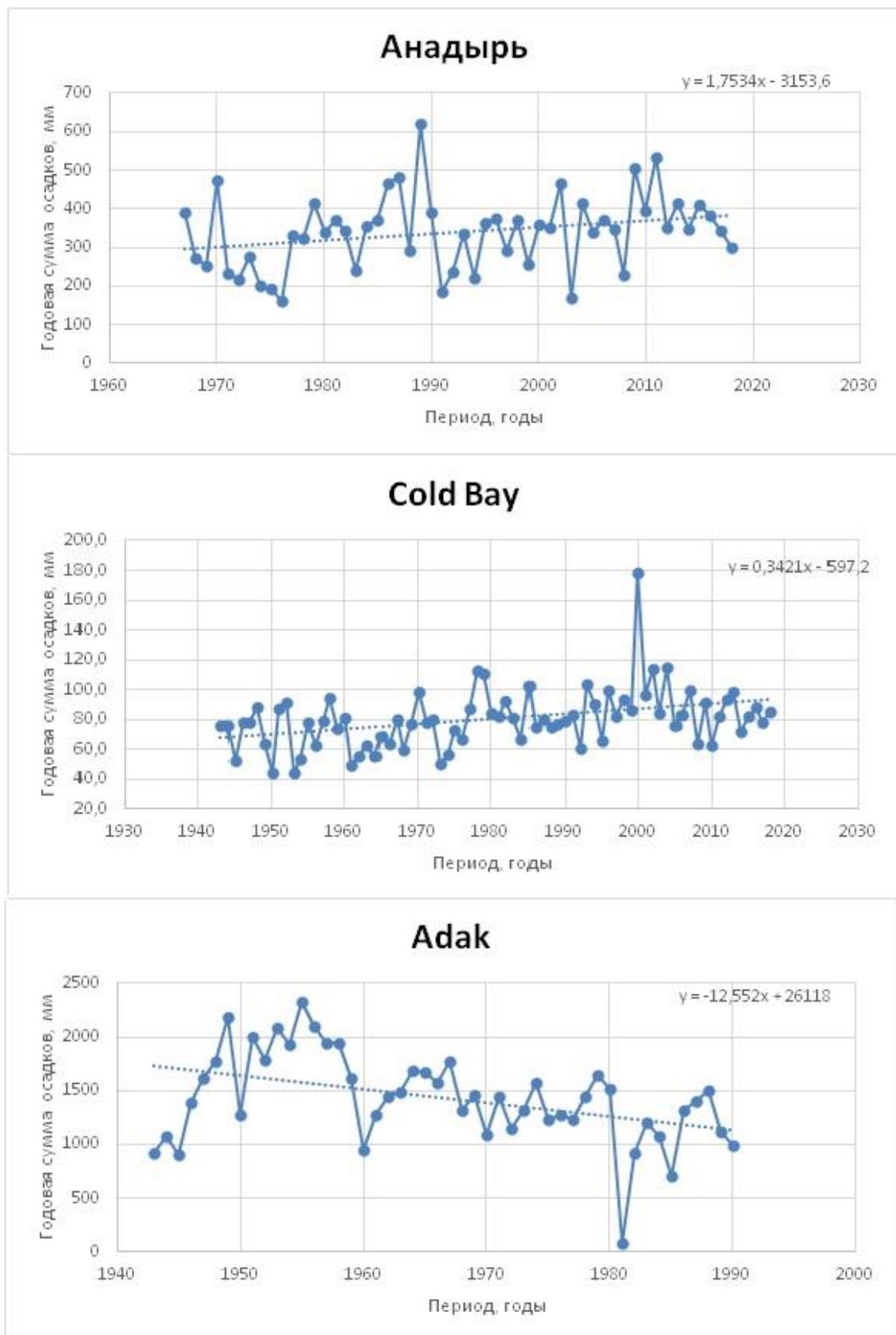


Рисунок 3.1 – Линейная модель годовых сумм осадков для станций Анадырь, Cold Bay, Adak

Таблица 3.3

Основные параметры ступенчатой модели для выбранных станций

Название метеостанции	Ступень	n	$Y_{cp,j}$, мм	σ_j	σ_{cm}
Анадырь	1	10	267,09	96,51	92,21
	2	42	357,40	90,04	
Никольское	1	30	673,77	109,25	116,52
	2	22	626,82	123,27	
Nome	1	16	439,95	131,92	109,02
	2	96	420,52	104,12	
Saint Paul	1	19	626,51	115,5	120,48
	2	54	586,28	121,1	
Cold Bay	1	28	70,6	15,10	18,52
	2	48	86,0	20,07	
Adak	1	25	1632,52	401,42	374,81
	2	23	1221,20	334,55	

В таблице 3.3 приведены стандарты остатков нестационарных моделей, их отличие от стационарной модели в процентах и расчетные значения статистик критерия Фишера.

Таблица 3.4

Оценки эффективности и статистической значимости моделей

Название метеостанции	σ_ε	σ_{cm}	Δ_{mp} , %	Δ_{cm} , %	F_{mp}	F_{cm}
Анадырь	93,53	92,21	3,8	5,1	1,08	1,11
Никольское	116,50	116,52	0,8	0,06	1,00	1,00
Nome	107,40	109,02	0,62	-0,88	1,01	0,98
Saint Paul	120,14	120,48	0,03	-0,25	1,00	0,99

Cold Bay	18,24	18,52	7,6	6,2	1,17	1,14
Adak	383,30	374,81	9,1	11,11	1,21	2,27

Из анализа данных таблицы 3.4 следует, что нестационарные модели не являются статистически значимыми, т.к. критическое значение статистики Фишера F^* всегда больше расчетного значения. Отсюда можно сделать вывод, что стационарная модель является эффективной и статистически значимой для описания изменения годовых сумм осадков станций Берингова моря.

3.3 Оценивание климатических изменений среднемесячных температур января

Многолетние ряды среднемесячной температуры воздуха января использовались для построения моделей климатических изменений температур воздуха. В таблице 3.5 приведены параметры стационарной модели для рассматриваемой территории.

Таблица 3.5

Основные параметры стационарных моделей станций Берингова моря

Название метеостанции	Среднее $Y_{cp}(t)$, мм	СКО $\sigma(t)$, мм
Анадырь	-20,97	4,53
Никольское	-3,26	1,39
Nome	-14,85	4,86
Saint Paul	-3,42	2,47
Cold Bay	-2,01	2,39
Adak	0,42	1,16

Проверка стационарности временного ряда осуществляется путем проверки выполнения условий (3.1)-(3.2) и была осуществлена ранее в п.2.3-2.4 по критериям Стьюдента и Фишера.

В таблице 3.6 приведены основные параметры линейной модели для рассматриваемых станций Берингова моря.

Таблица 3.6

Основные параметры линейной модели для выбранных станций

Название метеостанции	b_0	b_1	R	R^*	Вывод
Анадырь	116,12	-0,069	-0,23	0,273	Незначима
Никольское	-18,88	0,01	0,08	0,273	Незначима
Nome	-57,20	0,02	0,14	0,273	Незначима
Saint Paul	9,53	-0,006	-0,06	0,273	Незначима
Cold Bay	-19,84	0,009	0,08	0,273	Незначима
Adak	31,06	-0,016	-0,18	0,273	Незначима

Для проверки статистической значимости модели линейного тренда выполняется проверка условия (3.7). В таблице 3.6 приведены критические коэффициенты корреляции для уровня значимости $\alpha = 5 \%$. Для всех станций выбранной территории данное условие выполняется таким образом, что линейная модель не является статистически значимой (рисунок 3.2).

Основные параметры модели ступенчатых изменений представлены в табл. 3.7.

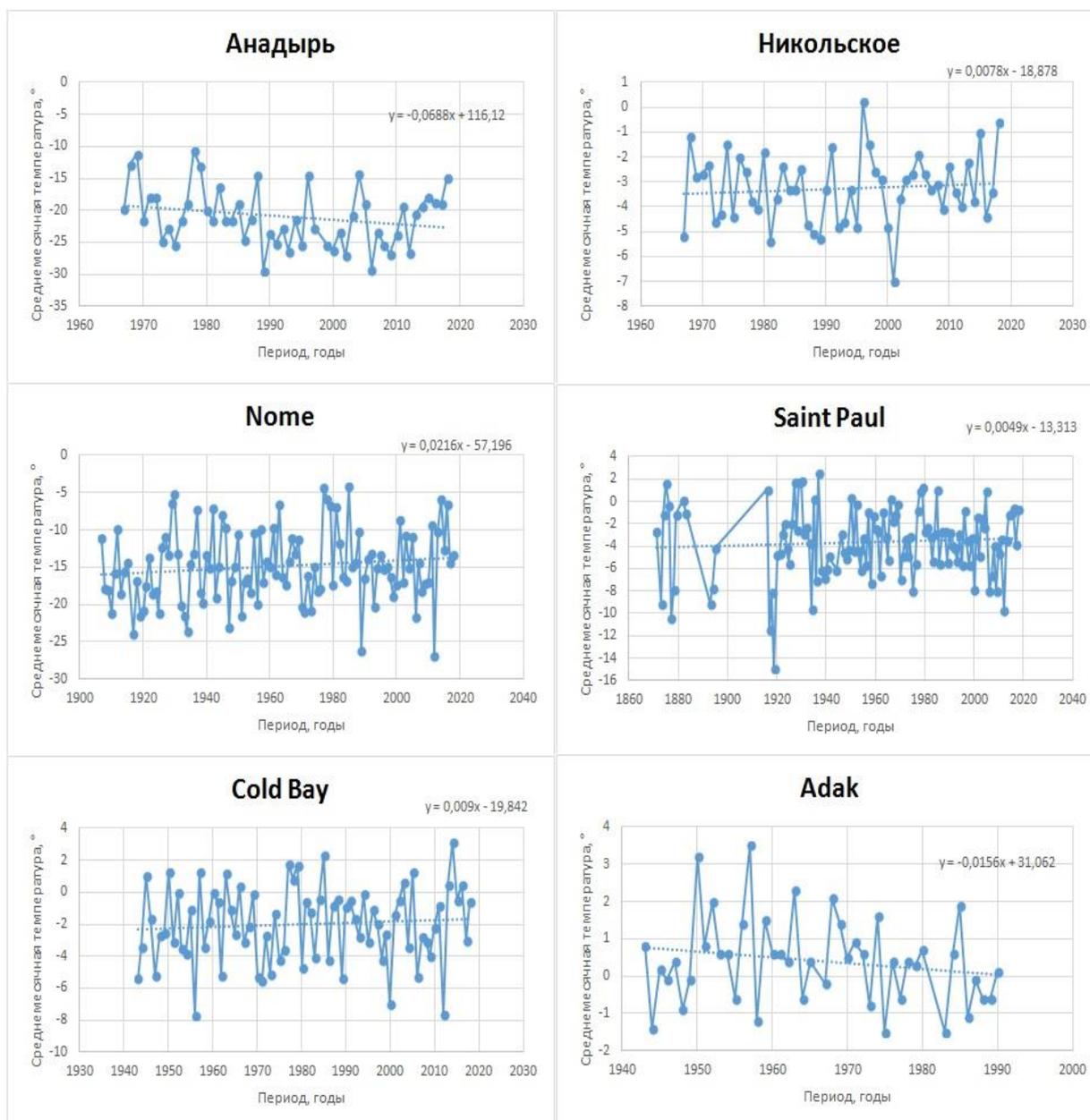


Рисунок 3.2 – Линейная модель среднемесячных температур в январе для всех станций

В таблице 3.7 приведены стандарты остатков нестационарных моделей, их отличие от стационарной модели в процентах и расчетные значения статистик критерия Фишера.

Анализ данных табл. 3.8 показывает, что нестационарные модели не являются статистически значимыми, т.к. критическое значение статистики Фишера F^* всегда больше расчетного значения.

Таблица 3.7

Основные параметры ступенчатой модели для выбранных станций

Название метеостанции	Ступень	n	$Y_{cp,j}$, мм	σ_j	σ_{cm}
Анадырь	1	39	-20,87	4,79	4,61
	2	12	-21,28	3,75	
Никольское	1	30	-3,37	1,42	1,41
	2	22	-3,11	1,37	
Nome	1	18	-17,45	3,65	4,75
	2	93	-14,35	4,91	
Saint Paul	1	17	-3,62	2,26	2,50
	2	56	-3,37	2,55	
Cold Bay	1	27	-2,03	2,32	2,42
	2	49	-2,00	2,45	
Adak	1	13	0,42	1,20	1,18
	2	32	0,42	1,16	

Таблица 3.8

Оценки эффективности и статистической значимости моделей

Название метеостанции	σ_ε	σ_{cm}	Δ_{mp} , %	Δ_{cm} , %	F_{mp}	F_{cm}
Анадырь	4,41	4,61	2,73	-1,71	1,06	0,97
Никольское	1,39	1,41	0,37	-1,51	1,01	0,97
Nome	4,81	4,75	1,04	2,09	1,02	1,04
Saint Paul	2,47	2,5	0,16	-1,22	1,00	0,98
Cold Bay	2,38	2,42	0,35	-1,32	1,01	0,97
Adak	1,14	1,18	1,82	-2,33	1,04	0,95

Таким образом, стационарная модель является эффективной и статистически значимой для описания изменения температуры в январе для станций Берингова моря.

3.4 Оценивание климатических изменений среднемесячных температур июля

Многолетние ряды среднемесячной температуры воздуха июля использовались для построения моделей климатических изменений температур воздуха. В таблице 3.9 приведены параметры стационарной модели для рассматриваемой территории.

Таблица 3.9

Основные параметры стационарных моделей станций Берингова моря

Название метеостанции	Среднее $Y_{cp}(t)$, мм	СКО $\sigma(t)$, мм
Анадырь	11,35	1,60
Никольское	9,07	0,96
Nome	10,48	1,46
Saint Paul	8,08	1,14
Cold Bay	10,35	1,00
Adak	9,56	0,95

Проверка стационарности временного ряда осуществляется путем проверки выполнения условий (3.1)-(3.2) и была осуществлена ранее в п. 2.3-2.4 по критериям Стьюдента и Фишера.

В таблице 3.10 приведены основные параметры линейной модели для рассматриваемых станций Берингова моря.

Для проверки статистической значимости модели линейного тренда выполняется проверка условия (3.7). В таблице 3.10 приведены критические коэффициенты корреляции для уровня значимости $\alpha = 5\%$. Данное условие выполняется таким образом, что линейная модель является статистически значимой для пяти станций из шести. Статистически незначимой является ряд станции Adak (рисунок 3.3).

Таблица 3.10

Основные параметры линейной модели для выбранных станций

Название метеостанции	b_0	b_1	R	R^*	Вывод
Анадырь	-70,87	0,04	0,40	0,273	Значима
Никольское	-49,94	0,03	0,48	0,273	Значима
Nome	-20,96	0,02	0,36	0,273	Значима
Saint Paul	-43,49	0,03	0,48	0,273	Значима
Cold Bay	-26,14	0,02	0,41	0,273	Значима
Adak	-23,88	0,02	0,25	0,273	Незначима



Рисунок 3.3 – Линейная модель среднемесячных температур воздуха в июле для станций Adak

Основные параметры модели ступенчатых изменений представлены в табл. 3.11. В таблице 3.12 приведены стандарты остатков нестационарных моделей, их отличие от стационарной модели в процентах и расчетные значения статистик критерия Фишера.

Таблица 3.11

Основные параметры ступенчатой модели для выбранных станций

Название метеостанции	Ступень	n	$Y_{cp,j}$, мм	σ_j	σ_{cm}
Анадырь	1	25	10,78	1,32	1,51
	2	23	11,96	1,67	
Никольское	1	33	8,73	0,86	0,85
	2	17	9,72	0,80	
Nome	1	25	9,96	1,31	1,45
	2	87	10,63	1,48	
Saint Paul	1	36	7,57	1,02	1,04
	2	37	8,58	1,05	
Cold Bay	1	40	10,04	1,01	0,96
	2	36	10,70	0,88	
Adak	1	25	9,52	0,97	0,97
	2	22	9,61	0,94	

Таблица 3.12

Оценки эффективности и статистической значимости моделей

Название метеостанции	σ_ε	σ_{cm}	Δ_{mp} , %	Δ_{cm} , %	F_{mp}	F_{cm}
Анадырь	1,46	1,51	8,52	5,21	1,19	1,11
Никольское	0,84	0,85	12,13	11,50	1,30	1,28
Nome	1,37	1,45	6,54	1,07	1,14	1,02
Saint Paul	1,00	1,04	12,73	9,22	1,30	1,21

Cold Bay	0,91	0,96	8,64	4,31	1,20	1,09
Adak	0,92	0,97	3,20	-2,06	1,07	0,96

Анализ данных таблицы 3.12 показывает, что модель линейного тренда для большинства станций (за исключением, ст. Adak) является статистически значимой и эффективной для описания изменения температуры в июле для станций Берингова моря.

Заключение

В работе рассмотрено влияние физико-географических и синоптико-климатических условий Берингова моря. Берингово море почти полностью находится в субарктической климатической зоне, характеризуется отрицательной годовой суммой баланса тепла на его поверхности, за исключением южных районов. С трех сторон море окружено материками, а на юге соседствует с теплыми водами Тихого океана.

Акватория Баренцева моря находится под влиянием трех основных центров действия атмосферы, которые формируют генеральную систему ветров – муссонную циркуляцию, за исключением юго-восточной части Берингова моря, где преобладают южные ветры. Над морем взаимодействуют преимущественно массы континентального арктического и морского полярного воздуха, на границе которых образуется арктический фронт.

Для анализа были выбраны 5 наблюдательных станций приблизительно равномерно размещенных по границам моря (Анадырь, Никольское, Nome, Cold Bay, Adak), а также 1 станция внутри акватории на юго-востоке (Saint Paul).

Было произведено оценивание однородности эмпирических распределений количества осадков и температур воздуха для метеостанций за январь и июль по критериям Диксона и Смирнова-Граббса и оценивание стационарности по критериям Стьюдента и Фишера. Экстремальные значения, нарушающие однородность временных рядов, были исключены из расчетов основных климатических характеристик. А нестационарные временные ряды были подвергнуты анализу на предмет выявления причин нестационарности.

Для описания изменения годовых сумм осадков и температуры на станциях Берингова моря были использованы стационарная модель и две нестационарные модели (линейного тренда и ступенчатых изменений).

В результате моделирования изменения годового количества осадков получен вывод, что для описания станций Берингова моря наилучшей является

стационарная модель. Однако следует заметить, что если для станций Никольское и Saint Paul данный вывод не вызывает возражений, то на станции Cold Bay на юго-востоке акватории визуально наблюдается слабый монотонный рост количества осадков, а на станции Adak на юге – наоборот, уменьшение. На станциях Анадырь и Nome, которые располагаются на севере акватории на побережьях Азии и Северной Америки после 1920 г наблюдается тенденция к снижению количества осадков, после 1976 г она сменяется ростом, а в последние годы опять наблюдается тенденция к снижению.

В результате моделирования изменения температуры воздуха в январе получен вывод, что для описания станций Берингова моря также наилучшей является стационарная модель. Однако следует заметить, что на большинстве станций в первой трети прошлого века тенденция роста температуры сменяется тенденцией к понижению, которая продолжается до 80-х гг, сменяется некоторой стабилизацией, а в последние два десятилетия опять наблюдается рост температуры.

В результате моделирования изменения температуры воздуха в июле получен вывод, что для описания станций Берингова моря наилучшей является линейная модель. Однако следует заметить, что на всех станциях тенденция к понижению температуры, которая наблюдается с начала прошлого века сменяется в 70-е гг тенденцией к росту, которая продолжается по настоящее время.