



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 моря Лабрадор»

Исполнитель **Тоболова Наталья Викторовна**
Руководитель
Лебедев Андрей Борисович

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


Подпись

Кандидат физико-математических наук, доцент
Сероухова Ольга Станиславовна

« 26 » 06 2023г.

Санкт-Петербург
2023

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение..... | 2 |
| 1. Физико-географические и климатические особенности моря Лабрадор..... | 3 |
| 1.1 Географическое положение моря Лабрадор | 3 |
| 1.2 Рельеф и геологическое строение Берингова моря..... | 4 |
| 1.3 Гидрологический режим моря Лабрадор | 7 |
| 1.4 Синоптические особенности акватории моря Лабрадор..... | 8 |
| 1.5 Климатические особенности акватории моря Лабрадор..... | 10 |
| 2. Анализ многолетних рядов температуры воздуха и осадков..... | 13 |
| 2.1 Выбор пунктов наблюдений..... | 13 |
| 2.2 Оценивание качества исходных данных | 14 |
| 2.3 Оценивание однородности и стационарности количества осадков | 21 |
| 2.4 Оценка однородности и стационарности среднемесячных температур воздуха для января | 26 |
| 2.5 Оценка однородности и стационарности среднемесячных температур воздуха для июля..... | 33 |
| 3. Оценивание современных климатических изменений температуры воздуха и осадков | 39 |
| 3.1 Статистические методы оценивания современных климатических изменений..... | 39 |
| 3.2 Оценивание климатических изменений количества осадков | 43 |
| 3.3 Оценивание климатических изменений среднемесячных температур января | 46 |
| 3.4 Оценивание климатических изменений среднемесячных температур июля | 49 |
| Заключение | 53 |
| Список использованных источников | 55 |

Введение

Изменения климата в Арктике происходят наиболее интенсивно. Предметом рассмотрения выбрана акватория моря Лабрадор, которое хоть и не находится в Арктическом регионе, но расположено в непосредственной близости. Рассматриваемыми климатическими характеристиками являются годовая сумма осадков и среднемесячные температуры воздуха за летний (июль) и зимний (январь) месяцы.

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

Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ физико-географических и синоптико-климатических акватории моря Лабрадор.
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 моря Лабрадор.

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

1. Физико-географические и климатические особенности моря Лабрадор

1.1 Географическое положение моря Лабрадор

Море Лабрадор (или Лабрадорское море) расположено на севере-востоке Атлантического океана (рисунок 1.1). На западе море граничит с побережьями острова Ньюфаундленд и одноименного полуострова Лабрадор, на севере – с островом Баффинова Земля и морем Баффина, на востоке – с островом Гренландия, на юге – с водами Атлантического океана.

Принято считать, что северная граница, разделяющая акваторию моря Лабрадор и моря Баффина, проходит по параллели 60° с.ш. от мыса Чидли на п-ове Лабрадор до мыса Фарвель на о. Гренландия. С юга и востока границей моря принимается прямая от мыса Фарвель до мыса Сент-Франсис на о. Ньюфаундленд.



Рисунок 1.1 – Физическая карта моря Лабрадор

Площадь акватории моря составляет 841 тыс. км², а объем – 1596 тыс. км³.

Физико-географические особенности положение моря Лабрадор, такие как, близость к Арктике и расположение между о. Гренландией и северо-восточным побережьем Северной Америки определяет суровость климата в данном районе.

1.2 Рельеф и геологическое строение Лабрадорского моря

Геологическое строение дна моря сформировано в результате тектонической активности, повлекшей за собой отделение Гренландии от Северной Америки, которое произошло более сорока миллионов лет назад.

Как было сказано выше, на западе море граничит с п-ом Лабрадор и о. Ньюфаундленд и Баффинова Земля, а на востоке с о. Гренландия.

На формирование рельефа восточного побережья Северной Америки основное влияние оказал ледник, существовавший там в прошлом. Рельеф полуострова Лабрадор, который имеет наиболее протяженную границу с одноименным морем, – гористая. Центральную часть полуострова занимает Озёрное плато с преобладающими высотами 500-800 м. На северо-востоке возвышается хребет Торнгат с высотами до 1600 м.

На юго-западе о. Гренландия расположены плоскогорья с преобладающими высотами 400-600м, которые чередуются с горными массивами высотой 1700-2000м. Восточное побережье, хоть оно и расположено дальше от моря Лабрадор, но имеет более высокие горные хребты до 3700м (гора Гунбьёрн).

На восточном побережье Северной Америки и вблизи Гренландии расположено большое количество более мелких островов и скал, а сами побережья представляет собой глубокие и длинные фьорды.

Таким образом, следует предположить, что возвышенности, расположенные на востоке Северной Америки не сильно прикрывают море Лабрадор от проникновения воздушных масс и циклонов с запада. Горные массивы на острове Гренландия, наоборот способствуют накоплению и задержке облачности в восточной части акватории моря при адвекции воздушных масс западных направлений, что, в свою очередь, способствует выпадению осадков в данном районе.

В рельефе дна моря Лабрадор довольно хорошо выделяется шельф, материковый склон и ложе (рисунок 1.2).

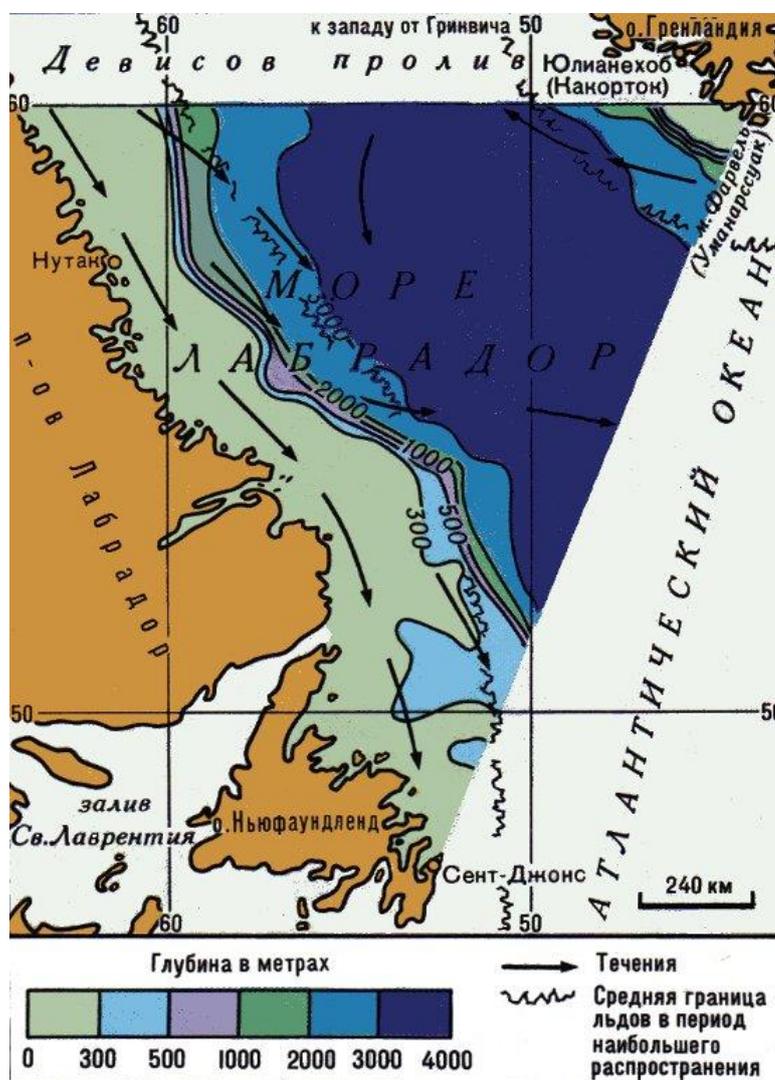


Рисунок 1.2 – Рельеф дна моря Лабрадор

Шельф моря Лабрадор достаточно широкий (шириной до 250 км) на восточном побережье Северной Америки и значительно более узкий (до 50 км)

– у побережья Гренландии. Шельфовая зона характеризуется развитием реликтовых форм ледникового рельефа. В прибрежной части в больших количествах встречаются впадины, большие рифы и отмели.

Море Лабрадор на севере упирается в подводный хребет с глубиной порога порядка 800 м, который разделяет море Лабрадор и море Баффина. Переходной зоной между двумя морями является пролив Дейвиса.

К юго-востоку глубины достаточно резко возрастают до 2000 м, а затем более плавно до глубин порядка 3700 м (см. рисунок 1.2), образуя, таким образом, материковый склон.

Ложе расположено в юго-западной части акватории моря и представляет собой абиссальную равнину, на которой встречаются подводные поднятия и впадины. В некоторых местах глубины превышают 4000 м. В юго-западной части моря Лабрадор расположена центральная депрессия — Лабрадорская котловина, которая частично заходит в море Ирмингера.

Данное изложение было бы не полным без упоминания о самом крупном в мире турбидитовом канале, который проходит по дну водоёма с северо-запада на юго-восток. Турбидитовый канал представляет собой водный поток, переносящий терригенные осадки (песок, алевроиты, ил и т.п.) с мелководий в глубокие океанические котловины. Данный канал является одним из самых крупных в мире. Поток образуется под действием силы тяжести. Вместе с переносом осадков происходит и перенос масс воды с низкими температурами, а, следовательно, и количества движения.

Мелководная шельфовая часть моря Лабрадор может способствовать прогреву данной части акватории в теплое время года и его быстрому охлаждению в зимние месяцы. Глубоководная часть моря Лабрадор, можно считать, является более стабильной в термическом отношении. Оно не сильно прогревается летом, и более продолжительное время охлаждается в холодной время года.

1.3 Гидрологический режим моря Лабрадор

Особенности гидрологического режима определяются ограниченным водообменом с Северным Ледовитым океаном (через море Баффина), относительно свободной связью с Атлантическим океаном, материковым стоком и опреснением поверхностного слоя при таянии льда.

Циркуляция воды в море Лабрадор осуществляется против часовой стрелки. Скорость течений составляет около 1 м/с, в некоторых местах уменьшается до 0,2 м/с.

Вдоль западного побережья Гренландии с юга на север проходит Западно-Гренландское течение, которое несет относительно теплые и высокосолёные (35 ‰) воды. Температуры воды в зависимости от сезона года изменяются в среднем от $+5 \div 6^\circ \text{C}$ летом до точки замерзания зимой.

Вдоль восточного побережья Северной Америки с севера на юг проходит Лабрадорское течение, которое выносит холодные и слабосолёные (31-34 ‰) воды. Температуры воды ниже -1°C отмечается на глубине 100 м даже в летом.

Южнее пролива Дейвиса Лабрадорское течение соединяется с ветвью Западно-Гренландского течения.

Они поддерживают нулевую температуру воды и солёность в пределах 30-34 промилле.

Море Лабрадор относится к числу ледовитых. Близость Арктики оказывает огромное влияние на климатический режим водоема. Это одно из морей Мирового океана, в котором льды встречаются на протяжении большей части года, и может занимать до $2/3$ его площади.

Льдообразование начинается, в среднем, в начале ноября в северной части п-ова Лабрадор. В это же время в заливах, бухтах и фьордах формируется припай. В заливах и бухтах северо-восточного берега о. Ньюфаундленд лед начинает образовываться в конце декабря.

В море Лабрадор распространены главным образом плавучие льды, которые, как правило, выносятся из моря Баффина Лабрадорским течением. Дрейфующий лед занимает довольно широкую полосу моря, протянувшуюся вдоль побережья Лабрадора и северного берега Ньюфаундленда, а также у юго-западной оконечности Гренландии.

Таяние льда начинается с середины мая. Полное очищение моря ото льда происходит только в августе. В летние месяцы в море также встречаются айсберги.

Крупные реки в акваторию моря Лабрадор не впадают ни со стороны Северной Америки, ни со стороны Гренландии. Однако, соленость воды в прибрежных районах моря вследствие совместного действия многих факторов понижается до 33 ‰.

1.4 Синоптические особенности акватории моря Лабрадор

Акватория моря Лабрадор находится под влиянием трех основных центров действия атмосферы: исландского минимума, азорского максимума и канадского (северо-американского) зимнего антициклона, которые формируют генеральную систему ветров в данном районе.

В Северном полушарии в холодное время года над материками формируются ложбины холода, над океанами – гребни тепла. Оси ложбин холода образуются над восточными побережьями континентов, а оси гребней – над восточными акваториями океанов. Таким образом, над восточным побережьем Северной Америки наблюдается интенсивная адвекция холода, и формируются благоприятные условия для возникновения циклонов. Возникая у восточных берегов Северной Америки, циклоны перемещаются в северо-восточном направлении через Ньюфаундленд на Исландию. Как правило, в Исландию циклоны приходят в стадии максимального развития.

В холодное время года над материками образуются благоприятные условия для антициклогенеза. Над восточными районами Северной Америки формируется сезонный центр действия атмосферы – северо-американский антициклон. Совместно с исландским минимумом он приводит к ветрам над морем Лабрадор преимущественно западных направлений. Из-за больших градиентов давления скорость ветра имеет характерные значения 8-11 м/с. Над северо-восточной акваторией моря часто наблюдаются северо-восточные ветры со скоростью порядка 9-10 м/с.

В холодное время года, ветры данных направлений несут с собой с территории Канады холодный континентальный арктический 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 на некотором удалении от восточного побережья Северной Америки.

На фронтальном разделе этих воздушных масс располагаются циклоны, перемещающиеся примерно вдоль фронта на северо-восток. Передвижение этих циклонов способствует усилению западных и северных ветров на западе и ослаблению их или даже перемене на южные на востоке моря.

Температура поверхности океана от зимы к лету изменяется мало, а материка летом значительно прогреваются, поэтому температурные контрасты в тропосфере летом существенно меньше, чем зимой. Таким образом, циклоническая деятельность в теплое время года развита существенно меньше. Однако, повторяемость циклонов над материком увеличивается. Циклоны перемещаются преимущественно в широтном направлении.

В теплое время года канадский максимум отсутствует, сильно ослабевает исландский минимум, смещаясь на запад на 30-40°. Над всей акваторией Лабрадорского моря отмечаются ветры западных направлений со скоростью в среднем 4-7 м/с.

1.5 Климатические особенности акватории моря Лабрадор

Основными факторами, формирующими климат в данном районе, являются географическое положение района, морские течения и муссонная циркуляция атмосферы. Море Лабрадор находится в непосредственной близости с Арктикой, поэтому имеет достаточно суровый субарктический климат. Особенностью географического положения Лабрадорского моря является то, что оно в значительной степени вытянуто с северо-запада на юго-восток. В результате климатические условия в этих частях моря существенно различаются.

То обстоятельство, что на северо-западе море граничит с материком Северная Америка, с одной стороны, и с островом Гренландия, с другой стороны, обуславливает континентальные черты и суровость климата в северо-западной части моря. На юге и юго-востоке море Лабрадор свободно сообщается с Атлантическим океаном, что определяет более мягкие черты климата в юго-восточном районе моря.

Муссонный характер циркуляции атмосферы определяется взаимодействием главных барических образований: зимой Канадского антициклона и Исландского минимума, а летом – Азорского максимума и области пониженного давления над Северной Америкой.

Такое расположение барических образований обуславливает в холодное время года перенос холодного воздуха с материка на океан (зимний муссон), в результате чего в северных районах моря Лабрадор устанавливается суровая зима с преобладанием северо-западных и западных ветров. В это время здесь стоит ясная погода, температура воздуха низкая. По мере продвижения на юго-восток сухой и холодный континентальный арктический воздух встречается с относительно теплым и влажным морским воздухом умеренных широт. При взаимодействии этих воздушных масс образуется арктический фронт, на

котором развивается активная циклоническая деятельность, особенно значительная в южной части моря.

В теплое время года над Северной Америкой формируется область пониженного атмосферного давления, а над северной частью Атлантического океана – область повышенного давления (Азорский максимум). В результате такого расположения барических образований происходит перенос морского тропического воздуха с океана на сушу (летний муссон). В первой половине лета над еще непрогретым морем Лабрадор располагается область повышенного атмосферного давления, поэтому даже в южных районах моря лето очень прохладное. Во вторую половину лета над большей частью моря преобладает циклоническая деятельность. В это время здесь наблюдается более теплая, облачная погода с частыми туманами и большим количеством осадков.

Таким образом, климат в море Лабрадор изменяется от морского в юго-восточной акватории моря до сурового континентального – на северо-западе. Температура воздуха в январе-феврале понижается от $0\text{--}3^{\circ}\text{C}$ на юго-востоке до $-17\text{--}20^{\circ}\text{C}$ на северо-западе; в июле-августе соответственно от $+10\text{--}+13^{\circ}\text{C}$ до $+4\text{--}+7^{\circ}\text{C}$.

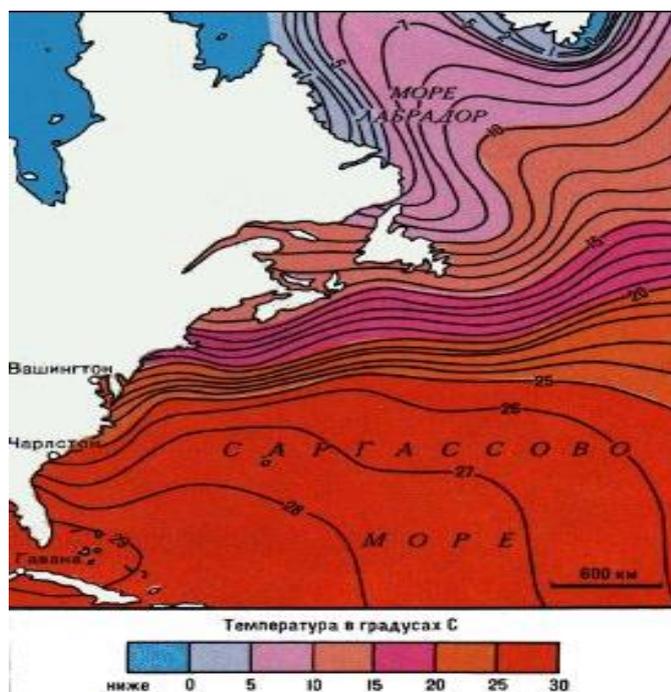


Рисунок 1.2 – Среднее многолетнее распределение температур моря Лабрадор

Температура воды моря Лабрадор монотонно понижается с юго-востока на северо-запад. Вблизи побережий температура также ниже, чем внутри моря. Этому способствует в зимнее время охлаждающее влияние материка Северная Америка и острова Гренландия, а в летнее время – таяние льда и снега в прибрежных районах и сток их в море. Кроме того, такому распределению температур в немалой степени способствует и расположение морских течений. В среднем температура воды моря Лабрадор в холодную часть года составляет около $0,5^{\circ}\text{C}$ и только в июле-августе поверхностный слой прогревается до $6-7^{\circ}\text{C}$.

В море Лабрадор выпадает достаточно большое количество осадков. Количество осадков в среднем составляет около 1500мм в год. Наибольшее количество осадков (до 1900мм в год) выпадает у берегов острова Ньюфаундленд, наименьшее (менее 1000мм в год), которое оказывается все равно достаточно приличным – в северо-западной части моря. Такое распределение осадков обуславливается положением арктического фронта и его изменением в течении года.

2. Анализ многолетних рядов температуры воздуха и осадков

2.1 Выбор пунктов наблюдений

Для анализа климатических изменений температуры воздуха и осадков над акваторией моря Лабрадор выбраны несколько метеорологических станций, которые характеризуют различные его районы. Наблюдательные станции расположены на юго-западном побережье острова Гренландии, а также на восточном побережье Канады (провинции Ньюфаундленд и Лабрадор).

Было выбрано 4 метеостанций, расположение которых показано на рис. 2.1, а названия и координаты станций указаны в таблице. 2.1

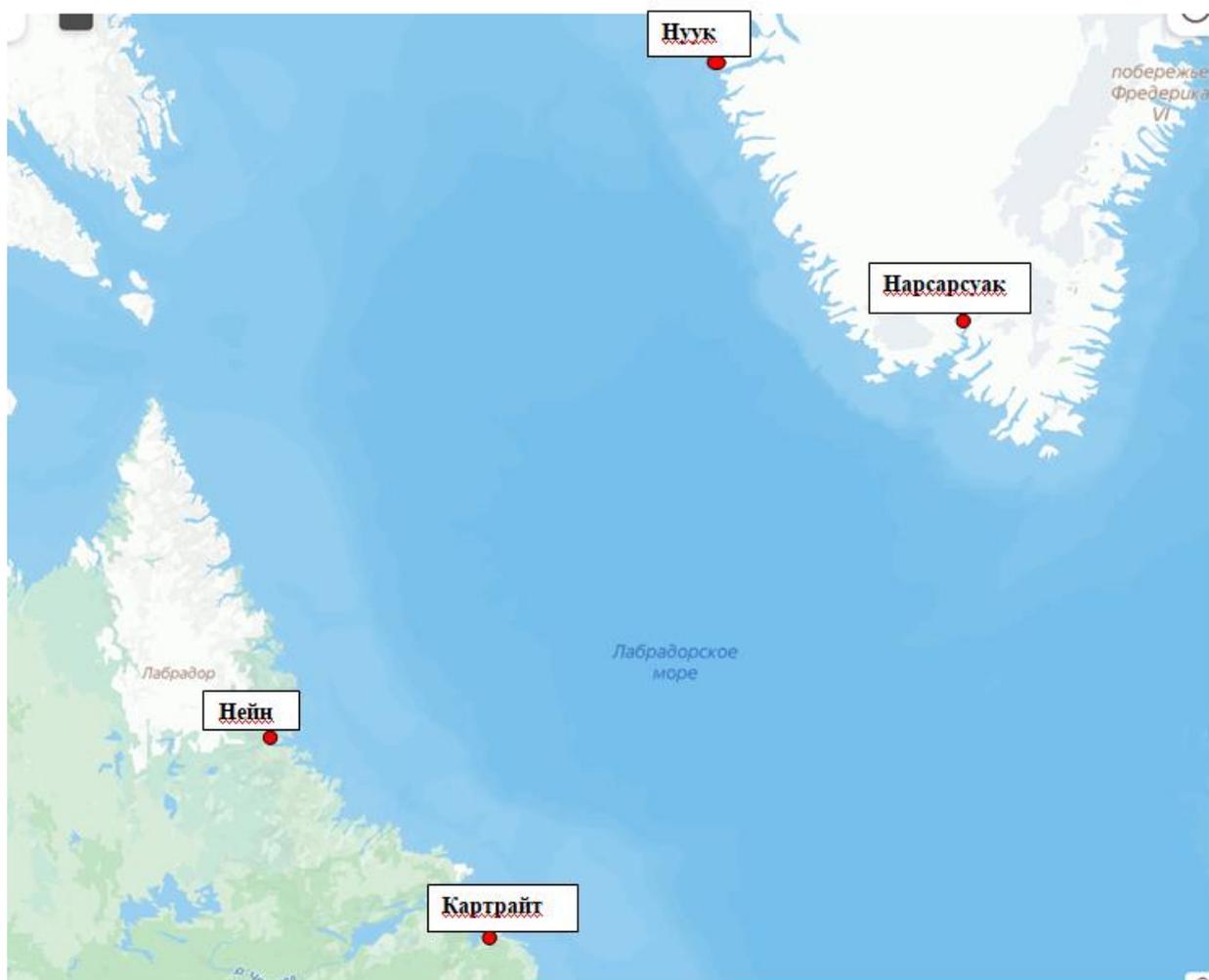


Рисунок 2.1 Расположение пунктов наблюдения в море Лабрадор

Таблица 2.1

Названия и координаты станций в море Лабрадор

| Синоп. индекс | Наименование | Продолжительность наблюдений | Кол-во лет | Широта, град | Долгота, град |
|---------------|--------------|------------------------------|------------|---------------|----------------|
| 04250 | Нуук | 1866 - 2019 | 153 | 64,17с.ш | - 51,75з.д |
| 04270 | Нарсарсуак | 1875 по н.в. | 147 | 61,13 с.ш. | - 45,43з.д. |
| 71902 | Нейн | 1883- по н.в. | 139 | 56,60 с.ш. | -61,70 з.д. |
| 71818 | Картрайт | 1938-2019 | 81 | 53,70 с.ш. | -57,01 з.д. |

Наблюдательные станции были выбраны таким образом, чтобы они равномерно были распределены по границам Лабрадорского моря и наилучшим образом отражали климатические условия в различных его районах. Станции Нуук и Нарсарсуак характеризуют северную северо-восточную часть моря в районе острова Гренландия, станции Нейн и Картрайт южную и юго-западную акватории моря.

Многолетние ряды среднемесячных температур воздуха и сумм месячных осадков скачаны с сайта «Погода и климат»[4] и сайта Королевского метеорологического института Нидерландов [5].

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:

- 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 не стационарности экстремумов и дисперсий.

Чтобы использовать метод, необходимо создать базу данных однородных не прерывистых 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 $\{Y_n\}$:

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

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

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

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

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

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 $\{Y_n\}$:

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

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

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

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

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

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 :

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

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:

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

Расчетные значения статистик критериев Диксона и Смирнова-Граббса сравниваются с их критическими табличными значениями, 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 временной 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 $\sigma_j^2, \sigma_{j+1}^2$ – 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 Оценивание 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 2.2-2.5.

Визуальный анализ рисунка 2.2 показывает, что в Нууке в период с 1922 г до 1960 г количество выпавших осадков в среднем существенно ниже, чем за последующий период наблюдений. Данное обстоятельство может быть вызвано сменой приборов для измерения количества осадков: дождемеров на осадкомеры.

Кроме того, в 2001-2002 и в 2010гг. наблюдались резко выраженные максимумы, который более чем на 700 мм превышали экстремальных значений в другие годы за рассматриваемый период, а в 2008 г наблюдалось минимальное количество осадков за весь период наблюдений.



Рисунок 2.3 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции Нуук

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

Таблица 2.2

Оценки однородности эмпирического распределения годовых сумм осадков для станции Нуук

| Экстремум | Критерий | Расчетн. знач. | Критич. знач. | Вывод |
|-----------|----------------|----------------|---------------|-----------|
| max | Диксон 1 | 0,15 | 0,47 | однороден |
| max | Диксон 2 | 0,17 | 0,48 | однороден |
| max | Диксон 3 | 0,24 | 0,57 | однороден |
| max | Диксон 4 | 0,25 | 0,57 | однороден |
| max | Диксон 5 | 0,23 | 0,57 | однороден |
| max | Смирнов-Граббс | 3,94 | 4,80 | однороден |
| min | Диксон 1 | 0,00 | 0,08 | однороден |
| min | Диксон 2 | 0,00 | 0,10 | однороден |
| min | Диксон 3 | 0,05 | 0,13 | однороден |
| min | Диксон 4 | 0,05 | 0,14 | однороден |
| min | Диксон 5 | 0,04 | 0,14 | однороден |
| min | Смирнов-Граббс | 1,28 | 2,02 | однороден |

Из анализа данных табл. 2.2 следует сделать вывод, что временной ряд годовых сумм осадков на станции Нуук за рассматриваемый период является однородным.

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

станции Нуук был разбит на две не равные подвыборки: с 1922 по 1959 гг. и с 1960 по 2018 гг. По методике, описанной в п. 2.2. определены критические значения статистик Фишера и Стьюдента. Результаты оценивания стационарности представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Результаты оценивания стационарности эмпирического распределения годовых сумм осадков для метеостанции Нуук

| Критерий | Расчетн. знач. | Критич. знач. | Вывод |
|----------|----------------|---------------|-------------|
| Фишер | 12,63 | 2,12 | неоднороден |
| Стьюдент | 5,46 | 2,17 | неоднороден |

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

На рисунке 2.3 изображена хронология годовых сумм осадков на станции Нейн. В распоряжении имеется ограниченный временной ряд наблюдений менее 30 лет, ярко выраженных экстремумов на нем не наблюдается. Проверка качества временного ряда для станции Нейн проведена, оценки показали, что временной ряд однороден и стационарен.



Рисунок 2.3 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции Нейн

Анализ рисунка 2.4 показывает, что на станции Картрайт в 1993 году наблюдался резко выраженный минимум, который приблизительно на 200 мм меньше экстремальных значений других лет за этот период.



Рисунок 2.4 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции Картрайт

Оценки однородности приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Оценки однородности годовых сумм осадков для метеостанции Картрайт

| Экстремум | Критерий | Расчетн. знач. | Критич. знач. | Вывод |
|-----------|----------------|----------------|---------------|-------------|
| max | Диксон 1 | 0,021 | 0,24 | однороден |
| max | Диксон 2 | 0,027 | 0,27 | однороден |
| max | Диксон 3 | 0,076 | 0,32 | однороден |
| max | Диксон 4 | 0,084 | 0,33 | однороден |
| max | Диксон 5 | 0,06 | 0,33 | однороден |
| max | Смирнов-Граббс | 1,78 | 3,49 | однороден |
| min | Диксон 1 | 0,23 | 0,10 | неоднороден |
| min | Диксон 2 | 0,24 | 0,15 | неоднороден |
| min | Диксон 3 | 0,31 | 0,19 | неоднороден |

| | | | | |
|-----|----------------|------|------|-------------|
| min | Диксон 4 | 0,32 | 0,21 | неоднороден |
| min | Диксон 5 | 0,31 | 0,18 | неоднороден |
| min | Смирнов-Граббс | 3,27 | 2,63 | неоднороден |

Проверка временного ряда годовых сумм осадков на станции Картрайт на однородность по максимальным экстремумам показывает, что ряд однороден, а по минимальным экстремумам – неоднороден.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений временной ряд годовых сумм осадков был разбит на две равные подвыборки. В табл. 2.5 приведены оценки стационарности для станции Картрайт.

Таблица 2.5

Оценки стационарности годовых сумм осадков для станции Картрайт

| Критерий | Расчетн. знач. | Критич. знач. | Вывод |
|----------|----------------|---------------|-------------|
| Фишер | 1,02 | 2,15 | стационарен |
| Стьюдент | 1,26 | 2,07 | стационарен |

Расчетные значения статистики Фишера и Стьюдента меньше критических значений, что говорит о принятии гипотез стационарности.

На рисунке 2.5 изображена хронология годовых сумм осадков на станции Нарсарсуак. В распоряжении имеется ограниченный временной ряд наблюдений менее 30 лет, ярко выраженных экстремумов на нем не наблюдается. Проверка качества временного ряда для станции Нарсарсуак проведена, оценки показали, что временной ряд однороден и стационарен.



Рисунок 2.5 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции Нарсарсуак

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. Первоначально были построены и проанализированы хронологические графики среднемесячной температуры за январь.

Визуальный анализ графика 2.6 показал, что на ст. Нейн в январе за весь период наблюдений прослеживается тенденция к потеплению. Резких экстремумов не наблюдается.

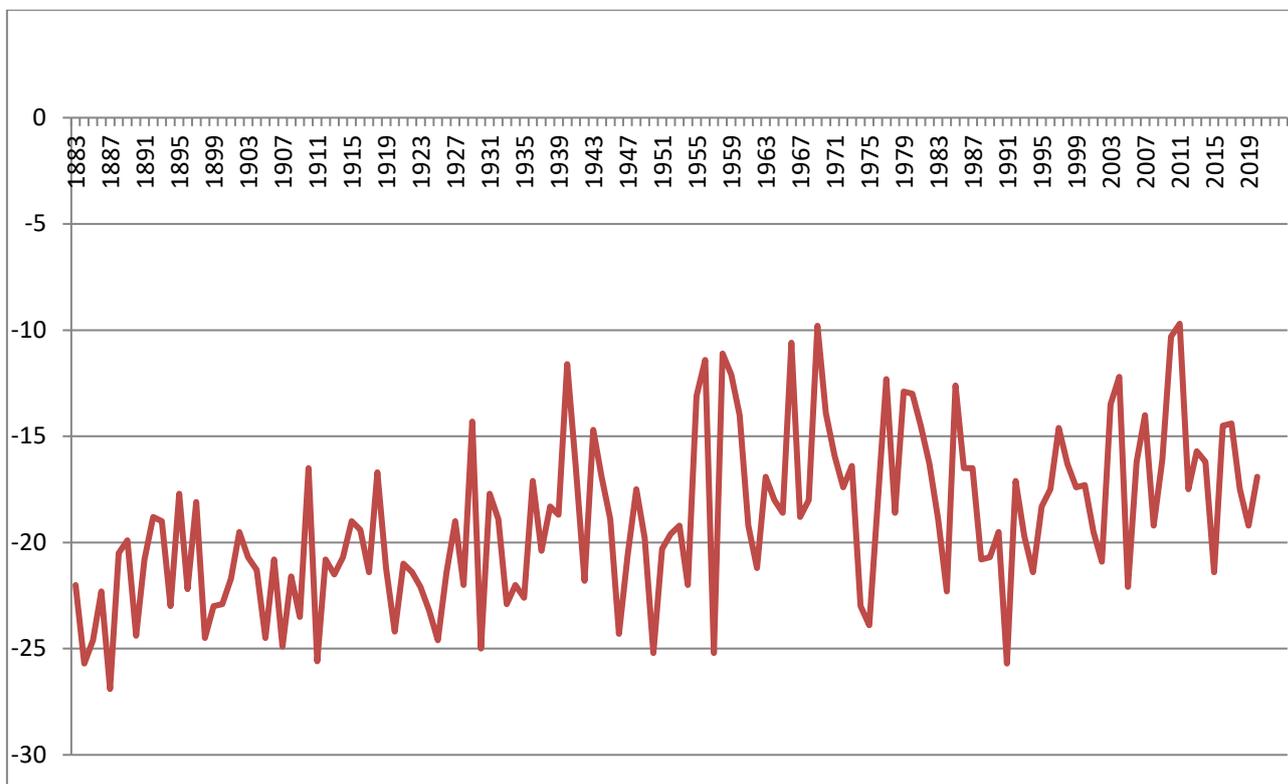


Рисунок 2.6 – Хронологический график среднемесячных температур января для станции Нейн

Результаты оценивания однородности по критериям Диксона и Смирнова-Граббса для станции Нейн представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Результаты оценивания однородности эмпирического распределения среднемесячных температур января для станции Нейн

| Экстремум | Критерий | Расчетн. знач. | Критич. знач. | Вывод |
|-----------|----------------|----------------|---------------|-----------|
| max | Диксон 1 | 0,01 | 0,22 | однороден |
| max | Диксон 2 | 0,01 | 0,23 | однороден |
| max | Диксон 3 | 0,04 | 0,29 | однороден |
| max | Диксон 4 | 0,04 | 0,33 | однороден |
| max | Диксон 5 | 0,04 | 0,27 | однороден |
| max | Смирнов-Граббс | 2,39 | 3,63 | однороден |

| | | | | |
|-----|----------------|------|------|-----------|
| min | Диксон 1 | 0,07 | 0,13 | однороден |
| min | Диксон 2 | 0,07 | 0,15 | однороден |
| min | Диксон 3 | 0,07 | 0,19 | однороден |
| min | Диксон 4 | 0,07 | 0,21 | однороден |
| min | Диксон 5 | 0,07 | 0,17 | однороден |
| min | Смирнов-Граббс | 2,05 | 2,68 | однороден |

Из анализа данных табл. 2.6 следует сделать вывод, что временной ряд среднемесячных температур за январь на станции Нейн является однородным.

Далее временной ряд был разбит на две равные подвыборки. По методике, описанной в п. 2.2. определены критические значения статистик Фишера и Стьюдента. Результаты оценивания стационарности для станции Нейн представлены в Табл. 2.7. Расчетное значение статистики по критерию Фишера оказалось меньше критического значения, в данном случае гипотеза о стационарности принимается, а, по критерию Стьюдента – больше критического значения, в этом случае гипотеза стационарности отклоняется.

Таблица 2.7

Оценки стационарности эмпирического распределения среднемесячных температур января для станции Нейн

| Критерий | Расчетн. знач. | Критич. знач. | Вывод |
|----------|----------------|---------------|----------------|
| Фишер | 1,55 | 1,94 | стационарен |
| Стьюдент | 6,72 | 2,68 | не стационарен |

Визуальный анализ графика 2.7 показал, что в период с 1886 по 1925 гг на ст. Нуук в январе наблюдалась тенденция к потеплению, затем наступила некоторая стабилизация температуры. До 1886 г наблюдалась тенденция к похолоданию, в дальнейшем этот период рассматриваться не будет, так как не отражает современных климатических изменений. Кроме того, аномальные

максимально низкие среднемесячные температуры в январе наблюдались в 1983-1984 гг. и достигали $-19,0^{\circ}\text{C}$.

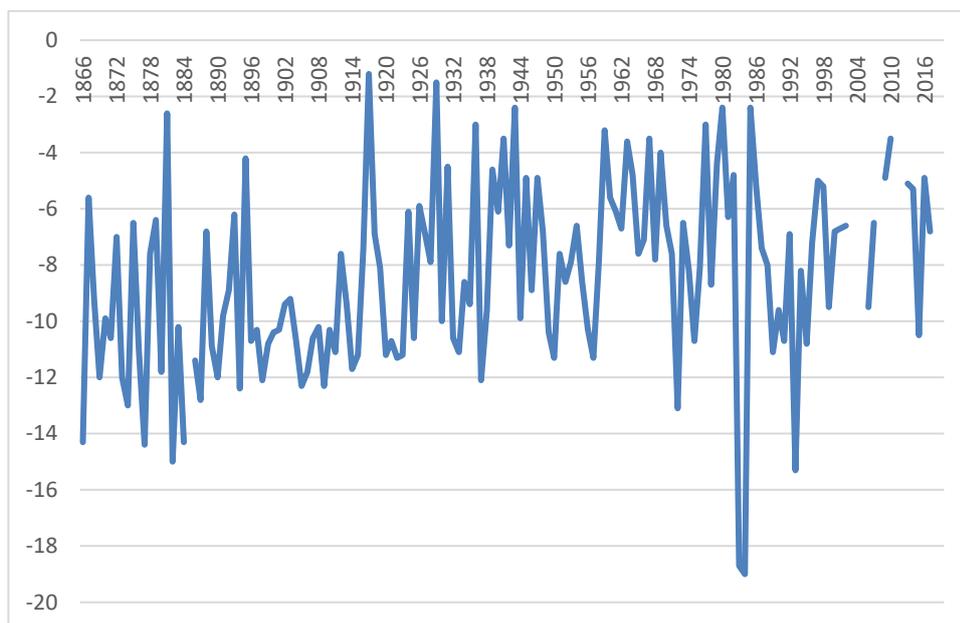


Рисунок 2.7 – Хронологический график среднемесячных температур января для станции Нуук

Результаты оценивания однородности по критериям Диксона и Смирнова-Граббса для станции Нуук представлены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Результаты оценивания однородности эмпирического распределения среднемесячных температур января для станции Нуук

| Экстремум | Критерий | Расчетн. знач. | Критич. знач. | Вывод |
|-----------|----------------|----------------|---------------|-----------|
| max | Диксон 1 | 0,02 | 0,25 | однороден |
| max | Диксон 2 | 0,02 | 0,26 | однороден |
| max | Диксон 3 | 0,07 | 0,31 | однороден |
| max | Диксон 4 | 0,07 | 0,32 | однороден |
| max | Диксон 5 | 0,07 | 0,3 | однороден |
| max | Смирнов-Граббс | 2,12 | 3,85 | однороден |

| | | | | |
|-----|----------------|------|------|-------------|
| min | Диксон 1 | 0,00 | 0,10 | однороден |
| min | Диксон 2 | 0,00 | 0,12 | однороден |
| min | Диксон 3 | 0,02 | 0,15 | однороден |
| min | Диксон 4 | 0,02 | 0,16 | однороден |
| min | Диксон 5 | 0,02 | 0,14 | однороден |
| min | Смирнов-Граббс | 3,11 | 2,42 | неоднороден |

Из анализа данных табл. 2.8 следует сделать вывод, что временной ряд среднемесячных температур на станции Нуук за рассматриваемый период является однородным.

Далее временной ряд был разбит на две не равные подвыборки: с 1886 по 1925 гг. и с 1926 по 2002 гг. По методике, описанной в п. 2.2. определены критические значения статистик Фишера и Стьюдента. Результаты оценивания стационарности для станции Нуук представлены в Табл. 2.9. Расчетное значение статистики по критерию Фишера оказалось меньше критического значения, в данном случае гипотеза о стационарности принимается, а, по критерию Стьюдента – больше критического значения, в этом случае гипотеза стационарности отклоняется.

Таблица 2.9

Оценки стационарности эмпирического распределения среднемесячных температур января для метеостанции Нуук

| Критерий | Расчетн. знач. | Критич. знач. | Вывод |
|----------|----------------|---------------|----------------|
| Фишер | 1,15 | 1,60 | стационарен |
| Стьюдент | 2,75 | 1,98 | не стационарен |

На графике 2.8 представлена хронология среднемесячных температур января на станции Картрайт. Визуальный анализ графика 2.8 показывает, что на

станции Картрайт в период с 1935 по 1990 гг. наблюдается тенденция к понижению температуры, а затем – тенденция к повышению температуры. Резко выраженных экстремумов не наблюдается.

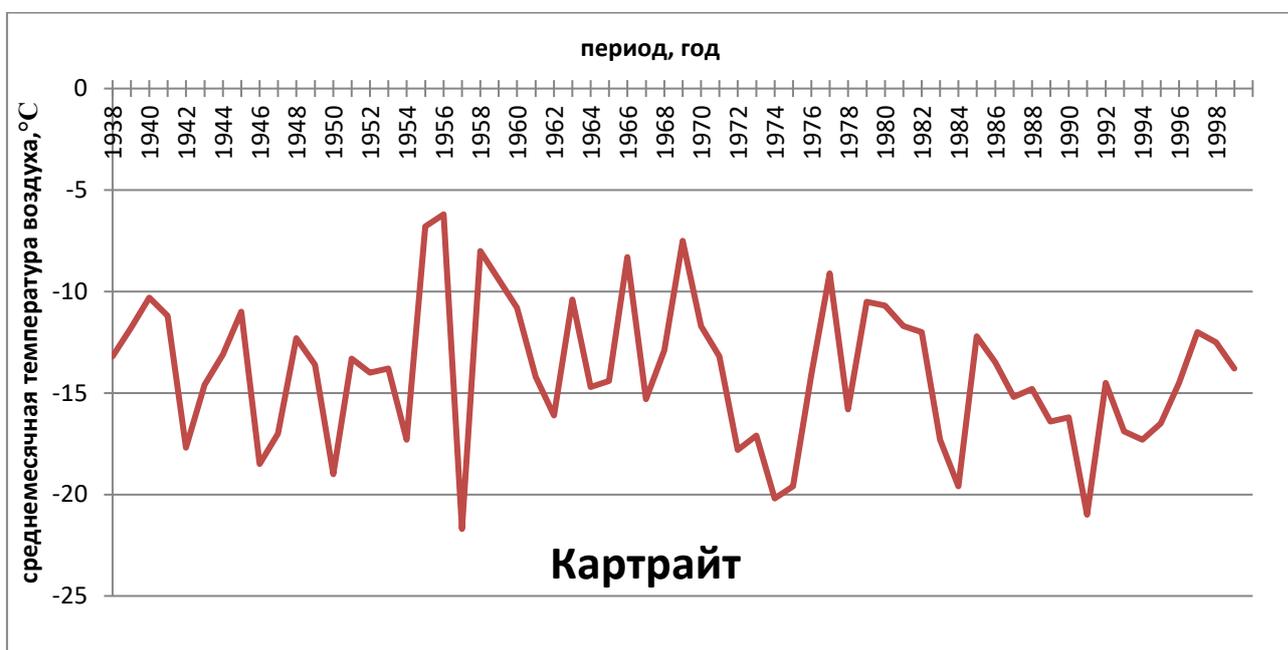


Рисунок 2.8– Хронологический график среднемесячных температур января для станции Картрайт

Произведены расчеты статистик по критериям Диксона и Смирнова-Граббса. Результаты представлены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Оценки однородности эмпирического среднемесячных температур января для станции Картрайт

| Экстремум | Критерий | Расчетн. знач. | Критич. знач. | Вывод |
|-----------|----------|----------------|---------------|-----------|
| max | Диксон 1 | 0,04 | 0,23 | однороден |
| max | Диксон 2 | 0,04 | 0,27 | однороден |
| max | Диксон 3 | 0,09 | 0,32 | однороден |
| max | Диксон 4 | 0,09 | 0,33 | однороден |
| max | Диксон 5 | 0,08 | 0,30 | однороден |

| | | | | |
|-----|----------------|------|------|-----------|
| max | Смирнов-Граббс | 2,21 | 3,49 | однороден |
| min | Диксон 1 | 0,05 | 0,10 | однороден |
| min | Диксон 2 | 0,05 | 0,15 | однороден |
| min | Диксон 3 | 0,10 | 0,19 | однороден |
| min | Диксон 4 | 0,11 | 0,21 | однороден |
| min | Диксон 5 | 0,10 | 0,18 | однороден |
| min | Смирнов-Граббс | 2,20 | 2,63 | однороден |

Из табл. 2.8 следует, что временной ряд среднемесячной температуры воздуха за январь на станции Картрайт за рассматриваемый период является однородным.

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

Результаты представлены в табл. 2.11.

Таблица 2.11

Оценки стационарности эмпирического распределения среднемесячных температур января для станции Картрайт

| Критерий | Расчетн. знач. | Критич. знач. | Вывод |
|----------|----------------|---------------|-------------|
| Фишер | 1,21 | 2,15 | стационарен |
| Стьюдент | 1,60 | 1,98 | стационарен |

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

Временные ряды температур воздуха на станции Нарсарсуак имеют большие пропуски в наблюдениях, поэтому анализироваться не будут.

2.5 Оценка однородности и стационарности среднемесячных температур воздуха для июля

Следующим этапом работы были построены и проанализированы хронологические графики среднемесячной температуры за июль.

На рисунке 2.9 представлена хронология среднемесячных температур июля на станции Нейн. Визуальный анализ графика 2.9 показывает, что тенденция к росту температуры, наблюдавшаяся в первую половину периода наблюдений, сменилась в середине срока тенденцией к понижению температуры. При этом как тренд к росту температуры, так и тренд к понижению температуры промодулировано квазигармоническими волнами с периодом более 20 лет. Резко выраженных экстремумов не наблюдается.

Оценки однородности представлены в табл. 2.12, из которого следует сделать вывод, что временной ряд среднемесячных температур июля для станции Нейн является однородным.

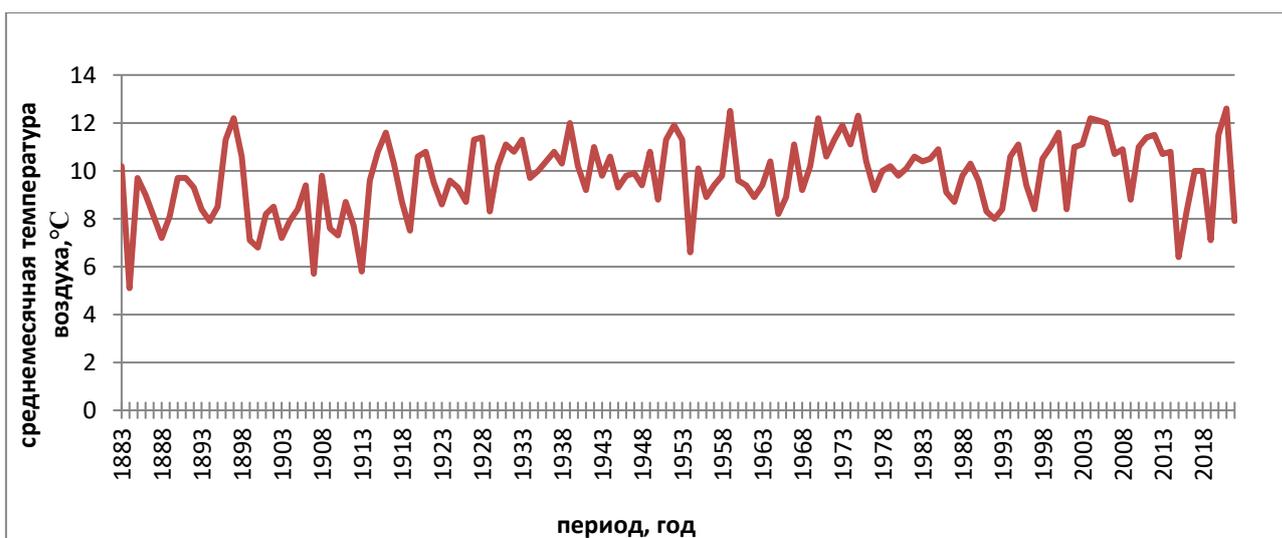


Рисунок 2.9 – Хронологический график среднемесячных температур июля для станции Нейн

Таблица 2.12

Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячных температур июля для станции Нейн

| Экстремум | Критерий | Расчетн. знач. | Критич. знач. | Вывод |
|-----------|----------------|----------------|---------------|-------------|
| max | Диксон 1 | 0,01 | 0,22 | однороден |
| max | Диксон 2 | 0,02 | 0,23 | однороден |
| max | Диксон 3 | 0,04 | 0,29 | однороден |
| max | Диксон 4 | 0,04 | 0,33 | однороден |
| max | Диксон 5 | 0,04 | 0,27 | однороден |
| max | Смирнов-Грabbс | 1,89 | 3,63 | однороден |
| min | Диксон 1 | 0,08 | 0,13 | однороден |
| min | Диксон 2 | 0,08 | 0,15 | однороден |
| min | Диксон 3 | 0,10 | 0,19 | однороден |
| min | Диксон 4 | 0,10 | 0,21 | однороден |
| min | Диксон 5 | 0,09 | 0,17 | однороден |
| min | Смирнов-Грabbс | 3,06 | 2,68 | неоднороден |

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений по критериям Фишера и Стьюдента временной ряд разделили на две равные части. Оценки стационарности представлены в табл. 2.13.

Таблица 2.13

Оценки стационарности эмпирического распределения среднемесячных температур июля для станции Нейн

| Критерий | Расчетн. знач. | Критич. знач. | Вывод |
|----------|----------------|---------------|----------------|
| Фишер | 1,55 | 1,94 | стационарен |
| Стьюдент | 2,78 | 2,68 | не стационарен |

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

Визуальный анализ графика 2.10 показал, что в период до 1915 г на ст. Нуук в июле наблюдалась тенденция к понижению температуры, затем до 1935 г – тенденция к росту температуры, затем до 1996 г – тенденция к понижению температуры, затем в течении приблизительно двадцати лет – тенденция к росту температуры. Резко выраженных экстремумов не наблюдается.

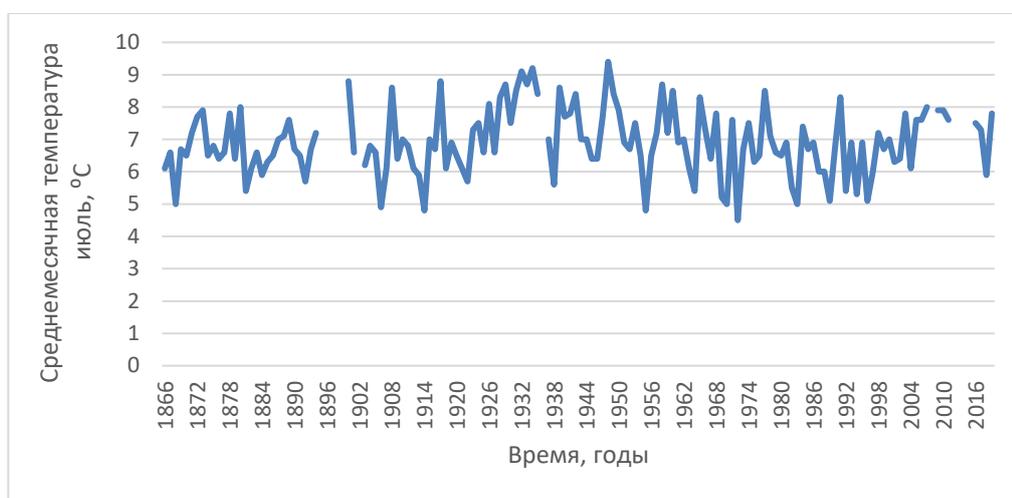


Рисунок 2.10 – Хронологический график среднемесячных температур июля для станции Нуук

Таблица 2.14

Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячных температур июля для станции Нуук

| Экстремум | Критерий | Расчетн. знач. | Критич. знач. | Вывод |
|-----------|----------|----------------|---------------|-----------|
| max | Диксон 1 | 0,04 | 0,17 | однороден |
| max | Диксон 2 | 0,04 | 0,18 | однороден |
| max | Диксон 3 | 0,07 | 0,23 | однороден |
| max | Диксон 4 | 0,07 | 0,24 | однороден |

| | | | | |
|-----|----------------|------|------|-----------|
| max | Диксон 5 | 0,06 | 0,22 | однороден |
| max | Смирнов-Граббс | 2,24 | 3,18 | однороден |
| min | Диксон 1 | 0,06 | 0,15 | однороден |
| min | Диксон 2 | 0,06 | 0,16 | однороден |
| min | Диксон 3 | 0,06 | 0,21 | однороден |
| min | Диксон 4 | 0,07 | 0,22 | однороден |
| min | Диксон 5 | 0,06 | 0,19 | однороден |
| min | Смирнов-Граббс | 2,21 | 3,18 | однороден |

Оценки однородности отражены в табл. 2.14, из анализа которых следует сделать вывод, что временной ряд среднемесячных температур июля за рассматриваемый период является однородным.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений временной ряд разделили на две неравные части. Оценки стационарности представлены в табл. 2.15.

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

Таблица 2.15

Оценки стационарности эмпирического распределения среднемесячных температур июля для станции Нуук

| Критерий | Расчетн. знач. | Критич. знач. | Вывод |
|----------|----------------|---------------|----------------|
| Фишер | 1,37 | 1,7 | стационарен |
| Стьюдент | 3,78 | 2,17 | не стационарен |

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



Рисунок 2.11 – Хронологический график среднемесячных температур июля для станции Картрайт

Визуальный анализ графика 2.11 показывает, что в период до 1993 г на ст. Картрайт в июле наблюдалась тенденция к понижению температуры, затем до 2013 г – тенденция к росту температуры, затем снова наметилась тенденция к понижению температуры. Резко выраженных экстремумов не наблюдается.

Произведены расчеты статистик по критериям Диксона и Смирнова-Граббса, они представлены в табл. 2.16.

Таблица 2.16

Оценки однородности эмпирических среднемесячных температур июля для станции Картрайт

| Экстремум | Критерий | Расчетн. знач. | Критич. знач. | Вывод |
|-----------|----------------|----------------|---------------|-----------|
| max | Диксон 1 | 0,03 | 0,23 | однороден |
| max | Диксон 2 | 0,03 | 0,27 | однороден |
| max | Диксон 3 | 0,13 | 0,32 | однороден |
| max | Диксон 4 | 0,14 | 0,33 | однороден |
| max | Диксон 5 | 0,13 | 0,30 | однороден |
| max | Смирнов-Граббс | 2,46 | 3,49 | однороден |
| min | Диксон 1 | 0,03 | 0,1 | однороден |

| | | | | |
|-----|----------------|------|------|-----------|
| min | Диксон 2 | 0,03 | 0,15 | однороден |
| min | Диксон 3 | 0,08 | 0,19 | однороден |
| min | Диксон 4 | 0,09 | 0,21 | однороден |
| min | Диксон 5 | 0,08 | 0,18 | однороден |
| min | Смирнов-Граббс | 2,35 | 2,63 | однороден |

Из анализа табл. 2.17 следует, что временной ряд однороден.

Для оценивания стационарности временной ряд разделили на две равные части. Оценки стационарности представлены в табл. 2.17.

Таблица 2.17

Оценки стационарности эмпирического распределения среднемесячных температур июля для станции Картрайт

| Критерий | Расчетн. знач. | Критич. знач. | Вывод |
|----------|----------------|---------------|----------------|
| Фишер | 2,45 | 2,15 | не стационарен |
| Стьюдент | 2,65 | 1,98 | не стационарен |

Расчетные значения статистик по критериям Фишера и Стьюдента для станции Картрайт больше критических значений, на основе чего можно сделать вывод о стационарности дисперсии и среднего не принимается.

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 ряде.

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 табл. 3.1 приведены основные параметры стационарной модели для рассматриваемых станций моря Лабрадор.

Таблица 3.1

Основные параметры стационарных модели для выбранных станций

| Название метеостанции | Среднее $Y_{cp}(t)$, мм | СКО $\sigma(t)$, мм |
|-----------------------|--------------------------|----------------------|
| Нуук | 1120,9 | 524,3 |
| Нейн | 917,3 | 164,2 |
| Картрайт | 993,4 | 188,6 |
| Нарсарсуак | 630,1 | 177,8 |

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 табл. 3.2 приведены основные параметры линейной модели для рассматриваемых станций моря Лабрадор.

Таблица 3.2

Основные параметры линейной модели для выбранных станций

| Название станции | b_0 | b_1 | R | R^* | Вывод |
|------------------|---------|---------|-------|-------|------------|
| Нуук | -9158,1 | 5,1718 | 0,155 | 0,265 | Не значима |
| Нейн | 938,3 | -1,5545 | 0,070 | 0,374 | Не значима |
| Картрайт | 959,3 | 0,9635 | 0,396 | 0,244 | Значима |
| Нарсарсуак | 721,2 | -7,2883 | 0,290 | 0,388 | Незначима |

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 Нуук, Нейн и Нарсарсуак условие (3.7) не выполняется, таким образом, линейная модель для данных станций является статистически не значимой (рисунок 3.1). Для станции Картрайт, имеющей самый продолжительный период наблюдений, линейная модель является статистически значимой.

В табл. 3.3 приведены основные параметры модели ступенчатых изменений для станций Нуук и Картрайт, имеющих достаточно продолжительные периоды наблюдений.

Таблица 3.3

Основные параметры ступенчатой модели для выбранных станций

| Название метеостанции | Степень | n | $Y_{cp,j}$, мм | σ_j | $\sigma_{ст}$ |
|-----------------------|---------|-----|-----------------|------------|---------------|
| Нуук | 1 | 37 | 986,6 | 265,8 | 394,2 |
| | 2 | 17 | 1163,3 | 575,0 | |
| Картрайт | 1 | 25 | 1064,9 | 201,5 | 170,1 |
| | 2 | 38 | 967,7 | 167,1 | |

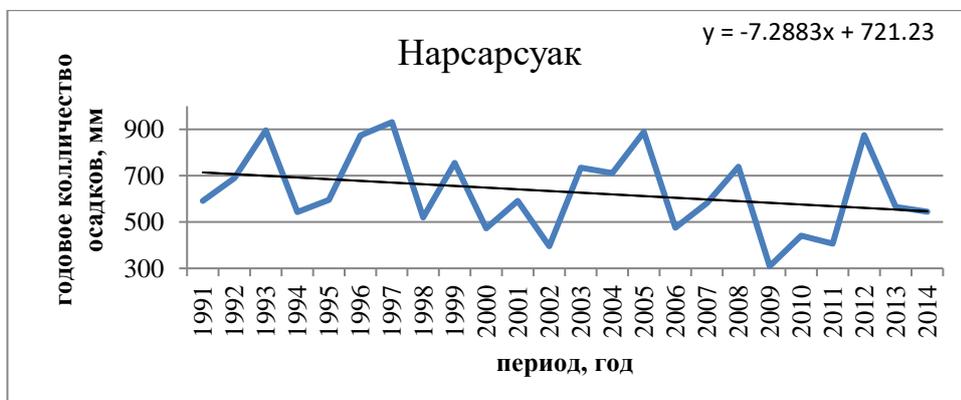
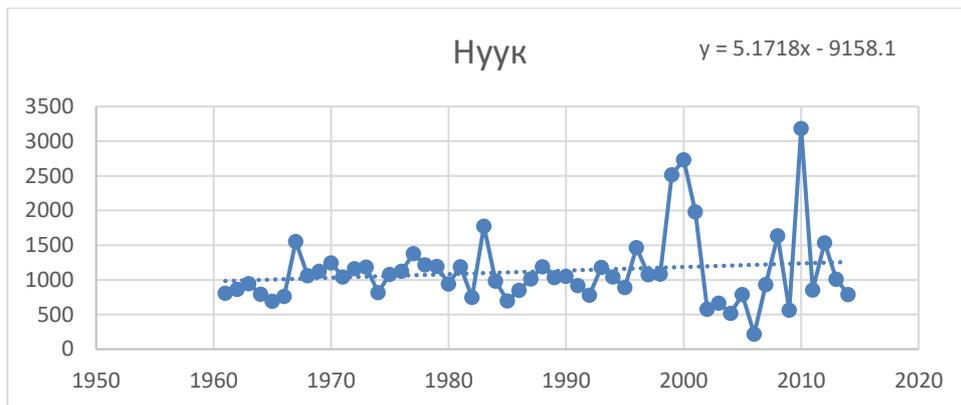


Рисунок 3.1 – Линейная модель годовых сумм осадков для станций моря Лабрадор

В табл. 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} |
|-----------------------|------------------------|---------------|-------------------|-------------------|----------|----------|
| Нуук | 517,96 | 394,20 | 1,21 | 24,81 | 1,03 | 1,77 |
| Нейн | 163,81 | – | 0,26 | – | 1,01 | – |
| Картрайт | 173,44 | 186,99 | 8,17 | 0,99 | 1,19 | 1,02 |
| Нарсарсуак | 170,13 | – | 4,30 | – | 1,09 | – |

Из анализа данных табл. 3.4 следует, что нестационарные модели для некоторых станций являются статистически значимыми. Для станции Нуук для описания изменения количества осадков оптимальной является модель ступенчатых изменений, а для станции Картрайт – модель линейного тренда. Станции Нейн и Нарсарсуак, имеющие не большой период наблюдений, лучше описываются стационарной моделью,

3.3 Оценивание климатических изменений среднемесячных температур января

Многолетние ряды среднемесячной температуры воздуха января использовались для построения моделей климатических изменений температур воздуха. В табл. 3.5 приведены параметры стационарной модели для станций Нейн, Нуук и Картрайт.

В табл. 3.6 приведены основные параметры линейной модели для рассматриваемых станций моря Лабрадор.

Таблица 3.5

Основные параметры стационарных моделей станций моря Лабрадор

| Название станции | Среднее $Y_{cp}(t)$, мм | СКО $\sigma(t)$, мм |
|------------------|--------------------------|----------------------|
| Нуук | -8,41 | 3,29 |
| Нейн | -18,97 | 3,87 |
| Картрайт | -13,59 | 3,45 |

Таблица 3.6

Основные параметры линейной модели для выбранных станций

| Название станции | b_0 | b_1 | R | R^* | Вывод |
|------------------|--------|--------|------|-------|-----------|
| Нуук | -57,48 | 0,025 | 0,33 | 0,159 | Значима |
| Нейн | -22,37 | 0,049 | 0,51 | 0,159 | Значима |
| Картрайт | -12,83 | -0,036 | 0,04 | 0,217 | Незначима |

В таблице 3.6 приведены критические коэффициенты корреляции для уровня значимости $\alpha = 5 \%$. Для станций Нуук и Нейн, имеющие период наблюдений порядка 140 лет линейная модель является статистически значимой, для станции Картрайт, имеющей период наблюдений 82 г, линейная модель не является статистически значимой (рисунок 3.2).

Таблица 3.7

Основные параметры ступенчатой модели для выбранных станций

| Название метеостанции | Степень | n | $Y_{cp,j}$, мм | σ_j | σ_{cm} |
|-----------------------|---------|-----|-----------------|------------|---------------|
| Нуук | 1 | 90 | -9,07 | 2,93 | 2,93 |
| | 2 | 57 | -7,50 | 2,91 | |
| Нейн | 1 | 69 | -20,91 | 2,92 | 2,74 |
| | 2 | 69 | -17,03 | 2,53 | |
| Картрайт | 1 | 55 | -13,70 | 2,76 | 3,21 |
| | 2 | 30 | -13,42 | 3,87 | |

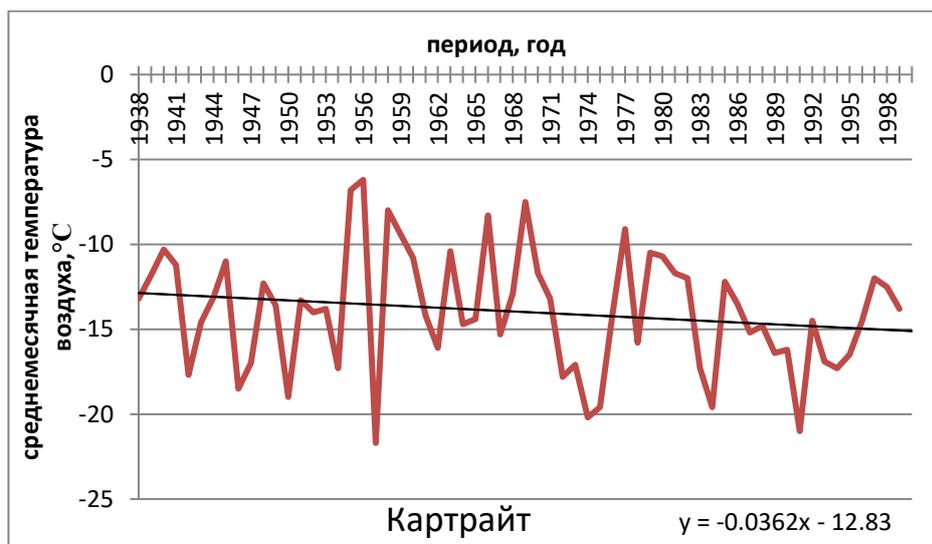
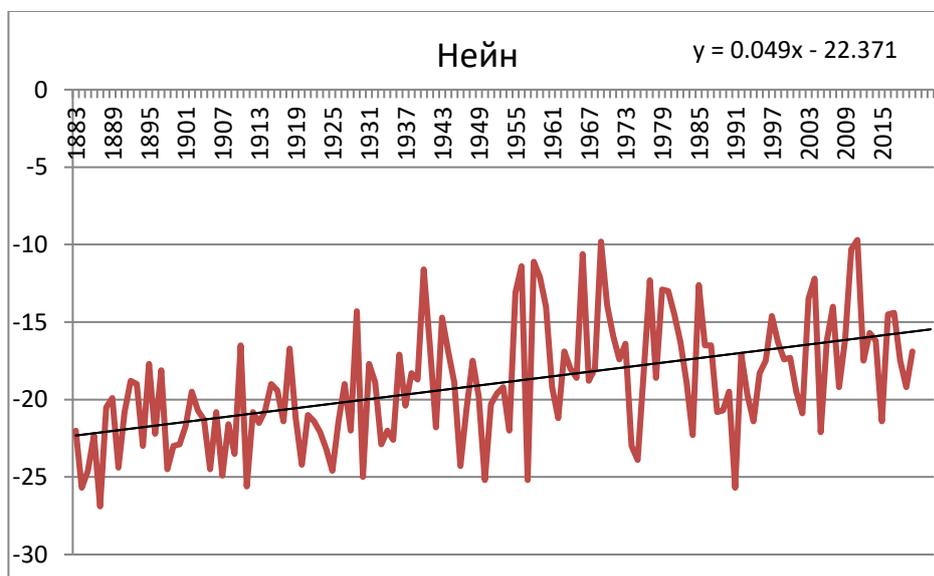
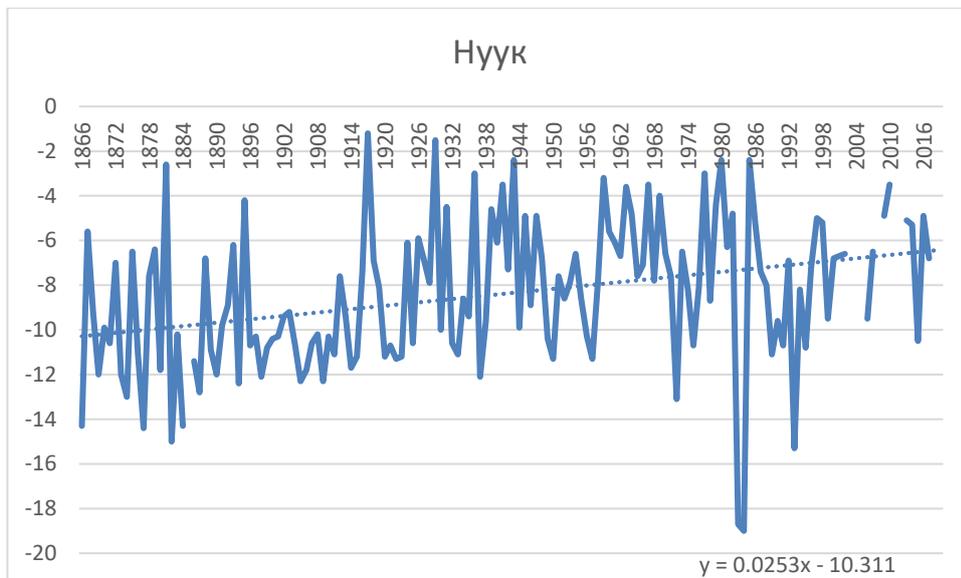


Рисунок 3.2 – Линейная модель среднемесячных температур в январе для всех станций

Основные параметры модели ступенчатых изменений представлены в табл. 3.7. В табл. 3.12 приведены стандарты остатков нестационарных моделей, их отличие от стационарной модели в процентах и расчетные значения статистик критерия Фишера.

Таблица 3.8

Оценки эффективности и статистической значимости моделей

| Название метеостанции | σ_{ε} | $\sigma_{ст}$ | $\Delta_{тр}$, % | $\Delta_{ст}$, % | $F_{тр}$ | $F_{ст}$ |
|-----------------------|------------------------|---------------|-------------------|-------------------|----------|----------|
| Нуук | 3,10 | 2,93 | 5,69 | 10,94 | 1,12 | 1,26 |
| Нейн | 3,34 | 2,74 | 13,72 | 29,61 | 1,34 | 1,99 |
| Картрайт | 3,50 | 3,21 | 0,07 | 6,92 | 1,00 | 1,15 |

Анализ данных табл. 3.8 показывает, что для выбранных станций моря Лабрадор для описания изменения температуры в холодное время года модель ступенчатых изменений является наилучшей (эффективной и статистически значимой).

3.4 Оценивание климатических изменений среднемесячных температур июля

Многолетние ряды среднемесячной температуры воздуха июля использовались для построения моделей климатических изменений температур воздуха. В табл. 3.9 приведены параметры стационарной модели для станций Нейн, Нуук и Картрайт.

В табл. 3.10 приведены основные параметры линейной модели для рассматриваемых станций моря Лабрадор.

Таблица 3.9

Основные параметры стационарных моделей станций моря Лабрадор

| Название станции | Среднее $Y_{cp}(t)$, мм | СКО $\sigma(t)$, мм |
|------------------|--------------------------|----------------------|
| Нуук | 6,88 | 1,05 |
| Нейн | 9,74 | 1,52 |
| Картрайт | 12,77 | 1,34 |

Таблица 3.10

Основные параметры линейной модели для выбранных станций

| Название станции | b_0 | b_1 | R | R^* | Вывод |
|------------------|-------|--------|------|-------|------------|
| Нуук | 6,78 | 0,001 | 0,05 | 0,164 | Не значима |
| Нейн | 8,85 | 0,013 | 0,34 | 0,166 | Значима |
| Картрайт | 13,59 | -0,003 | 0,05 | 0,217 | Не значима |

В табл. 3.11 приведены критические коэффициенты корреляции для уровня значимости $\alpha = 5\%$. Для станции Нейн линейная модель является статистически значимой, для станции Нуук и Картрайт – линейная модель не является статистически значимой (рисунок 3.3).

Таблица 3.11

Основные параметры ступенчатой модели для выбранных станций

| Название метеостанции | Степень | n | $Y_{cp,j}$, мм | σ_j | σ_{cm} |
|-----------------------|---------|-----|-----------------|------------|---------------|
| Нуук | 1 | 50 | 6,56 | 0,82 | 0,94 |
| | 2 | 95 | 7,02 | 0,99 | |
| Нейн | 1 | 70 | 9,38 | 1,55 | 1,60 |
| | 2 | 70 | 10,09 | 1,63 | |
| Картрайт | 1 | 50 | 12,79 | 0,82 | 0,99 |
| | 2 | 31 | 12,74 | 1,21 | |

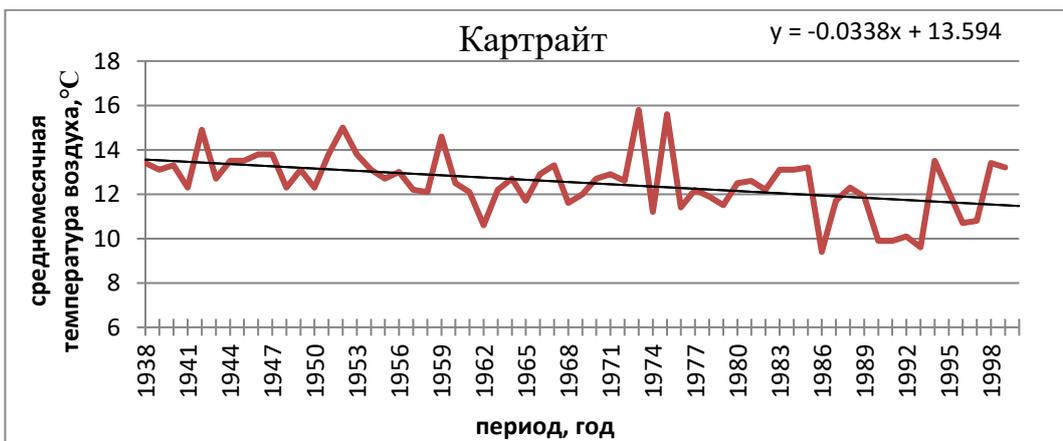
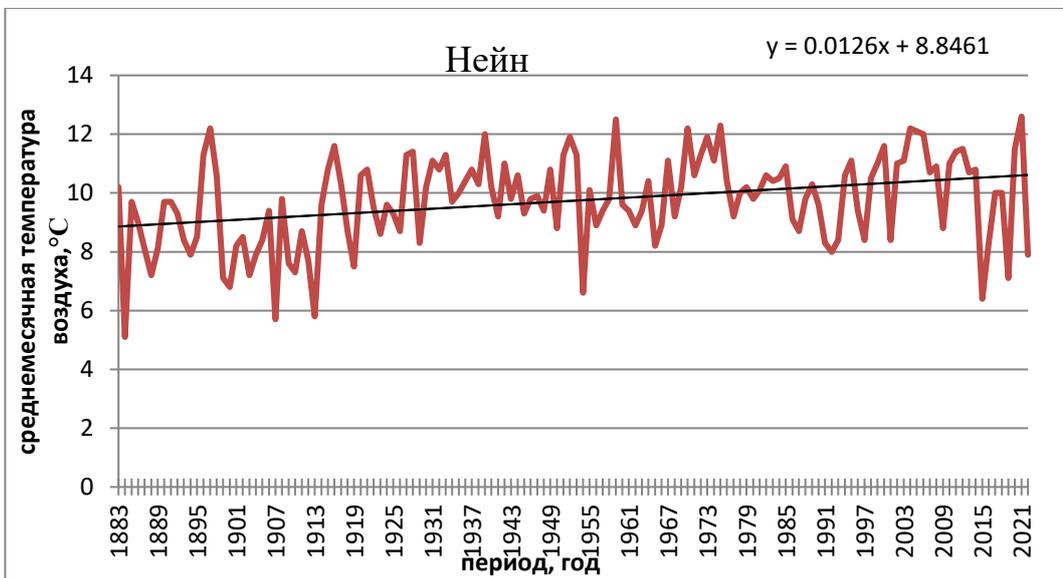
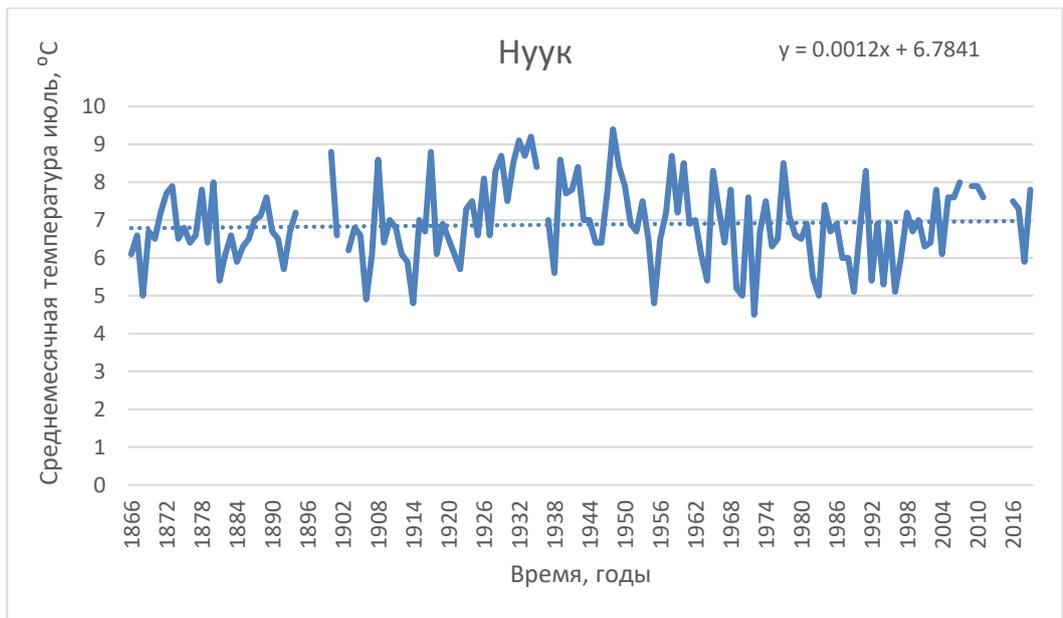


Рисунок 3.2 – Линейная модель среднемесячных температур в июле для всех станций

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

Таблица 3.12

Оценки эффективности и статистической значимости моделей

| Название метеостанции | σ_ε | $\sigma_{ст}$ | Δ_{mp} , % | $\Delta_{ст}$, % | F_{mp} | $F_{ст}$ |
|-----------------------|----------------------|---------------|-------------------|-------------------|----------|----------|
| Нуук | 1,05 | 0,94 | 0,13 | 10,47 | 1,00 | 1,25 |
| Нейн | 1,42 | 1,60 | 5,86 | -5,23 | 1,13 | 0,90 |
| Картрайт | 1,34 | 0,99 | 0,12 | 26,08 | 1,00 | 1,83 |

Анализ данных табл. 3.12 показывает, что для станций Картрайт и Нуук наилучшей для описания изменения температуры в теплое время года модель ступенчатых изменений, а для станции Нейн – линейная модель.

Заключение

В работе рассмотрено влияние физико-географических и синоптико-климатических условий на климат моря Лабрадор. Основными факторами, формирующими климат в данном районе, являются географическое положение района, морские течения и муссонная циркуляция атмосферы. Море Лабрадор находится в непосредственной близости с Арктикой, поэтому имеет достаточно суровый субарктический климат.

Условно акваторию моря Лабрадор можно разделить на северо-западную часть, климат в которой более суровый, а осадков выпадает больше из-за прохождения арктического фронта, и юго-восточную, на которую значительное влияние оказывает связь с Атлантическим океаном.

Для анализа были выбраны 4 наблюдательные станции приблизительно равномерно размещенных по границам моря. На побережье Северной Америки выбраны станции Нейн и Картрайт, а на побережье острова Гренландия – Нуук и Нарсарсуак. Станции Нейн и Нарсарсуак имеют не продолжительный период наблюдений за количеством осадков, а станция Нарсарсуак имеет много пропусков в наблюдениях температуры, поэтому данные этой станции по температуре не анализировались.

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 не стационарности.

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

В результате моделирования изменения годового количества осадков в районе моря Лабрадор получен вывод, что на станциях Нуук и Картрайт, имеющих больший период наблюдений, следует отметить тенденцию к увеличению количества выпадающих осадков. На станциях Нейн и Нарсарсуак, имеющих меньший период наблюдений (20-25 лет), отмечается тенденция к снижению количества выпадающих осадков. На станции Нуук наилучшей является модель ступенчатых изменений, а на станции Картрайт – модель линейного тренда.

В результате моделирования изменения температуры воздуха в январе получен вывод, что на станциях Нуук и Нейн, имеющих период наблюдений более 100 лет, в январе и июле наблюдается тенденция к росту температуры, а на станции Картрайт, имеющей менее продолжительный период наблюдений порядка 80 лет – тенденция к понижению температуры. Для описания климатических изменения моря Лабрадор в холодной время года наилучшей является модель ступенчатых изменений, а для теплого времени года – модель ступенчатых изменений для станций Картрайт и Нуук является наилучшей для описания изменения температуры, а для станции Нейн – линейная модель.

Следует отметить, что используемые в данной работе не стационарные модели дают различные результаты при изменении периодов наблюдений.

Список использованных источников

1. Лобанов В.А., Методические указания «Оценка современных региональных изменений климатических характеристик». – СПб.: Изд. РГГМУ, 2018. – 91 с.
2. Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е.. Практикум по климатологии. Часть I. Учебное пособие. - СПб.: РГГМУ, 2011. - 145 с.
3. Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е. Практикум по климатологии. Часть 2. Учебное пособие. – СПб.: изд. РГГМУ, 2012 – 180 с.
4. Российский сайт «Погода и климат» (Электронный ресурс). Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru>
5. Сайт Королевского метеорологического института Нидерландов (Электронный ресурс). Режим доступа: <http://climexp.knmi.nl>