



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 изменений температуры и
количества осадков акватории Карского моря»

Кононов Александр Сергеевич

Исполнитель

(фамилия, имя, отчество)

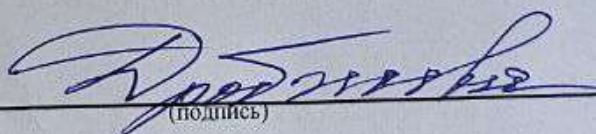
Руководитель

кандидат технических наук доцент
(ученая степень, ученое звание)

Лебедев Андрей Борисович

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Дробжева Яна Викторовна

(фамилия, имя, отчество)

« 29 » июля 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КАРСКОГО МОРЯ	3
1.1. Географическое положение Карского моря	3
1.2. Рельеф и геологическое строение Карского моря.....	4
1.3. Гидрологический режим Карского моря	8
1.4. Синоптические особенности Карского моря.....	13
1.5. Климатические особенности Карского моря.....	14
2 АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ РЯДОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ.....	17
2.1 Выбор пунктов наблюдений.....	17
2.2 Оценивание качества исходных данных.....	18
2.3 Оценка однородности и стационарности среднемесячных температур воздуха.....	23
2.4 Оценка однородности и стационарности количества осадков.	32
3 ОЦЕНИВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ В КАРСКОМ МОРЕ	56
3.1 Статистические методы оценивания климатических изменений.....	56
3.2 Оценивание климатических изменений количества осадков	61
3.3 Оценивание климатических изменений среднемесячных температур января	65
3.4 Оценивание климатических изменений среднемесячных температур июля.	69
Заключение.....	75

Введение

В настоящее время интерес нашей страны к Арктическому региону значительно возрос. Для дальнейшего развития Северного морского пути с созданием береговой инфраструктуры, открытия и эксплуатации новых газовых месторождений необходимо знать и понимать особенности климатических условий в данном регионе. Более того, считается, что изменения климата в Арктике происходят наиболее интенсивно [1].

Объектом исследования выбрана акватория Карского моря, а рассматриваемыми величинами являются среднемесячные температуры воздуха и годовая сумма осадков.

В данной работе постараемся разобраться, каким образом физико-географические особенности местности влияют на климат в данном районе, оценить и проанализировать данные температур воздуха и количества осадков которые являются ключевыми показателями изменчивости климата, выполнить статистическое моделирование разных климатических моделей.

Целью работы является оценка современных климатических изменений температуры количества осадков в акватории Карского моря.

Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ физико-географических и синоптико-климатических условий акватории Карского 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.

1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КАРСКОГО МОРЯ

1.1. Географическое положение Карского моря

Карское море расположено на юге Северного Ледовитого океана между северным побережьем Западно-Сибирской равнины (материк Евразия) и архипелагами Новая Земля, Земля Франца-Иосифа и Северная Земля (рисунок 1.1).

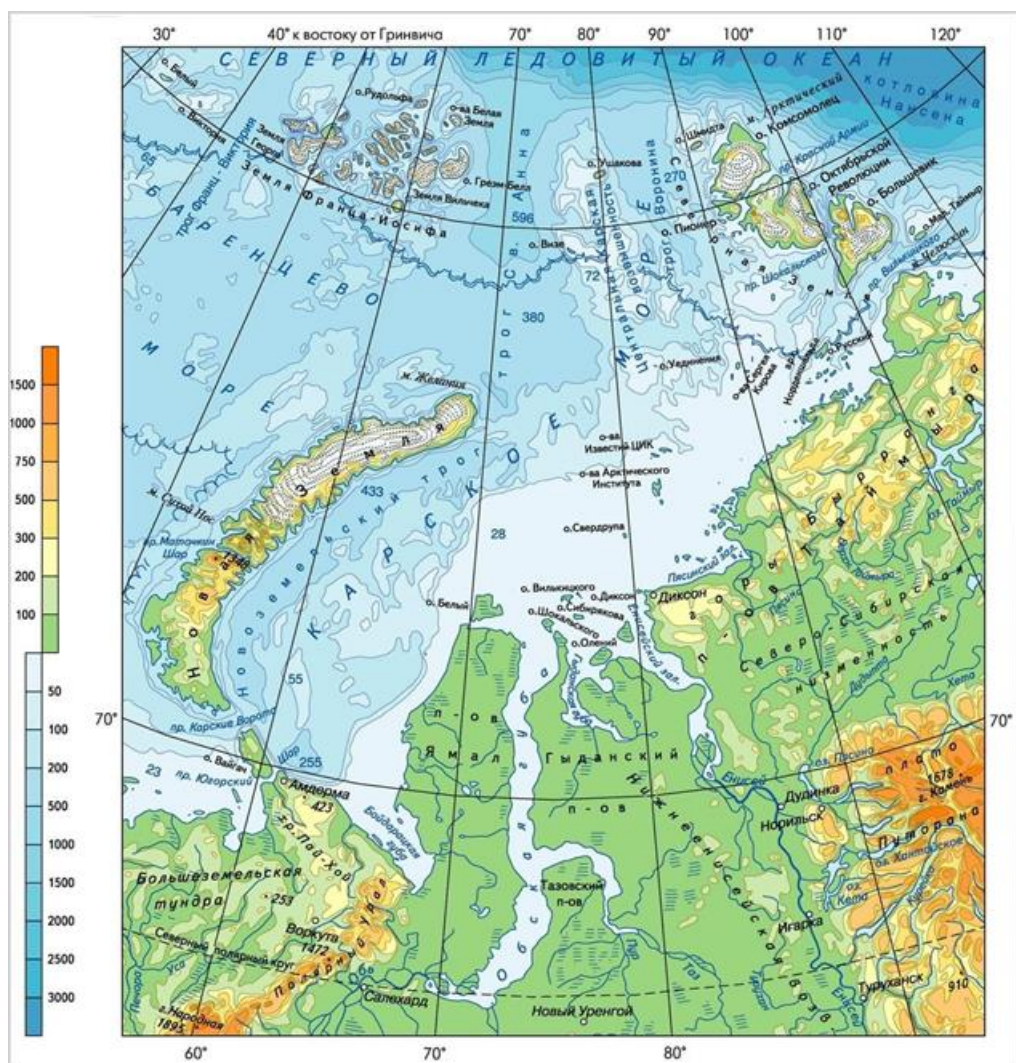


Рисунок 1.1 – Физическая карта Карского моря

На западе Карское море граничит с Баренцевым морем. На юго-западе водная граница проходит через проливы Карские Ворота и Югорский Шар, на западе – через пролив Маточкин Шар. На севере Карское море граничит с Арктическим бассейном Северного Ледовитого океана, на востоке – с морем Лаптевых. На северо-востоке водная граница проходит через проливы Красной Армии, Шокальского и Вилькицкого.

Площадь Карского моря 883 тыс. км², объём 98 тыс. км³. Наибольшая глубина 620 м.

Географическое положение Карского моря, расположенного в арктической зоне, обуславливает отрицательный годовой тепловой баланс на его поверхности. Недостаточный приток солнечной радиации в летний период не позволяет компенсировать значительные потери тепла, происходящие за счет эффективного излучения, испарения и турбулентного теплообмена с атмосферой.

1.2. Рельеф и геологическое строение Карского моря

Карское море характеризуется преобладанием малых глубин. Основная часть его площади расположена на шельфе, где глубина в среднем составляет около 100 метров. Мелководные участки (менее 50 метров) занимают значительную часть моря (около 40%), в то время как глубоководные районы (более 500 метров) встречаются редко (около 2%). Рельеф дна в целом неровный, однако в центральной части моря наблюдается относительно ровная поверхность.

Шельф Карского моря прорезан с севера двумя широкими глубоководными желобами или трогами: трогом Святой Анны и трогом Воронина (рисунок 1.2). Трогом называют удлиненную впадину на дне океана (моря), характеризующуюся широким плоским дном и крутыми склонами.

Трог Святой Анны протянулся вдоль восточного побережья Земли Франца-Иосифа. Его глубина на севере достигает 620 м, на юге уменьшается до 300-400 м. По мере приближения к Новой Земле рельеф дна выравнивается.

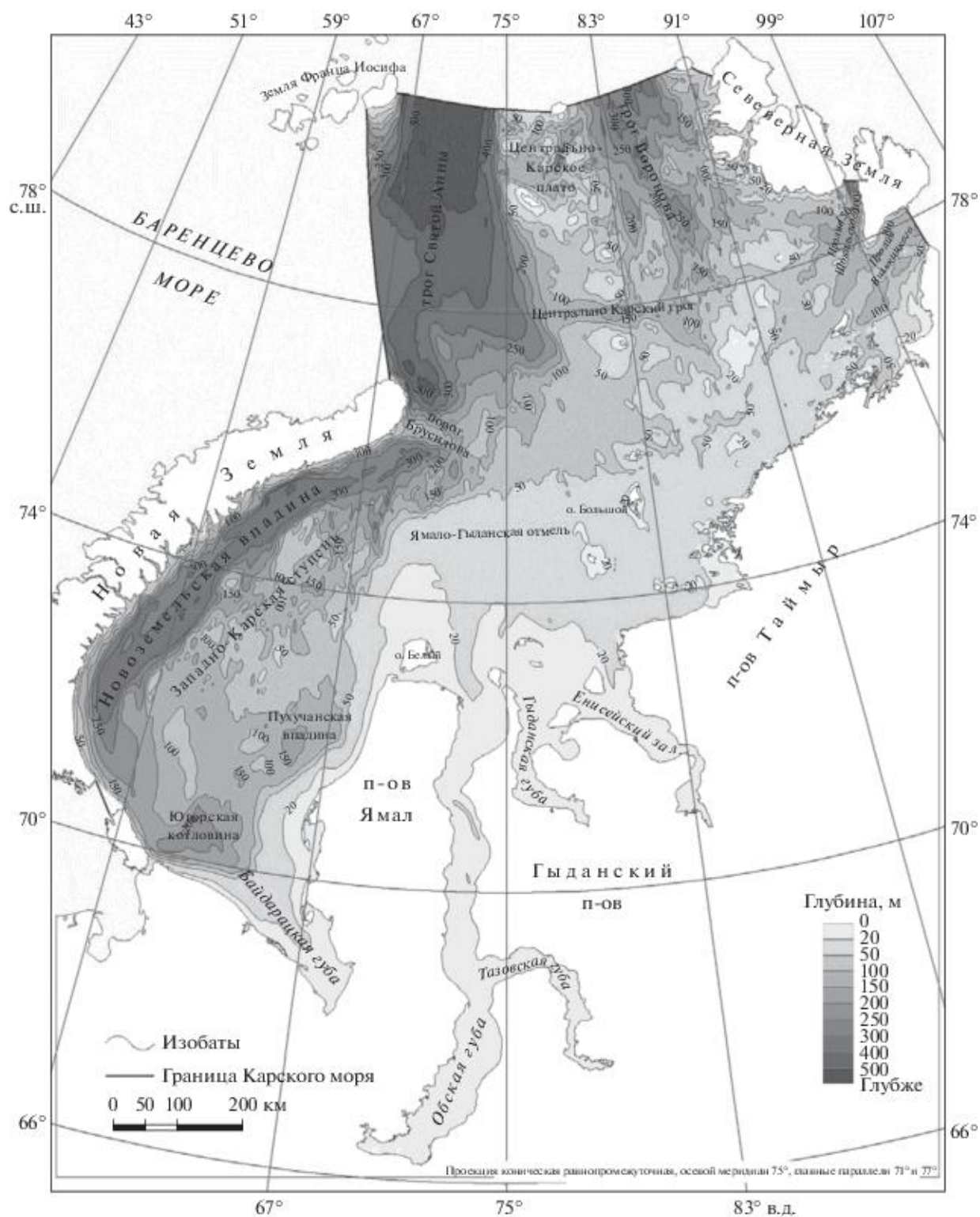


Рисунок 1.2 - Геоморфологическая карта Карского моря

Трог Воронина, достигающий глубины 500 метров, тянется вдоль западного побережья Северной Земли. Он служит границей между Центрально-Карским плато и более ровным, наклонным подводным основанием архипелага Северная Земля.

Центрально-Карское плато, с глубинами менее 50 метров, разделяет трог Святой Анны и Воронина. Над этим плато возвышаются острова Визе и Ушакова (рисунок 1.2).

У восточного побережья Новой Земли расположена Новоземельская впадина, глубина которой варьируется от 200 до 418 метров [2].

Шельф Карского моря представляет собой продолжение молодой Западно-Сибирской платформы. В осадочном строении этой платформы в пределах Карского моря выделяются Южно-Карская и Северо-Карская впадины (рисунок 1.2).

Геологическое строение Южно-Карской впадины имеет много общего с геологией прилегающей к ней части Западно-Сибирской плиты на суше (рисунок 1.3).

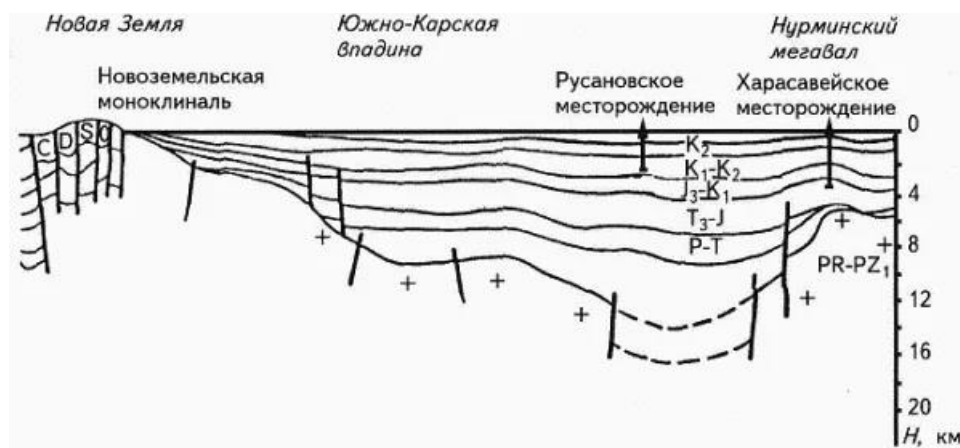


Рисунок 1.3 – Вертикальный разрез Южно-Карской впадины

Формирование Южно-Карской впадины было обусловлено пермско-триасовым рифтогенезом, приведшим к образованию Западно-Сибирской плиты. До позднего мела впадина представляла собой северную окраину этой плиты. В мезозойскую эру, в связи с тектоническими процессами, связанными с раскрытием Северного Ледовитого океана, Южно-Карская впадина стала частью пассивной континентальной окраины, где происходило активное осадконакопление. В результате, впадина заполнена мощной (8-14 км) толщей терригенных отложений юрского и мелового периодов.

Северо-Карская впадина расположена в северо-восточной части Карского моря. Она сформировалась на участке древней платформы Северо-Карской плите и сложена преимущественно допалеозойскими и палеозойскими отложениями. Тектонически связана со структурами Восточно-Сибирской платформы. Глубина залегания платформенного фундамента составляет 12-20 км.

Рельеф дна Карского моря характеризуется неровностью: он испещрен многочисленными небольшими впадинами, которые чередуются с возвышенностями разной величины. Такая сложная структура морского дна является одной из ключевых черт, определяющих природные условия этого арктического моря.

Карское море богато островами. Среди наиболее крупных выделяются Белый, Сибирякова, Русский, Визе, Шокальского, Шмидта, Олений и Ушакова. Острова Ушакова и Шмидта покрыты ледниками, которые спускаются прямо к морю. В восточной части моря разбросано множество мелких островов, часто образующих архипелаги, такие как Известий ЦИК, Арктического Института, Сергея Кирова и Норденшельда.

Береговая линия Карского моря сильно изрезана и формирует крупные заливы, такие как Пясинский и Енисейский, а также Байдарацкую, Обскую и Гыданскую губы, и многочисленные фьорды. Берега Ямала и Гыданского полуострова преимущественно низкие и равнинные, в то время как побережье Таймыра в основном высокое и скалистое.

Анализ особенностей рельефа дна Карского моря и окружающего море рельефа позволяет сделать следующие выводы:

- относительно небольшая глубина Карского моря и большое количество островов и архипелагов в его акватории способствует достаточно быстрому установлению ледового покрова;
- расположение архипелага Новая Земля препятствует распространению теплых вод Нордкапского течения в акваторию моря.

1.3. Гидрологический режим Карского моря

Речной сток играет ключевую роль в формировании гидрологического режима Карского моря, составляя примерно 55% от общего стока рек сибирской Арктики, таких как Енисей, Обь, Таз, Пур и другие [3]. Однако, основными поставщиками пресной воды в Карское море являются реки Обь и Енисей, на долю которых приходится 75-80% от общего объема. Данные о годовом стоке всех упомянутых рек можно найти в Таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Среднегодовой сток рек, впадающих в Карское море.

Река	Объем годового стока, км³	Расход, м³ /сек
Енисей	600	18 500
Обь	450	14 000
Пур	86	1400
Таз	86	1400
Пясина	80	2800
Надым	18	600

Годовой речной сток в Карское море характеризуется крайней неравномерностью. Основная масса речной воды (около 80%) поступает в море в тёплое время года, с пиком в июне. Этот приток пресной воды формирует на поверхности моря слой с пониженной солёностью, который

затрудняет вертикальное перемешивание воды и способствует образованию льда.

В феврале температура поверхностных вод близка к точке замерзания, которая варьируется в зависимости от солёности: от $-1,3^{\circ}\text{C}$ на юге до $-1,8^{\circ}\text{C}$ на севере. В неглубоких районах температура воды практически одинакова по всей глубине. Однако, в глубоководных желобах Св. Анны и Воронина на глубинах 150-200 м наблюдаются относительно тёплые воды с температурой $1,5$ и $2,5^{\circ}\text{C}$.

Летом поверхностные воды значительно опресняются за счет речного стока и таяния льда. В зоне дрейфующих льдов температура воды на протяжении всего лета лишь незначительно превышает точку замерзания. В районах, свободных ото льда, вода прогревается до 6°C в юго-западной части моря и до 2°C в северной. Глубина прогретого слоя достигает 60-70 м на юго-западе и 10-15 м на востоке.

Температура поверхностных вод Карского моря подвержена значительным сезонным изменениям, демонстрируя чёткий годовой цикл (рисунок 1.4). Средняя температура воды на поверхности колеблется от $-1,5^{\circ}\text{C}$ в холодное время года до $+5^{\circ}\text{C}$ в летние месяцы.

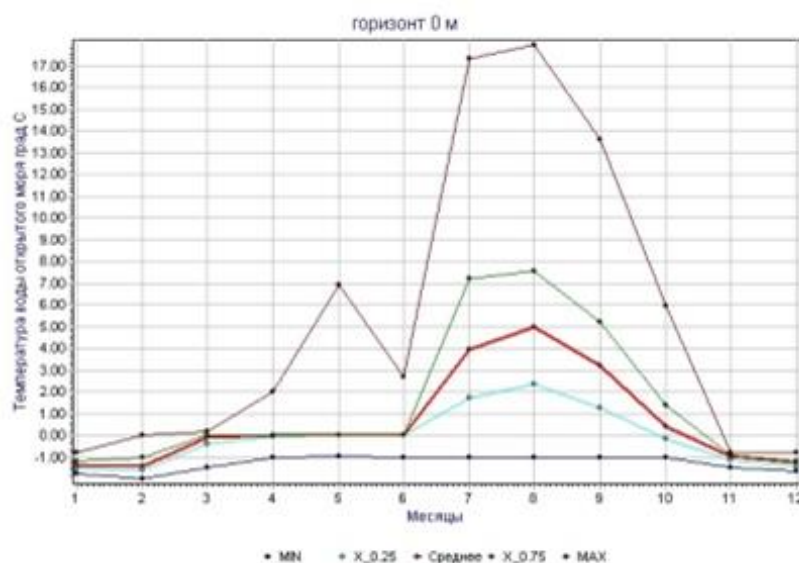


Рисунок 1.4 – Годовой ход средних и экстремальных значений температуры воды на поверхности Карского моря

Распределение солености в Карском море сильно зависит от времени года. Зимой и осенью, вдали от берегов, соленость поверхностных вод колеблется в районе 25-30 промилле, а в прибрежных районах - 15-20 промилле. В феврале наблюдается снижение солености с северо-запада (от Новой Земли) к юго-востоку (к острову Диксон). Аналогичная тенденция, но с севера на юг (от Земли Франца Иосифа к острову Диксон), наблюдается и в августе. Летом, под влиянием таяния льдов и речного стока, прибрежные воды становятся практически пресными, с соленостью всего 5-10 промилле.



Рисунок 1.5 – Распределение солености поверхностных вод Карского моря

Приливная динамика Карского моря характеризуется преобладанием правильных полусуточных приливов, с локальными проявлениями суточных и смешанных типов. Амплитуда приливов относительно невелика, варьируясь от 0,5 до 0,8 метра, с увеличением до более чем 1 метра в акватории Обской губы.

Начало ледообразования в Карском море фиксируется в сентябре. В период с октября по май наблюдается практически сплошной ледяной покров, покрывающий большую часть акватории. Первичное ледообразование происходит в прибрежных зонах, обусловленное более

интенсивным охлаждением поверхности суши. В северной части моря замерзание начинается среди остаточных ледовых массивов, с последующим распространением на участки открытой воды. В юго-западной части Карского моря, в Обь-Енисейском районе, начало ледообразования в среднем приходится на первую декаду октября, что связано с адвекцией ледяного покрова из северо-восточной части моря.

Зимой у берегов, в заливах и губах Карского моря формируется неподвижный лед, называемый припаем. За припаем располагаются дрейфующие ледяные поля, достигающие толщины 1,5-2 метра к концу зимы при обычных погодных условиях. Между припаем и дрейфующим льдом часто возникают заприпайные полыньи, среди которых выделяются постоянные: Амдерминская, Ямальская и Обь-Енисейская.

В юго-западной части Карского моря лед начинает таять обычно в конце мая. В процессе таяния он раскалывается на большие дрейфующие поля и постепенно разрушается. К середине июля прибрежные воды Ямала и район Обь-Енисея освобождаются ото льда. К концу июля примерно половина юго-западной части моря очищается от льда под воздействием тепла и движения воды. К концу августа - началу сентября большая часть этой области обычно полностью свободна ото льда. В северо-восточной части моря таяние льда происходит медленнее, и к концу августа от льда очищается в среднем около 60% акватории.

В Карском море существует устойчивая система течений: в юго-западной части моря преобладает циклоническое круговое течение, а в южных, центральных и северных районах течения имеют разные направления (см. рисунок 1.6). Скорость течений обычно небольшая, но может значительно увеличиваться при продолжительных и сильных ветрах.

Дополнительный вклад в циркуляцию вносит Обь-Енисейское течение, сформированное речным стоком Оби и Енисея. Оно усиливает перенос воды в северном направлении. В районе островов Арктического института Обь-Енисейское течение также разделяется. Одна ветвь направляется на север, а другая, огибая полуостров Таймыр, образует Западно-Таймырское течение. Скорость Ямальского и Обь-Енисейского течений в среднем составляет 2-5 см/с.

1.4. Синоптические особенности Карского моря.

В зимний период Карское море находится под воздействием трех главных атмосферных центров: Сибирского максимума, Полярного максимума и Исландского минимума. Над северо-восточной частью Азии фиксируется сибирский антициклон, в результате чего воздушные массы направляются с материка на море [4, 5].

С усилением Полярного максимума область низкого давления растягивается над южной частью Карского моря от юго-запада к северо-востоку, образуя восточную ложбину Исландского минимума. Этот минимум связан с основными маршрутами циклонических систем, проходящих над Карским морем. Циклоны приносят резкие изменения погоды: увеличивается облачность, повышается температура воздуха и усиливается ветер. На большей части моря дуют ветры с южных, юго-восточных и юго-западных направлений, в то время как на северо-востоке могут встречаться ветры с северных направлений. Средняя скорость ветра составляет около 7-8 м/с, и нередко он достигает штормового уровня. Также из-за Исландского минимума усиливается западный перенос, способствующий поступлению относительно теплого и влажного воздуха с Атлантики.

Весной Сибирский максимум ослабевает, ложбина Исландского минимума продолжает уменьшаться, а Полярный максимум смещается на

север. В этих условиях циклоническая активность над Карским морем становится менее выраженной, ветер становится неустойчивым и менее сильным, хотя иногда случаются штормы, особенно в западной части моря.

Летний период характеризуется формированием зоны повышенного давления над морем, что приводит к преобладанию ветров северного и северо-западного направлений на большей части акватории Карского моря.

1.5. Климатические особенности Карского моря.

Карское море, находящееся в арктической зоне, отличается экстремальными климатическими условиями. Короткое лето приносит лишь небольшое потепление, сменяясь долгой и ледяной зимой. Расположение за Полярным кругом приводит к тому, что на протяжении нескольких месяцев (3-4) солнце не показывается над горизонтом (полярная ночь), а затем на 2-3 месяца устанавливается полярный день.

На температурный режим Карского моря оказывает непосредственное влияние холодный Северный Ледовитый океан с севера и Азиатский материк с юга, который сильно выхолаживается в зимнее время года. Архипелаг Новая Земля служит барьером для поступления теплых атлантических вод, однако часть теплых вод все равно поступают с севера, а также через проливы Югорский Шар и Карские ворота, что несколько смягчается климат. Кроме того, летом и осенью обогревающее воздействие оказывают реки Обь и Енисей, выносящие в море огромное количество относительно теплой воды.

Температура воздуха на севере акватории остается ниже 0 °C в течение 9-10 месяцев в году, в то время как на юге этот период составляет 7-8 месяцев. В феврале средняя температура варьируется от –18 °C у берегов Новой Земли до –26 °C у побережья Северной Земли. Зафиксированный абсолютный минимум составляет –52 °C на мысе Челюскин.

Весной, благодаря близости полярного дня, солнечный свет становится более частым, однако из-за отражения радиации от льда и её рассеивания значительного повышения температуры воздуха не наблюдается. В мае средняя температура воздуха примерно -7°C на западе и -8°C на востоке моря. В августе средняя температура колеблется от 0°C на севере до $+6^{\circ}\text{C}$ на юге, при этом абсолютный максимум $+22^{\circ}\text{C}$ был зарегистрирован на юго-западном побережье. Зимой часто случаются штормовые ветры, метели и пурги, а летом наблюдаются снежные налипы и туманы.

Циркуляция атмосферы и соответствующее сезонное распределение барических полей играют важную роль в формировании климата Карского моря. Многолетний режим облачности зависит от циркуляционных процессов, определяющих направление воздушных масс и их содержание влаги, а также от характеристик подстилающей поверхности. Облачность в Карском море демонстрирует выраженные сезонные колебания, достигая максимальных значений летом и минимальных зимой. Средняя облачность в январе составляет 50-60%, тогда как с июня по октябрь она увеличивается до 80-90%. С декабря по март в северо-восточной части моря в среднем наблюдается 5-8 ясных дней, а в юго-восточной – 3-5. Летом же ясные дни в среднем бывают лишь 1-3 за месяц.

Относительная влажность воздуха, отражающая уровень насыщения воздуха водяным паром, в Карском море высокая в течение всего года, достигая максимальных значений (85–95%) летом. Большая влажность сопровождается высокой частотой осадков в течение всех сезонов, однако годовое количество осадков невелико — от 250 мм на севере до 400 мм на юго-западе. Структура осадков варьируется в зависимости от сезона: зимой осадки чаще возникают в твердом виде, а летом, с вероятностью 12%, — в жидком.

Ветер в районе Карского моря имеет ярко выраженный муссонный характер. Зимой преобладают южные ветры; на юго-западе это в основном юго-западные ветры, на юге — южные, а на севере и северо-востоке —

южные и юго-восточные. Вдоль берегов архипелага Новая Земля при подходящих условиях формируется местный ураганный ветер, известный как новоземельская бора, который может продолжаться от нескольких часов до 2-3 суток. Летом барическое поле меняется, и начинают преобладать северные и северо-западные ветры.

Рельеф значительно влияет на распределение скорости ветра, и в течение всего года наблюдается его усиление в проливах, а также в Енисейском заливе, Байдарацкой и Обской губах, и вблизи мысов.

В целом погода в Карском море отличается неустойчивостью и резкими изменениями температуры.

2.1 Выбор пунктов наблюдений

Для детального анализа климатических изменений температуры воздуха и режима осадков над просторами Карского моря, были отобраны ключевые метеорологические станции, призванные репрезентовать разнообразие его климатических зон. Выбор пал на шесть станций, чье расположение наглядно отображено на рисунке 2.1. Эти наблюдательные пункты были стратегически расположены таким образом, чтобы охватить значительную часть акватории Карского моря и максимально полно отразить климатическую картину в различных его уголках. Единственным исключением является станция Известий ЦИК, уютно расположившаяся в самом сердце Карского моря.



Рисунок 2.1 – Расположение метеорологических станций в Карском море

Таблица 2.1 – Название и координат выбранных станций в Карском море.

Название	Индекс	Кол-во лет		Координаты	
		Т°	осадки	Широта	Долгота
Амдерма	23022	91	89	69°47	61°39
им. Попова	20667	92	91	73°19	70°3
Остров Визе	20069	80	71	79°29	76°58
им. Ушакова	20087	95	73	79°33	90°34
Известий ЦИК	20471	72	52	75°57	82°56
Стерлегово	20476	91	52	75°24	88°54

База данных многолетних температур воздуха и количество осадков сформирована по данным источника [6, 7].

2.2 Оценивание качества исходных данных.

Прежде чем определять расчетные климатические характеристики нужно оценить качество исходной информации. Для начала следует провести оценивание однородности выборки [8], чтобы все элементы относились к одной и той же генеральной совокупности, а так же однородности по времени основных выборочных параметров: среднего значения и дисперсии.

Причины нарушения однородности могут быть методические, такие как:

- перенос пункта наблюдений в другое место;
- замена типа и вида измерительных приборов;
- ошибка в производстве наблюдений;
- изменение сроков проведения метеорологических наблюдений.

Так же нарушения однородности могут быть естественными, например, падение уровня моря, изменение рельефа, гидрографии, ландшафта и т.п.

Статистические методы оценки однородности и стационарности основаны на статистических критериях, которые при сравнении расчетных значений с критическими позволяют принять или отклонить нулевую гипотезу однородности или стационарности.

В гидрометеорологии различают два вида однородности:

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

Для оценивания статистической значимости однородности применяются критерии резко отклоняющихся экстремальных значений в эмпирическом распределении: статистические критерии Диксона и Смирнова-Граббса.

Статистики критериев Диксона позволяют оценить до трех экстремумов, отклоняющихся от эмпирического распределения. Статистики Диксона рассчитываются по формулам [8]:

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;

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 [8]:

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

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 [8]:

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

Расчетные значения статистик критериев Диксона и Смирнова-Граббса сравниваются с их критическими табличными значениями [8], 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 $\alpha \geq 5 \%$.

Особенность критериев тестирования однородности Диксона и Смионова-Граббса заключается в том, что они были разработаны для условий нормального симметричного распределения выборки и отсутствия автокорреляции. Однако отличительной чертой образцов гидрометеорологических данных является то, что их эмпирические распределения часто асимметричны. Критические табличные значения используются для учета эффектов асимметрии и автокорреляции. В целом, для критериев оценки однородности асимметрия увеличивает критические значения, в то время как автокорреляция уменьшает их.

Для дальнейшего проверки качества климатических рядов оценим стационарность дисперсии и среднее значение. Используем критерий Фишера и Стьюдента. Сформированный временный ряд делится на две неравные подвыборки, при этом по моменту нарушения однородности ряда. По каждой подвыборке вычисляются значения средних ($Y_{срj}, j = 1, 2$) и дисперсий ($\sigma_j, j = 1, 2$), которые используются для получения расчетных значений статистик 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 с использованием критерия Стьюдента проводится путем сравнения вычислительного и критического значений статистики: если вычислительное значение меньше критического значения на заданном уровне значимости, гипотеза о стационарности принимается.

2.3 Оценка однородности и стационарности среднемесячных температур воздуха.

Для анализа однородности эмпирических распределений среднемесячных температур была использована методика, описанная в п. 2.2.

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

На рисунке 2.2 представлен график среднемесячных температур января и июля для станции Амдерма. Из анализа графика январь можно сделать вывод, что абсолютный минимум наблюдался в 1999 году и составил $-27,3^\circ\text{C}$, а абсолютный максимум в 1937 году и составил $-8,2^\circ\text{C}$. Так же на

графике можно заметить резкие перепады, но в большинстве случаев температура наблюдается от -15 до -25°C .

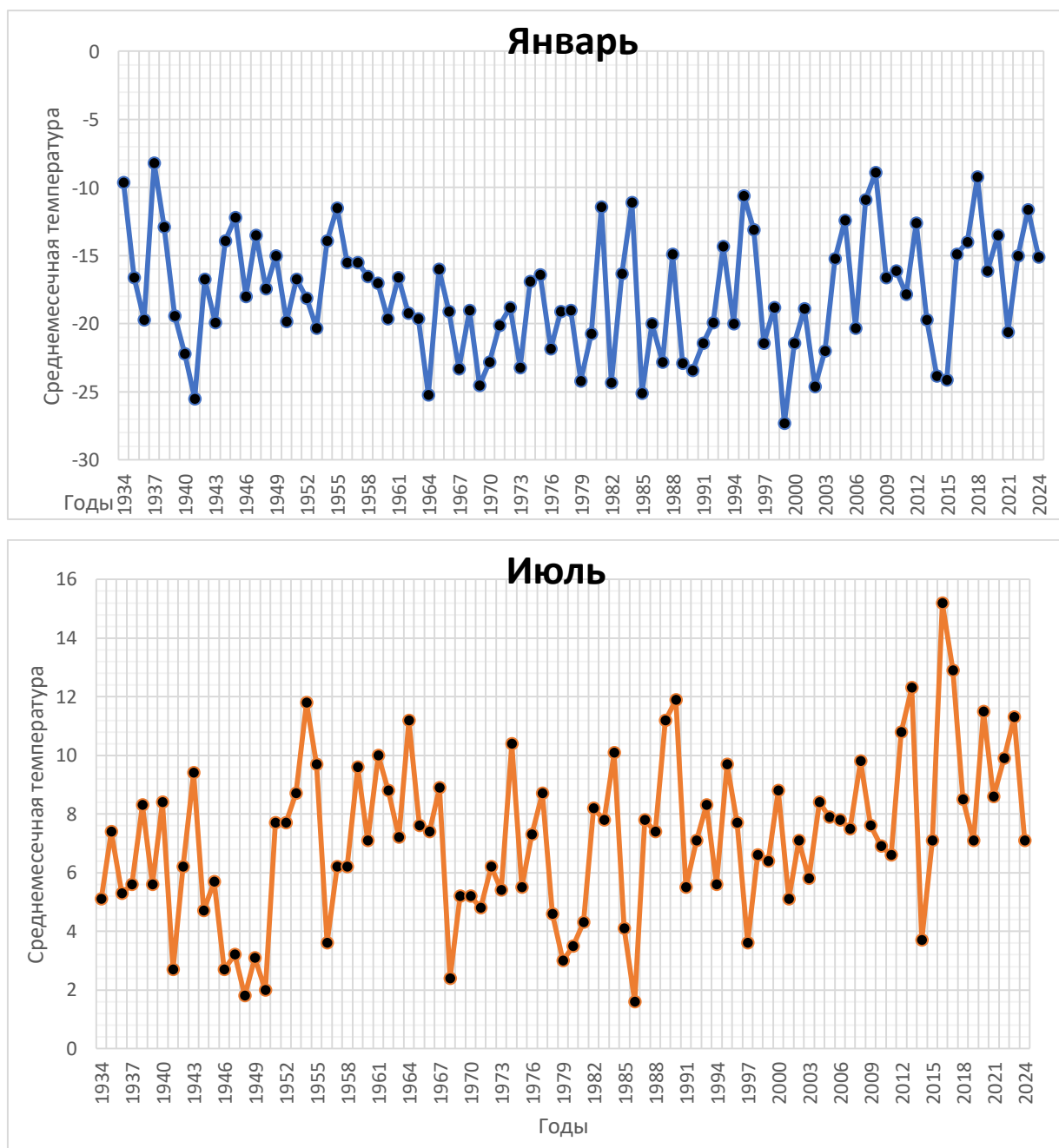


Рисунок 2.2 – Хронологический график среднемесечных температур января и июля для станции Амдерма

Визуальный анализ графика июль показал, что в 2016 г. наблюдался резко выраженный максимум, который составляет $15,2^{\circ}\text{C}$, а в 1986 году выраженный минимум равный $1,6^{\circ}\text{C}$.

На графике 2.3 изображена хронология среднемесячных температур января и июля на станции им. Попова. На графике январь минимум наблюдался в 1979 году и составил $-31,3^{\circ}\text{C}$, а максимум в 1937 году и равен $-11,1^{\circ}\text{C}$. Визуально можно отметить, что в большинстве случаев температура наблюдается от -20 до -30°C .

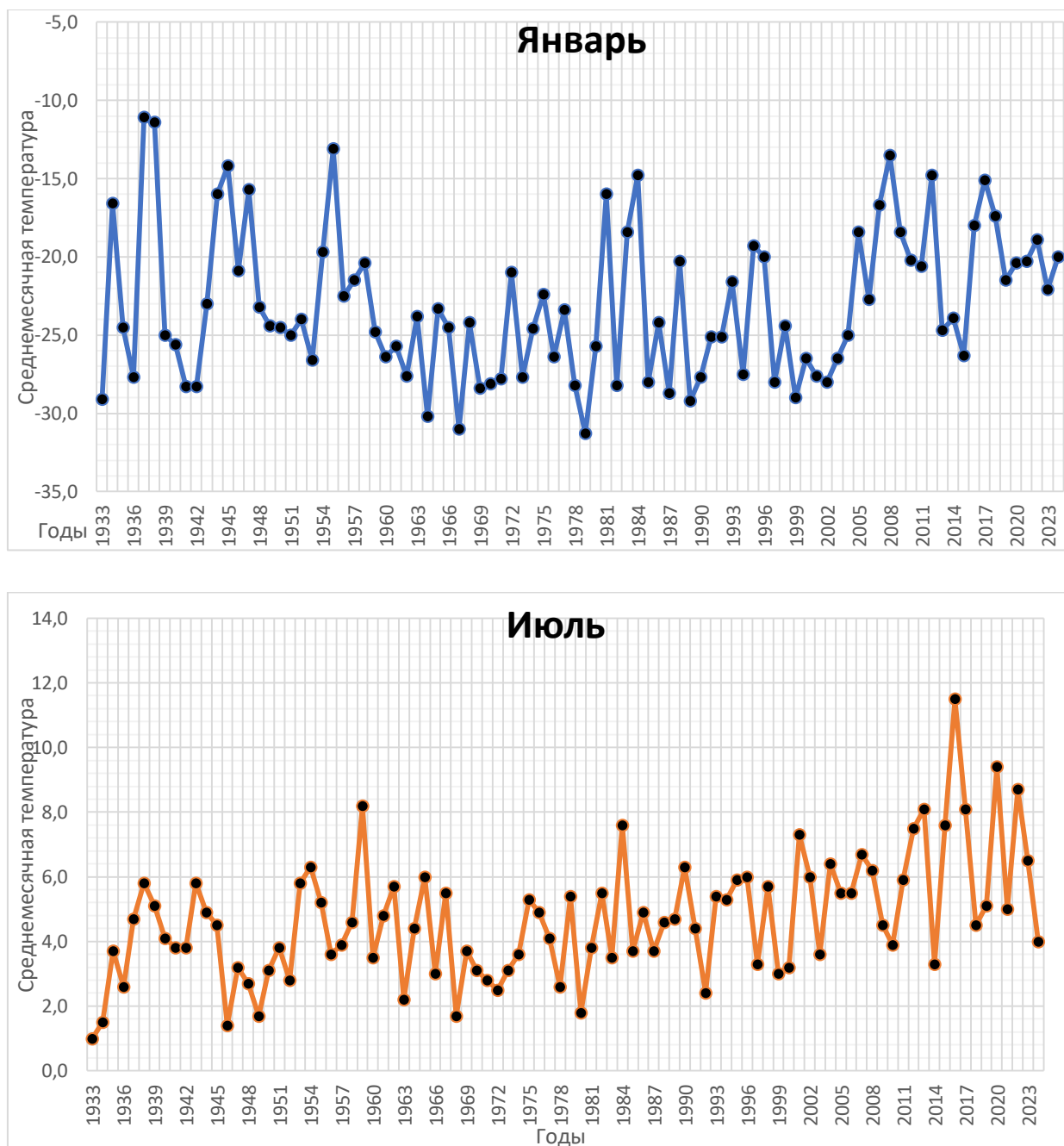


Рисунок 2.3 – Хронологический график среднемесячных температур января и июля для станции им. Попова.

Судя по графику июль визуально можно отметить тенденцию к потеплению после 2000 года. В 2016 году выделяется резкий максимум равный $11,5^{\circ}\text{C}$, минимум наблюдался в 1933 году и составил $1,0^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 2.4 изображен график хронологии среднемесячных температур января и июля на станции о. Визе. По графику январь наблюдается тенденция потепления после 2004 года. В 2016 году выделяется максимум равный $-10,1^{\circ}\text{C}$, минимум наблюдался в 1964 году и равен $-37,1^{\circ}\text{C}$. На графике июль в 2016 году выделяется максимум равный $2,4^{\circ}\text{C}$, минимум наблюдался в 1982 году и равен $-0,4^{\circ}\text{C}$.

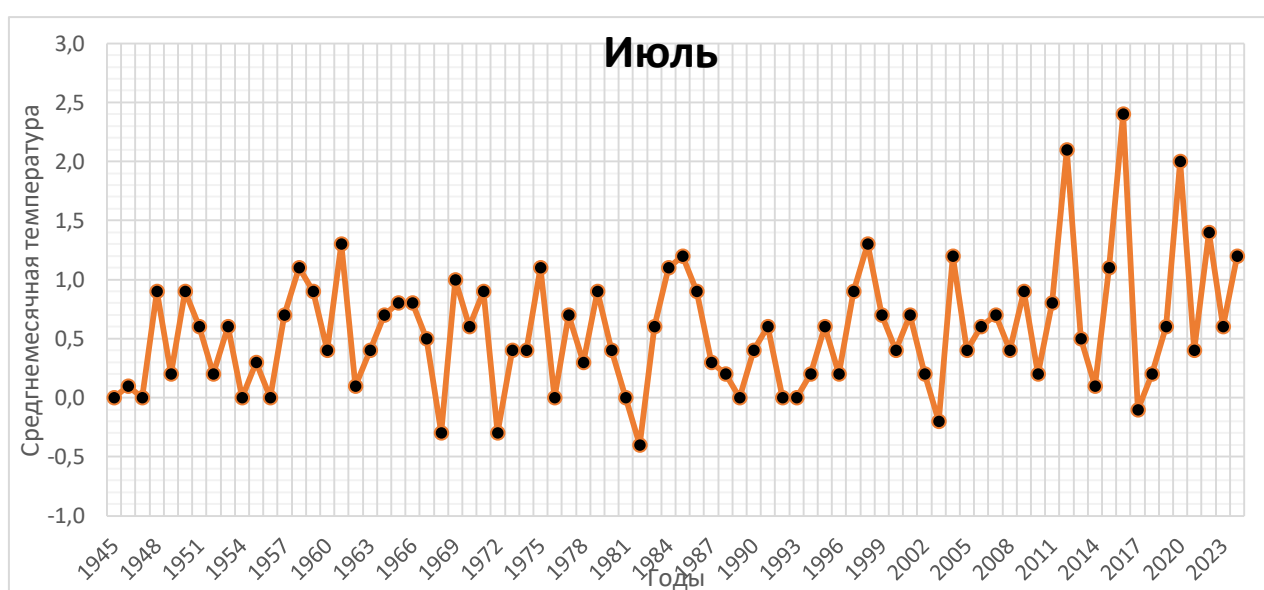


Рисунок 2.4 – Хронологический график среднемесячных температур января и июля для станции о. Визе.

На графике 2.5 изображена хронология среднемесячных температур января на станции им. Ушакова за период с 1930 – 2024 года. Абсолютный максимум наблюдался в 2017 году и составил $-16,6^{\circ}\text{C}$, а минимум – в 1964 г. и составил $-36,2^{\circ}\text{C}$. Так же можно отметить резки скачек температуры в 2005 году, после которого заметна тенденция потепления.

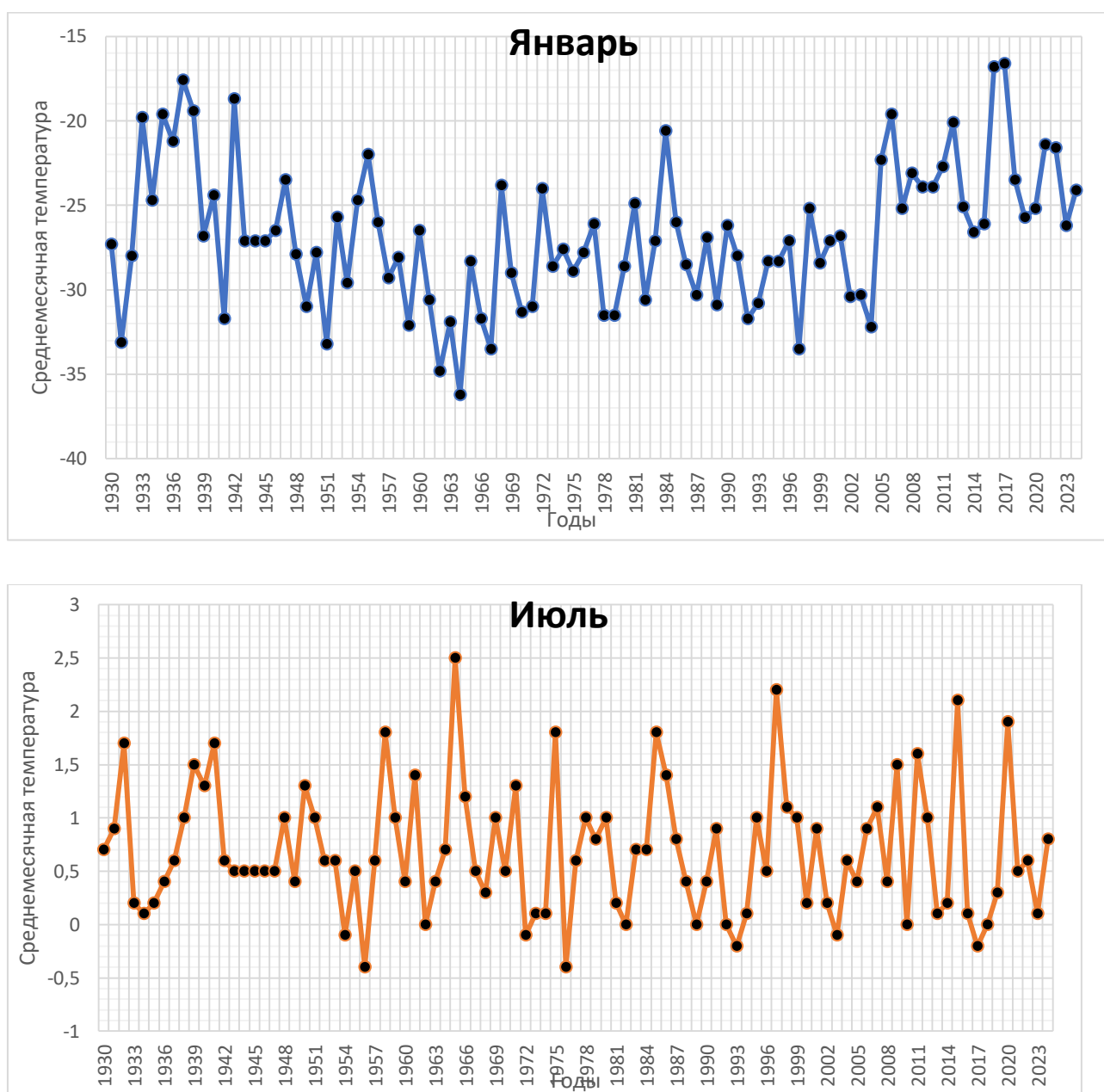


Рисунок 2.5 – Хронологический график среднемесячных температур января и июля для станции им. Ушакова.

На станции им. Ушакова за период с 1930 – 2024 гг. в июле абсолютный максимум наблюдался в 1965 году и составил $2,5^{\circ}\text{C}$, а минимум в 1956 и 1976 году и равен $0,4^{\circ}\text{C}$. (рисунок 2.5)

На станции Известий ЦИК за период с 1953-2024 г. в январе абсолютный максимум наблюдался в 2016 году и составил $-14,1^{\circ}\text{C}$, а минимум в 1967 году и равен $-32,6^{\circ}\text{C}$. (рисунок 2.6). Визуально можно отметить, что в большинстве случаев температура наблюдается от -20 до -30°C .

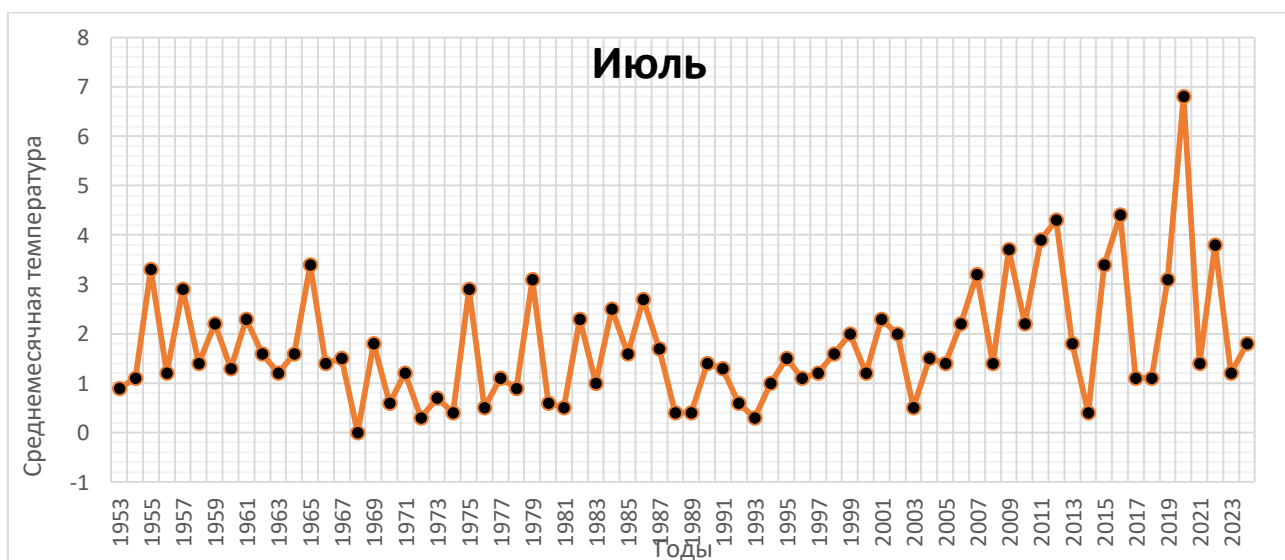
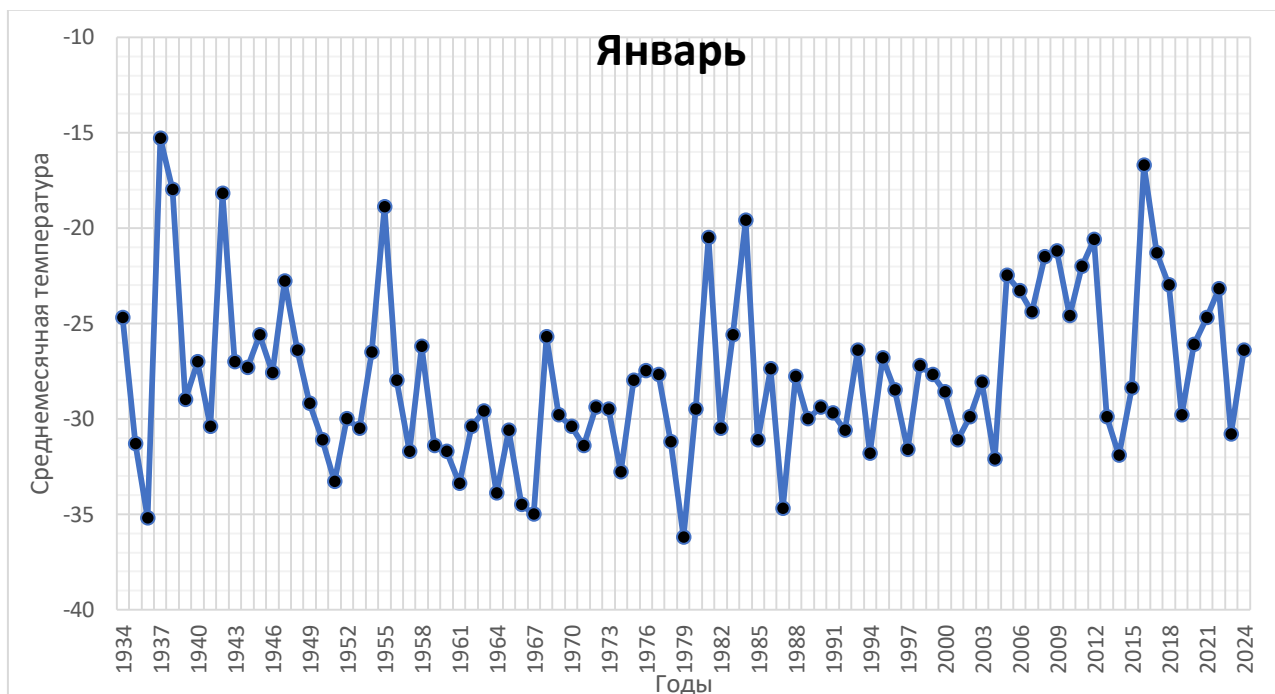


Рисунок 2.6 – Хронологический график среднемесячных температур января и июля для станции Известий ЦИК.

На графике июль за период с 1953-2024 года максимум наблюдался в 2020 году и составил $6,8^{\circ}\text{C}$, а минимум в 1968 году и равен 0°C . (рисунок 2.6). Визуально можно отметить, что в большинстве случаев температура наблюдается от 0 до 3°C . Наблюдается тенденция потепления после 2005 года.

На графике 2.7 изображена хронология среднемесячных температур января и июля на станции Стерлегово с 1934-2024 гг.. Исходя их графика январь максимум наблюдается 1937 году равный $-15,3^{\circ}\text{C}$, минимум наблюдался в 1979 году и составил $36,2^{\circ}\text{C}$. На графике июль (рисунок 2.7) максимум наблюдается 1965 году равный $7,8^{\circ}\text{C}$, минимум наблюдался в 1993 году и составил 0°C .



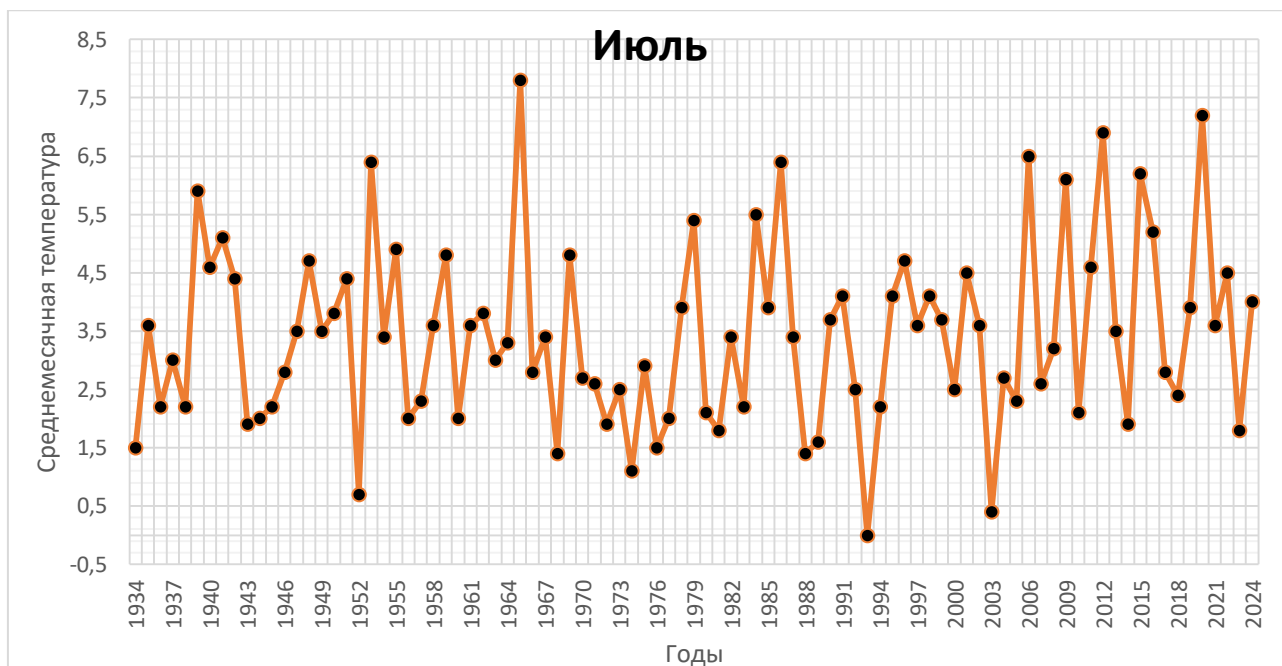


Рисунок 2.7 – Хронологический график средних месячных температур января и июля для станции Стерлегово.

Следующим этапом работы были произведены расчеты статистик по критериям Диксона и Смирнова-Граббса по формулам (2.1)-(2.12).

Таблица 2.2 – Результаты оценивания однородности эмпирического распределения средних месячных температур станции Амдерма

Месяц	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
январь	max	Диксон 1	0,03	0,20	однороден
	max	Диксон 2	0,03	0,21	однороден
	max	Диксон 3	0,11	0,26	однороден
	max	Диксон 4	0,13	0,27	однороден
	max	Диксон 5	0,11	0,25	однороден
	max	Смирнов-Граббс	2,26	3,30	однороден

Таблица 2.2 (продолжение) – Результаты оценивания однородности
эмпирического распределения среднемесячных температур

для станции Амдерма

Месяц	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
январь	min	Диксон 1	0,09	0,14	однороден
	min	Диксон 2	0,10	0,15	однороден
	min	Диксон 3	0,11	0,19	однороден
	min	Диксон 4	0,12	0,20	однороден
	min	Диксон 5	0,11	0,18	однороден
	min	Смирнов-Граббс	2,15	2,84	однороден
июль	max	Диксон 1	0,17	0,21	однороден
	max	Диксон 2	0,17	0,22	однороден
	max	Диксон 3	0,22	0,27	однороден
	max	Диксон 4	0,22	0,28	однороден
	max	Диксон 5	0,21	0,26	однороден
	max	Смирнов-Граббс	2,95	3,39	однороден
	min	Диксон 1	0,01	0,13	однороден
	min	Диксон 2	0,02	0,14	однороден
	min	Диксон 3	0,04	0,18	однороден
	min	Диксон 4	0,04	0,19	однороден
	min	Диксон 5	0,03	0,17	однороден

Таблица 2.2 (продолжение) – Результаты оценивания однородности
эмпирического распределения среднемесячных температур

для станции Амдерма

Месяц	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
июль	min	Смирнов-Граббс	2,03	2,68	однороден

Из анализа данных, представленных в таблице 2.2, следует сделать вывод, что временной ряд среднемесячных температур за январь и июль на станции Амдерма за рассматриваемый период является однородным. Включая минимумы и максимумы за весь период.

Таблица 2.3 – Результаты оценивания однородности эмпирического
распределения среднемесячных температур для станции им. Попова.

Месяц	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
январь	max	Диксон 1	0,01	0,25	однороден
	max	Диксон 2	0,02	0,27	однороден
	max	Диксон 3	0,10	0,32	однороден
	max	Диксон 4	0,10	0,32	однороден
	max	Диксон 5	0,10	0,31	однороден
	max	Смирнов-Граббс	2,51	3,86	однороден
	min	Диксон 1	0,01	0,08	однороден
	min	Диксон 2	0,02	0,09	однороден
	min	Диксон 3	0,06	0,12	однороден

Таблица 2.3 (продолжение) – Результаты оценивания однородности
эмпирического распределения среднемесячных температур

для станции им. Попова

Месяц	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
январь	min	Диксон 4	0,06	0,12	однороден
	min	Диксон 5	0,05	0,11	однороден
	min	Смирнов-Граббс	1,73	2,11	однороден
июль	max	Диксон 1	0,20	0,27	однороден
	max	Диксон 2	0,21	0,29	однороден
	max	Диксон 3	0,28	0,34	однороден
	max	Диксон 4	0,28	0,34	однороден
	max	Диксон 5	0,27	0,33	однороден
	max	Смирнов-Граббс	3,62	4,05	однороден
	min	Диксон 1	0,04	0,08	однороден
	min	Диксон 2	0,05	0,09	однороден
	min	Диксон 3	0,06	0,12	однороден
	min	Диксон 4	0,06	0,12	однороден
	min	Диксон 5	0,05	0,11	однороден
	min	Смирнов-Граббс	1,95	2,12	однороден

По результатам расчета статистик по критериям Диксона и Смирнова-Граббса, представленных в таблице 2.3, следует сделать вывод, что временной ряд среднемесячных температур за январь и июль на станции им. Попова за рассматриваемый период является однородным, включая минимумы и максимумы за весь период.

Таблица 2.4 – Результаты оценивания однородности эмпирического распределения среднемесячных температур для станции о. Визе.

Месяц	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
январь	max	Диксон 1	0,04	0,26	однороден
	max	Диксон 2	0,05	0,28	однороден
	max	Диксон 3	0,08	0,34	однороден
	max	Диксон 4	0,09	0,34	однороден
	max	Диксон 5	0,07	0,33	однороден
	max	Смирнов-Граббс	2,87	3,80	однороден
	min	Диксон 1	0,13	0,07	Не однороден
	min	Диксон 2	0,13	0,08	Не однороден
	min	Диксон 3	0,19	0,10	Не однороден
	min	Диксон 4	0,19	0,11	Не однороден
	min	Диксон 5	0,18	0,09	Не однороден
	min	Смирнов-Граббс	2,43	1,97	Не однороден

Таблица 2.4 (продолжение) – Результаты оценивания однородности
эмпирического распределения среднемесячных температур

для станции о. Визе

Месяц	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
июль	max	Диксон 1	0,11	0,30	однороден
	max	Диксон 2	0,11	0,32	однороден
	max	Диксон 3	0,15	0,38	однороден
	max	Диксон 4	0,15	0,38	однороден
	max	Диксон 5	0,14	0,37	однороден
	max	Смирнов-Граббс	3,49	4,20	однороден
	min	Диксон 1	0,04	0,11	однороден
	min	Диксон 2	0,04	0,13	однороден
	min	Диксон 3	0,08	0,16	однороден
	min	Диксон 4	0,08	0,17	однороден
	min	Диксон 5	0,07	0,15	однороден
	min	Смирнов-Граббс	1,84	2,39	однороден

В таблице 2.4 результат расчета статистик по критериям Диксона и Смирнова-Граббса. Исходя из расчетов следует, что временной ряд среднемесячных температур июля на станции о. Визе за рассматриваемый

период является однородным, а за январь только по максимальным экстремумам, по минимальным экстремумам неоднороден.

Таблица 2.5 – Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячных температур для станции им. Ушакова.

Месяц	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
январь	max	Диксон 1	0,01	0,22	однороден
	max	Диксон 2	0,01	0,23	однороден
	max	Диксон 3	0,05	0,28	однороден
	max	Диксон 4	0,06	0,28	однороден
	max	Диксон 5	0,05	0,27	однороден
	max	Смирнов-Граббс	2,44	3,53	однороден
	min	Диксон 1	0,07	0,11	однороден
	min	Диксон 2	0,07	0,12	однороден
	min	Диксон 3	0,14	0,16	однороден
	min	Диксон 4	0,15	0,17	однороден
	min	Диксон 5	0,14	0,15	однороден
	min	Смирнов-Граббс	2,26	2,55	однороден
июль	max	Диксон 1	0,10	0,28	однороден
	max	Диксон 2	0,12	0,29	однороден
	max	Диксон 3	0,15	0,34	однороден

	max	Диксон 4	0,15	0,35	однороден
	max	Диксон 5	0,14	0,34	однороден

Таблица 2.5 (продолжение) – Результаты оценивания однородности
эмпирического распределения среднемесячных температур
для станции им. Ушакова

Месяц	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
июль	max	Смирнов-Граббс	2,99	4,15	однороден
	min	Диксон 1	0,07	0,10	однороден
	min	Диксон 2	0,08	0,11	однороден
	min	Диксон 3	0,12	0,15	однороден
	min	Диксон 4	0,12	0,15	однороден
	min	Диксон 5	0,10	0,14	однороден
	min	Смирнов-Граббс	1,78	2,37	однороден

В таблице 2.5 произведены расчеты статистик по критериям Диксона и Смирнова-Граббса для станции им. Ушакова. Из ее анализа следует, что временной ряд однороден для всех месяцев и экстремумов.

Таблица 2.6 – Результаты оценивания однородности эмпирического
распределения среднемесячных температур для станции Известий ЦИК

Месяц	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
январь	max	Диксон 1	0,10	0,28	однороден

	max	Диксон 2	0,10	0,29	однороден
	max	Диксон 3	0,12	0,36	однороден

Таблица 2.6 (продолжение) – Результаты оценивания однородности
эмпирического распределения среднемесячных температур

для станции Известий ЦИК

Месяц	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
январь	max	Диксон 4	0,12	0,35	однороден
	max	Диксон 5	0,12	0,34	однороден
	max	Смирнов-Граббс	2,53	3,84	однороден
	min	Диксон 1	0,01	0,08	однороден
	min	Диксон 2	0,01	0,09	однороден
	min	Диксон 3	0,05	0,11	однороден
	min	Диксон 4	0,05	0,12	однороден
	min	Диксон 5	0,04	0,10	однороден
	min	Смирнов-Граббс	1,82	2,01	однороден
июль	max	Диксон 1	0,35	0,39	однороден
	max	Диксон 2	0,37	0,39	однороден
	max	Диксон 3	0,38	0,47	однороден
	max	Диксон 4	0,39	0,47	однороден
	max	Диксон 5	0,37	0,47	однороден

	max	Смирнов-Граббс	4,18	4,74	однороден
	min	Диксон 1	0,04	0,06	однороден
	min	Диксон 2	0,07	0,07	однороден

Таблица 2.6 (продолжение) – Результаты оценивания однородности эмпирического распределения среднемесячных температур

для станции Известий ЦИК

Месяц	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
июль	min	Диксон 3	0,090	0,087	Не однороден
	min	Диксон 4	0,09	0,10	однороден
	min	Диксон 5	0,06	0,08	однороден
	min	Смирнов-Граббс	1,46	1,83	однороден

В таблице 2.6 произведены расчеты статистик по критериям Диксона и Смирнова-Граббса для станции Известий ЦИК. Из анализа следует, что временной ряд однороден, за исключением месяца июля с минимальным экстремумом Диксон 3 который является неоднородным.

Таблица 2.7 – Результаты оценивания однородности эмпирического распределения среднемесячных температур для станции Стерлегово

Месяц	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
январь	max	Диксон 1	0,07	0,27	однороден

	max	Диксон 2	0,07	0,29	однороден
	max	Диксон 3	0,14	0,34	однороден
	max	Диксон 4	0,14	0,34	однороден

Таблица 2.7 (продолжение) – Результаты оценивания однородности
эмпирического распределения среднемесячных температур

для станции Стерлегово

Месяц	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
январь	max	Диксон 5	0,13	0,33	однороден
	max	Смирнов-Граббс	2,84	4,04	однороден
	min	Диксон 1	0,05	0,08	однороден
	min	Диксон 2	0,05	0,10	однороден
	min	Диксон 3	0,06	0,12	однороден
	min	Диксон 4	0,07	0,13	однороден
	min	Диксон 5	0,06	0,11	однороден
	min	Смирнов-Граббс	1,91	2,15	однороден
июль	max	Диксон 1	0,08	0,26	однороден
	max	Диксон 2	0,08	0,27	однороден
	max	Диксон 3	0,12	0,32	однороден
	max	Диксон 4	0,13	0,33	однороден

	max	Диксон 5	0,12	0,31	однороден
	max	Смирнов-Граббс	2,79	3,84	однороден
	min	Диксон 1	0,05	0,11	однороден
	min	Диксон 2	0,06	0,12	однороден

Таблица 2.7 (продолжение) – Результаты оценивания однородности
эмпирического распределения среднемесячных температур
для станции Стерлегово

Месяц	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
июль	min	Диксон 3	0,10	0,15	однороден
	min	Диксон 4	0,10	0,16	однороден
	min	Диксон 5	0,09	0,14	однороден
	min	Смирнов-Граббс	2,18	2,40	однороден

Произведены расчеты статистик по критериям Диксона и Смирнова-Граббса для станции Стерлегово. Из анализа таблицы 2.7 следует, что временной ряд однороден включая все экстремумы.

Далее определяем критические значения статистик Фишера и Стьюдента, описанные в п. 2.2. результаты этих расчетов и оценивание стационарности представлены в таблице 2.8 для всех выбранных станций и каждого месяца.

Таблица 2.8 – Оценки стационарности эмпирического распределения
среднемесячных температур января и июля для выбранных станций.

Станция	Месяц	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Амдерма	январь	Фишер	1,005431371	2,015089872	однороден
		Стьюдент	2,702756	2,364887	неоднороден

Таблица 2.8 (продолжение) – Оценки стационарности эмпирического
распределения среднемесячных температур января и июля для выбранных
станций.

Станция	Месяц	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Амдерма	июль	Фишер	1,583121	2,788576	однороден
		Стьюдент	3,880854	2,682855	неоднороден
Им. Попова	январь	Фишер	1,986698	2,320339	однороден
		Стьюдент	3,795922	2,60297	неоднороден
	июль	Фишер	1,797503	2,263229	однороден
		Стьюдент	5,503512	2,60297	неоднороден
О. Визе	январь	Фишер	1,38832	2,69462	однороден
		Стьюдент	6,8457	3,1654	неоднороден
	июль	Фишер	3,5189	3,0374	неоднороден
		Стьюдент	3,12469	1,9908	неоднороден

Им. Ушакова	январь	Фишер	1,7545	2,4097	однороден
		Стьюдент	5,126336	3,018872	неоднороден
	июль	Фишер	1,2398	1,7596	однороден
		Стьюдент	1,064	2,046	однороден
Известий ЦИК	январь	Фишер	1,056512	2,71042	однороден
		Стьюдент	5,771	3,012	неоднороден

Таблица 2.8 (продолжение) – Оценки стационарности эмпирического распределения среднемесячных температур января и июля для выбранных станций.

Станция	Месяц	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Известий ЦИК	июль	Фишер	3,64	3,11	неоднороден
		Стьюдент	4,35	2,17	неоднороден
Стерлегово	январь	Фишер	1,1	2,4	однороден
		Стьюдент	3,9	2,5	неоднороден
	июль	Фишер	1,4	2,1	однороден
		Стьюдент	2,3	2,0	неоднороден

Для определения расчетных и критических статистик Фишера и Стьюдента нужно разделить временной ряд на две неравные подвыборки по моменту нарушения однородности ряда.

На станции Амдерма временной ряд температур января был разбит: с 1934 по 2003 гг. и с 2004 по 2024 гг., а для июля с 1934 по 2011 гг. и с 2012 по 2024 гг.

Для станции им. Попова январь разбит: с 1933 по 2004 гг. и с 2005 по 2024 гг., а июль с 1933 по 2000 гг. и с 2001 по 2024 гг.

На следующей станции о. Визе временной ряд температур января разбит: с 1945 по 2004 гг. и с 2005 по 2024 гг., а для июля с 1945 по 2010 гг. и с 2011 по 2024 гг.

В свою очередь на станции им. Ушакова ряд января разбили: с 1930 по 2004 гг. и с 2005 по 2024 гг., а ряд июля с 1930 по 1971 гг. и с 1972 по 2024 гг.

На станции Известий ЦИК ряд января разбит: с 1953 по 2005 гг. и с 2006 по 2024 гг., а июля с 1953 по 2005 гг. и с 2006 по 2024 гг.

Для последней станции Стерлегово временной ряд января разбили: с 1934 по 2004 гг. и с 2005 по 2024 гг., а для июля с 1934 по 2005 гг. и с 2006 по 2024 гг.

По данным расчетам таблицы 2.8 следует, что для станций Амдерма, им. Попова, им. Ушакова, Стерлегово расчетные значения статистики критерия Фишера меньше его критического значений - это говорит, что критерий Фишера принят о гипотезе стационарности для каждого ряда. Для станций о. Визе и Известий ЦИК критерий Фишера стационарен только для ряда температур в январе, а в июле гипотеза стационарности не применяется. В свою очередь критерий Стьюдента однороден только на станции им. Ушакова за временной ряд температур июля, а для всех остальных станций и временных рядов расчетные значения больше критических, следовательно, гипотеза стационарности не применяется.

2.4 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.

Визуальный анализ рисунка 2.8 показал, что в Амдерме в 1947 году наблюдался минимум осадков равный 226 мм, а в 1955 г. наблюдался резко выраженный максимум, который составил 632 мм. В целом по графику заметны резкие перепады.

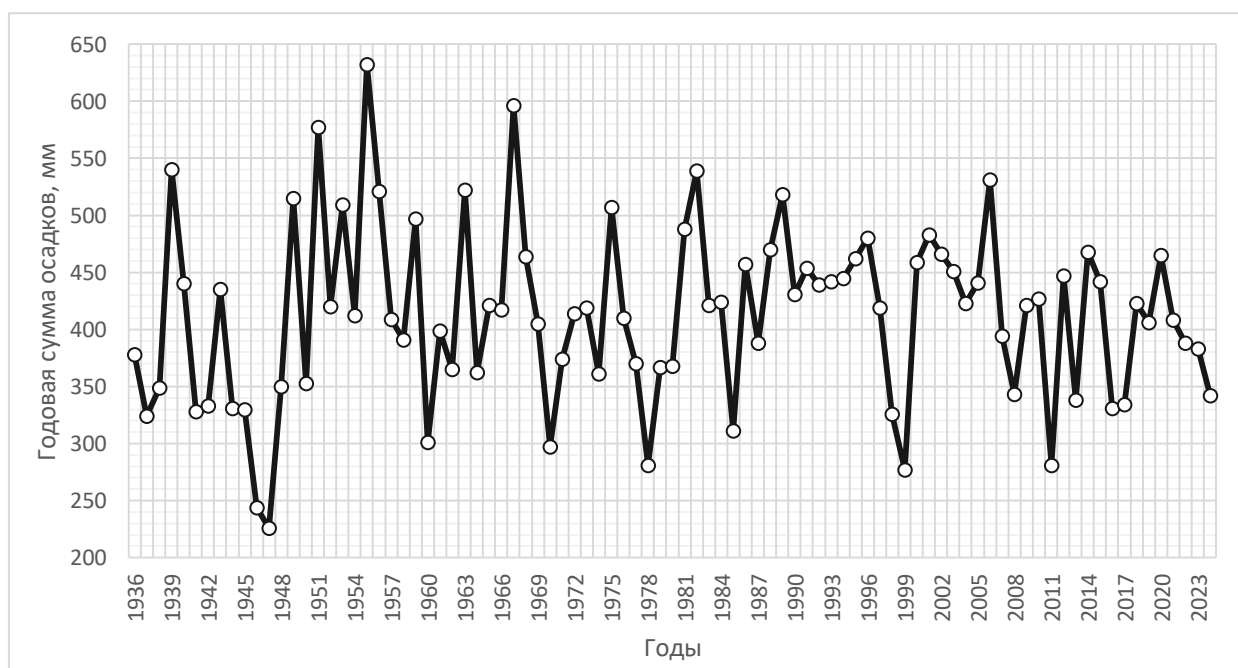


Рисунок 2.8 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции Амдерма

На рисунке 2.9 изображена хронология годовых сумм осадков на станции им. Попова с 1934-2024 гг.

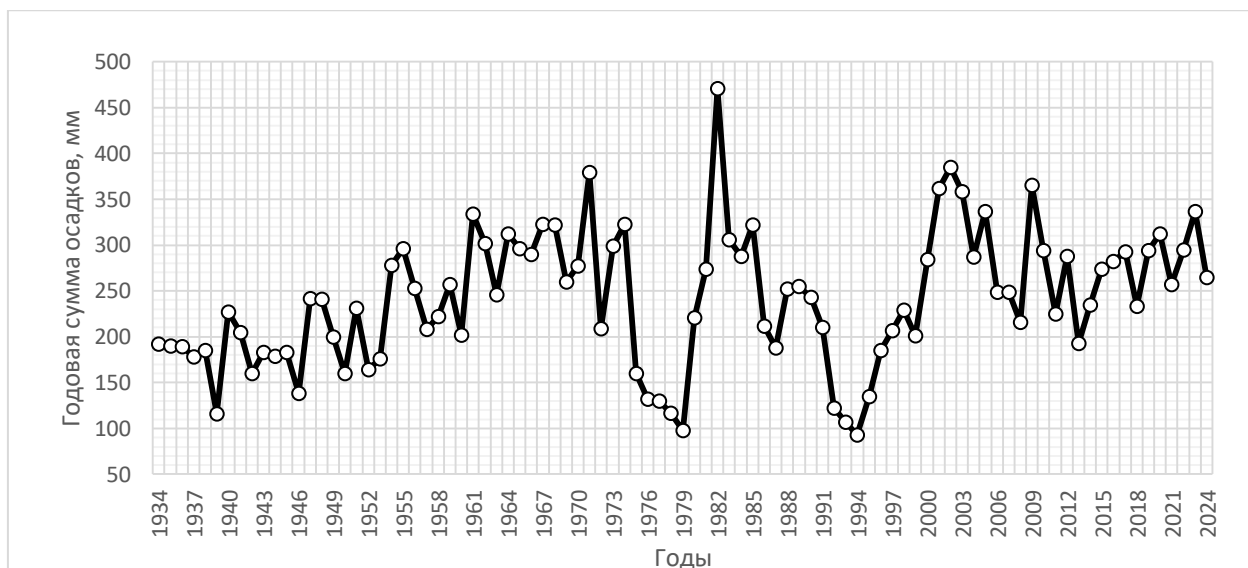


Рисунок 2.9 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции им. Попова

Визуальный анализ графика 2.9 показал тенденцию к увеличению количества осадков в период с 1939-1974 гг., а так же резкое уменьшение осадков после 1974 до 1979 года и с 1990 до 1994 года. Явно выраженный максимум в 1982 равен 471 мм.

На графике 2.10 изображена хронология годовых сумм осадков на станции о. Визе за период 1954-2024 гг. Проведя визуальный анализ, можно сделать вывод, что в 1967 году наблюдался резкий скачек количества сумм осадков, равный 351 мм. А после наблюдается тенденция к уменьшению количества осадков дойдя до своего минимума в 1986 году равная 88 мм.

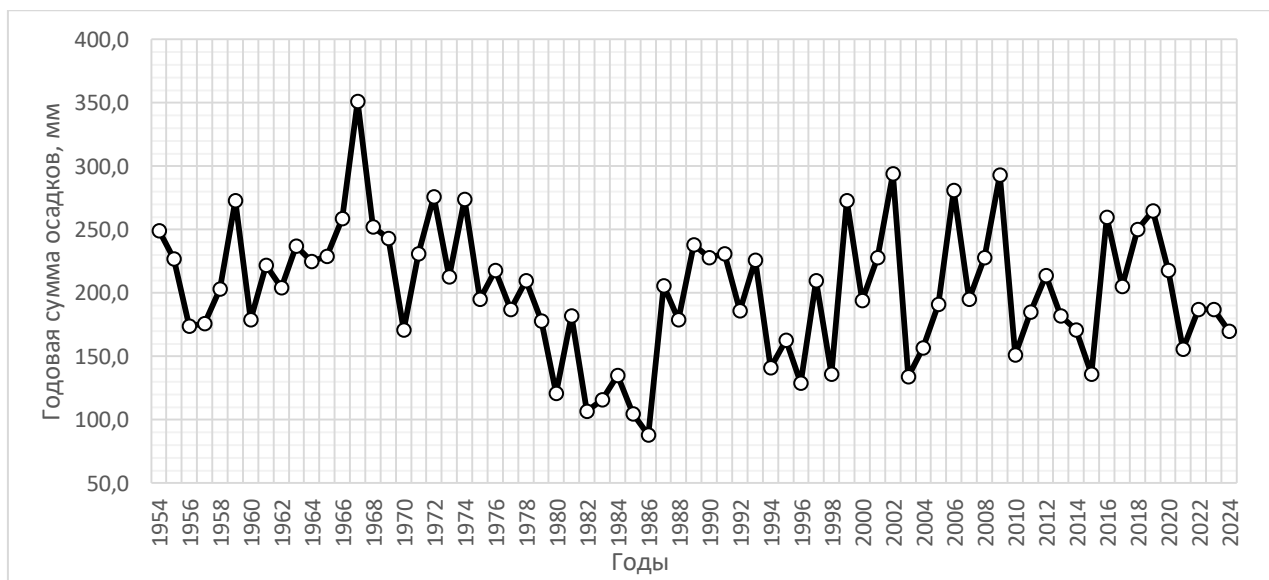


Рисунок 2.10 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции о. Визе.

На графике 2.11 изображена хронология годовых сумм осадков на станции им. Ушакова за период 1952-2024 года. Анализ графика показал тенденцию уменьшения количества осадков, однако в 2012 году виден резкий рост с максимальным значением равным 389 мм.

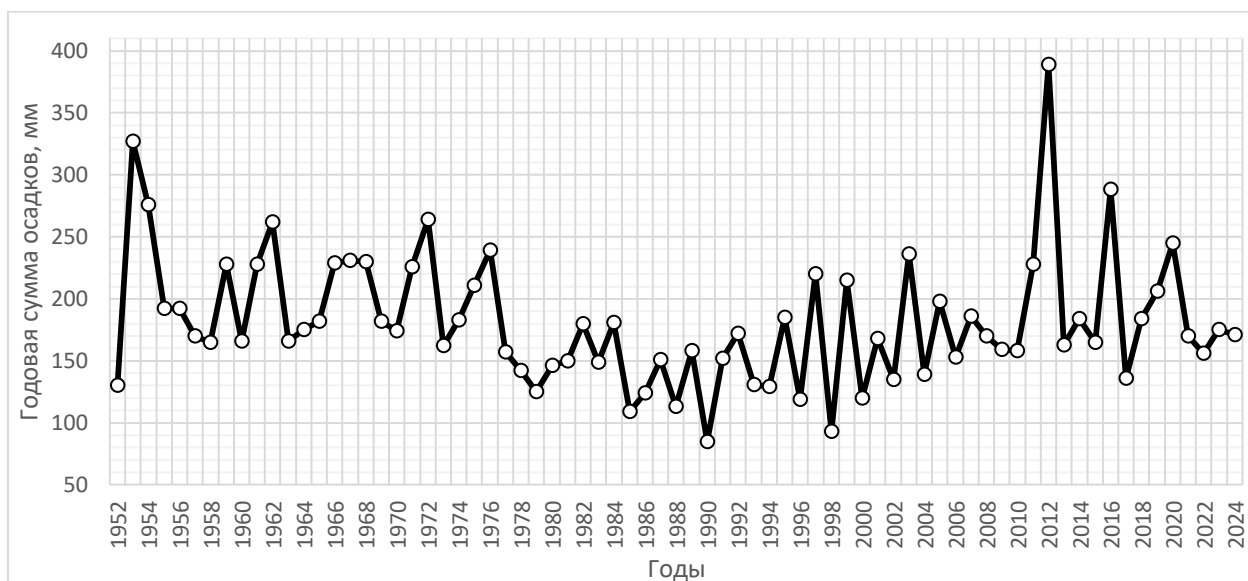


Рисунок 2.11 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции им. Ушакова.

На графике 2.12 изображена хронология годовых сумм осадков на станции Известий ЦИК за период с 1973-2024 гг.. Визуальный анализ показал минимум осадков в 1984 году равный 54 мм, и максимум в 2012 году равный 326 мм. Видна тенденция увеличения количества осадков.

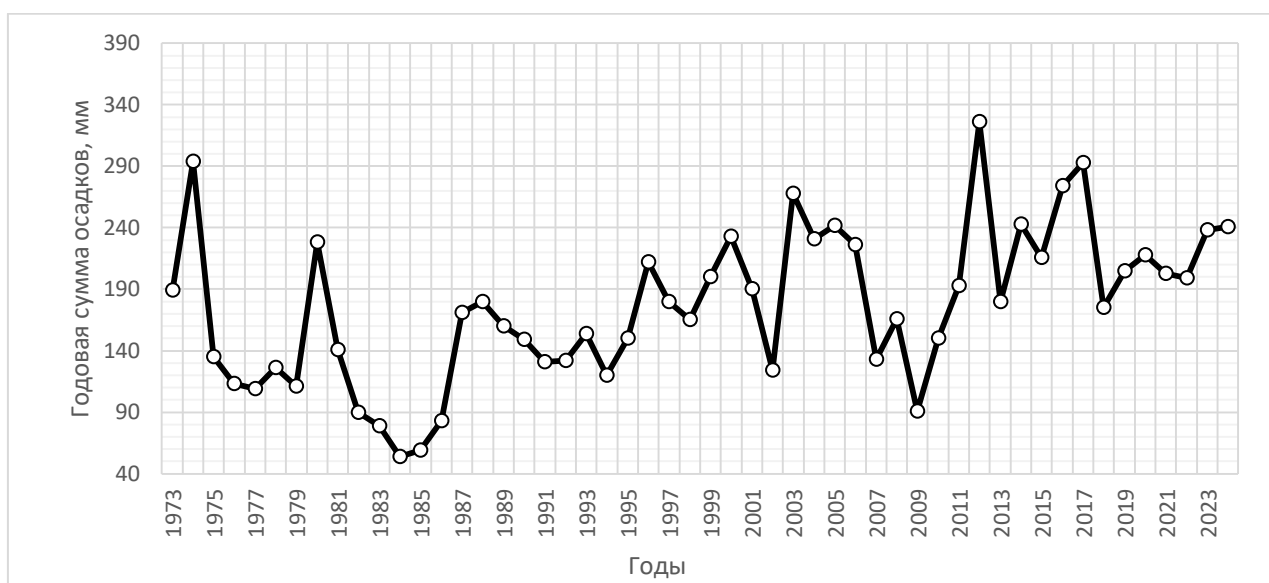


Рисунок 2.12 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции Известий ЦИК

На графике 2.13 изображена хронология годовых сумм осадков на станции Стерлегово за период 1973-2024 гг. Визуальный анализ показал уменьшение количества осадков в период 1988-1994 гг, а так же тенденцию увеличения количества осадков 1994-2020 гг. Максимум осадков за весь период наблюдений был в 2018 году и составил 445 мм, а минимум в 1994 г. и составил 90 мм.

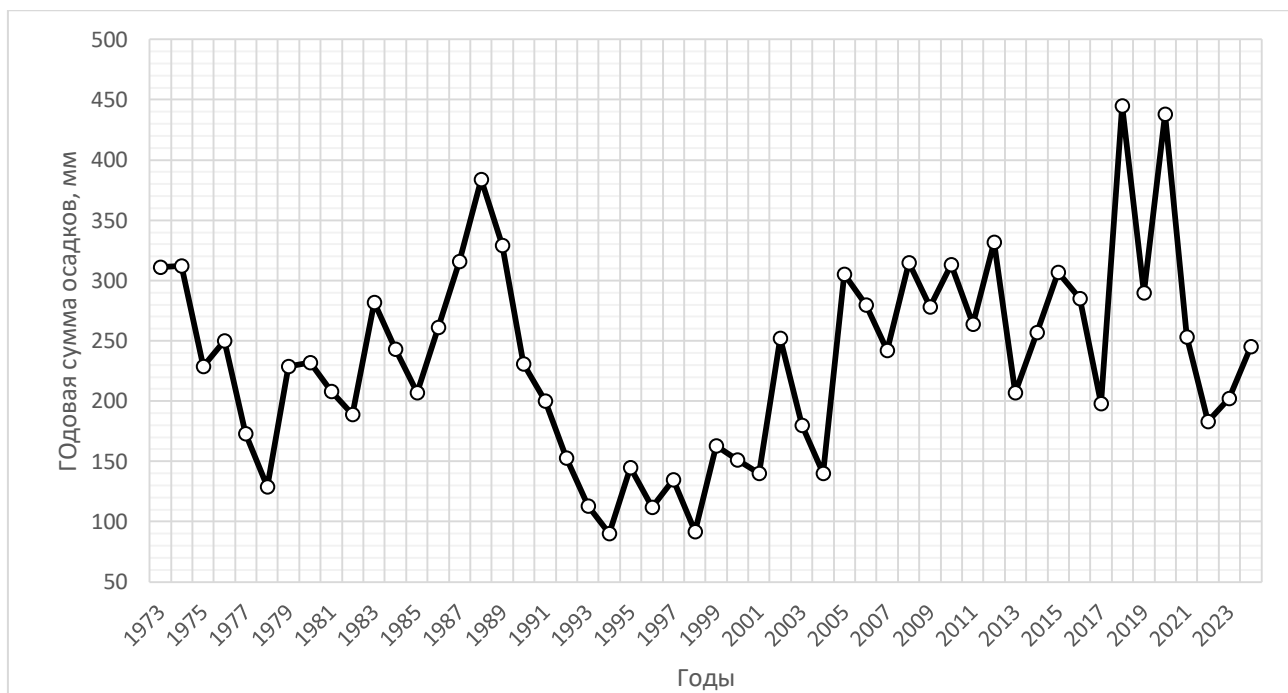


Рисунок 2.13 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции Стерлегово

Следующее действие - это произвести расчеты статистик по критериям Диксона и Смирнова-Граббса по формулам (2.1)-(2.12). Результаты оценивания однородности эмпирического распределения годовых сумм осадков для выбранных станций представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты оценивания однородности эмпирического распределения годовых сумм осадков для выбранных станций

Станции	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Амдерма	max	Диксон 1	0,09	0,21	однороден
	max	Диксон 2	0,09	0,22	однороден
	max	Диксон 3	0,14	0,27	однороден
	max	Диксон 4	0,15	0,28	однороден

	max	Диксон 5	0,14	0,26	однороден
	max	Смирнов-Граббс	2,83	3,34	однороден
	min	Диксон 1	0,04	0,14	однороден
	min	Диксон 2	0,05	0,15	однороден
	min	Диксон 3	0,14	0,20	однороден
	min	Диксон 4	0,15	0,21	однороден
	min	Диксон 5	0,13	0,18	однороден
	min	Смирнов-Граббс	2,42	2,86	однороден
Им. Попова	max	Диксон 1	0,23	0,19	неоднороден
	max	Диксон 2	0,23	0,20	неоднороден
	max	Диксон 3	0,25	0,24	неоднороден
	max	Диксон 4	0,252	0,253	однороден
	max	Диксон 5	0,243	0,240	неоднороден

Таблица 2.9 (продолжение) – Результаты оценивания однородности эмпирического распределения годовых сумм осадков для выбранных станций

Станции	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Им. Попова	max	Смирнов-Граббс	3,16	3,28	однороден
	min	Диксон 1	0,01	0,14	однороден
	min	Диксон 2	0,02	0,15	однороден
	min	Диксон 3	0,05	0,20	однороден

	min	Диксон 4	0,05	0,21	однороден
	min	Диксон 5	0,04	0,18	однороден
	min	Смирнов-Граббс	2,04	2,86	однороден
О. Визе	max	Диксон 1	0,22	0,21	неоднороден
	max	Диксон 2	0,23	0,22	неоднороден
	max	Диксон 3	0,24	0,27	однороден
	max	Диксон 4	0,24	0,28	однороден
	max	Диксон 5	0,22	0,26	однороден
	max	Смирнов-Граббс	2,89	3,18	однороден
	min	Диксон 1	0,06	0,15	однороден
	min	Диксон 2	0,08	0,16	однороден
	min	Диксон 3	0,09	0,20	однороден
	min	Диксон 4	0,09	0,21	однороден
	min	Диксон 5	0,07	0,19	однороден

Таблица 2.9 (продолжение) – Результаты оценивания однородности
эмпирического распределения годовых сумм осадков для выбранных станций

Станции	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
О. Визе	min	Смирнов-Граббс	2,24	2,67	однороден
Им. Ушакова	max	Диксон 1	0,20	0,36	однороден
	max	Диксон 2	0,21	0,36	однороден

	max	Диксон 3	0,34	0,44	однороден
	max	Диксон 4	0,36	0,44	однороден
	max	Диксон 5	0,33	0,44	однороден
	max	Смирнов-Граббс	3,97	4,52	однороден
	min	Диксон 1	0,03	0,06	однороден
	min	Диксон 2	0,03	0,07	однороден
	min	Диксон 3	0,10	0,09	неоднороден
	min	Диксон 4	0,12	0,10	неоднороден
	min	Диксон 5	0,0789	0,0780	неоднороден
	min	Смирнов-Граббс	1,85	1,82	неоднороден
Известий ЦИК	max	Диксон 1	0,12	0,23	однороден
	max	Диксон 2	0,12	0,25	однороден
	max	Диксон 3	0,12	0,30	однороден
	max	Диксон 4	0,13	0,32	однороден

Таблица 2.9 (продолжение) – Результаты оценивания однородности
эмпирического распределения годовых сумм осадков для выбранных станций

Станции	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Известий ЦИК	max	Диксон 5	0,12	0,29	однороден
	max	Смирнов-Граббс	2,40	3,11	однороден
	min	Диксон 1	0,02	0,18	однороден
	min	Диксон 2	0,02	0,19	однороден

	min	Диксон 3	0,10	0,25	однороден
	min	Диксон 4	0,10	0,26	однороден
	min	Диксон 5	0,09	0,23	однороден
	min	Смирнов-Граббс	1,96	2,85	однороден
Стерлего во	max	Диксон 1	0,02	0,25	однороден
	max	Диксон 2	0,02	0,27	однороден
	max	Диксон 3	0,17	0,33	однороден
	max	Диксон 4	0,18	0,34	однороден
	max	Диксон 5	0,17	0,32	однороден
	max	Смирнов-Граббс	2,58	3,29	однороден
	min	Диксон 1	0,01	0,16	однороден
	min	Диксон 2	0,01	0,17	однороден
	min	Диксон 3	0,06	0,23	однороден
	min	Диксон 4	0,07	0,23	однороден

Таблица 2.9 (продолжение) – Результаты оценивания однородности
эмпирического распределения годовых сумм осадков для выбранных станций

Станции	Экстремум	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Стерлегов о	min	Диксон 5	0,06	0,21	однороден
	min	Смирнов-Граббс	1,78	2,73	однороден

Из анализа данных таблицы 2.9 следует сделать вывод, что временной ряд годовых сумм осадков на станции Амдерма, Известий ЦИК и Стерлегово является однородным за весь период. На других станциях показатели отличаются.

Так например на станции им. Попова однородность приходится на максимальный экстремум Диксон 4 и Смирнова-Граббса, а также на все минимальные экстремумы. Неоднородность же приходится на максимальный экстремум Диксона 1,2,3,5.

На станции о. Визе неоднородность приходится на максимальный экстремум Диксона 1 и 2. На все остальные экстремумы ряд однороден.

Для станции им. Ушакова практически все экстремумы однородны, за исключением минимальных экстремумов Диксона 3,4,5 и Смирнова-Граббса.

Далее проводим оценивание стационарности дисперсий и средних значений по критериям Фишера и Стьюдента. По формулам (2.13) и (2.17) получены расчетные значения по методике, описанной в п. 2.2. определены критические значения статистик Фишера и Стьюдента результаты оценивания стационарности для выбранных станций представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Оценки стационарности эмпирического распределения годовых сумм осадков для выбранных метеостанций.

Станции	Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Амдерма	Фишер	1,28	1,94	однороден
	Стьюдент	3,05	2,33	неоднороден
Им. Попова	Фишер	5,24	2,19	неоднороден

	Стьюдент	4,06	4,03	неоднороден
О. Визе	Фишер	1,37	1,88	однороден
	Стьюдент	3,27	2,61	неоднороден
Им. Ушакова	Фишер	1,30	2,13	однороден
	Стьюдент	3,22	2,15	неоднороден
Известий ЦИК	Фишер	1,12	2,39	однороден
	Стьюдент	4,72	3,45	неоднороден
Стерлегово	Фишер	1,18	2,82	однороден
	Стьюдент	3,60	3,57	неоднороден

Из анализа таблицы 2.10 сделаем вывод, что расчетное значение статистики критерия Фишера на станциях Амдерма, о. Визе, им. Ушакова, Известий ЦИК, Стерлегово меньше критического, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии, а для станции им. Попова критическое значения Фишера меньше расчетного, следовательно, ряд неоднороден. В результате оценивания стационарности средних значений по критерию Стьюдента на станциях Амдерма, им. Попова, о. Визе, им. Ушакова, Известий ЦИК, Стерлегово расчетные значения больше критических, поэтому гипотеза стационарности отклоняется.

3 ОЦЕНИВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ В КАРСКОМ МОРЕ

3.1 Статистические методы оценивания климатических изменений

Следующим этапом исследований становится моделирование климатических метаморфоз. Под климатической моделью подразумевается сложная система представлений о структуре и эволюции атмосферы, облеченная в форму определенного формального языка [9].

Климатическая система Земли, словно живой организм, непрестанно пульсирует, рождая богатейшую палитру колебаний климатических

характеристик. Эта изменчивость, подобная калейдоскопу, оценивается на основе анализа множества индикаторов, среди которых главенствующую роль играют температура воздуха и количество выпадающих осадков.

Изменения в климатической системе могут быть запечатлены в двух основных типах моделей: статичных и динамичных. В рамках настоящего исследования для оценки климатических трансформаций были применены следующие три модели:

- стационарная модель, застывшая во времени;
- модель линейного тренда, прокладывающая путь сквозь года;
- модель ступенчатых изменений, фиксирующая резкие скачки и переходы.

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 [10]:

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

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

Эта модель может правильно применена к определенным регионам Земного шара или для конкретных временных интервалов.

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

Помимо хаотичных, случайных колебаний, климатическую систему могут терзать и нестационарные компоненты, порожденные исполинским воздействием факторов с протяженными периодами. Если допустить, что эти нестационарные силы – эхо откликающейся климатической системы на внешние вторжения, то их проявления предстают в двух основных обликах: неуклонные, монотонные тенденции (будь то плавный тренд или циклические взлеты и падения) и внезапные, скачкообразные метаморфозы.

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 [10]:

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

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 [10]:

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

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 [10]:

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

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

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 от одного стационарного состояния к другому определяются либо визуально, либо на основе 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 [10]:

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

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 (3.11) 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 [10]:

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

Условие (3.15) можно назвать достаточным условием, так как оно гарантирует, что отличие между моделями превышает погрешность процесса или погрешность рассматриваемой характеристики.

Для оценки статистической значимости рассматриваемых моделей используется статистический критерий Фишера для оценки однородности дисперсий (если дисперсии неоднородны, то данная модель статистически существенно отличается от стационарной модели). Статистика критерия Фишера вычисляется с использованием формулы:

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

Если рассчитанное значение статистики Фишера больше критического значения, то дисперсии двух моделей имеют статистически значимую разницу, и рассматриваемая модель статистически более эффективна, чем стационарная 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 Карского моря.

Таблица 3.1 – Основные параметры стационарной модели количества осадков

Название метеостанции	Среднее $Y_{cp}(t)$, мм	СКО $\sigma(t)$, мм
Амдерма	412,9	77,38
им. Попова	241,3	72,76
Остров Визе	202,6	51,3

им. Ушакова	181,6	52,24
Известий ЦИК	176,4	62,41
Стерлегово	235	81,27

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 Карского моря.

Таблица 3.2 – Основные параметры линейной модели количества осадков.

Название метеостанции	b_0	b_1	R	R^*	Вывод
Амдерма	408,68	0,09	0,031	0,206	Незначима
им. Попова	200,3	0,89	0,323	0,204	Значима
Остров Визе	215,2	-0,35	-0,141	0,231	Незначима
им. Ушакова	193,1	-0,31	-0,126	0,228	Незначима
Известий ЦИК	120,2	2,12	0,515	0,272	Значима
Стерлегово	206,1	1,09	0,203	0,272	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 им. Попова и Известий ЦИК условие (3.7) выполняется, таким образом, линейная модель для данных станций является статистически значимой (рисунок 3.1). Для всех остальных станций линейная модель не является статистически значимой.

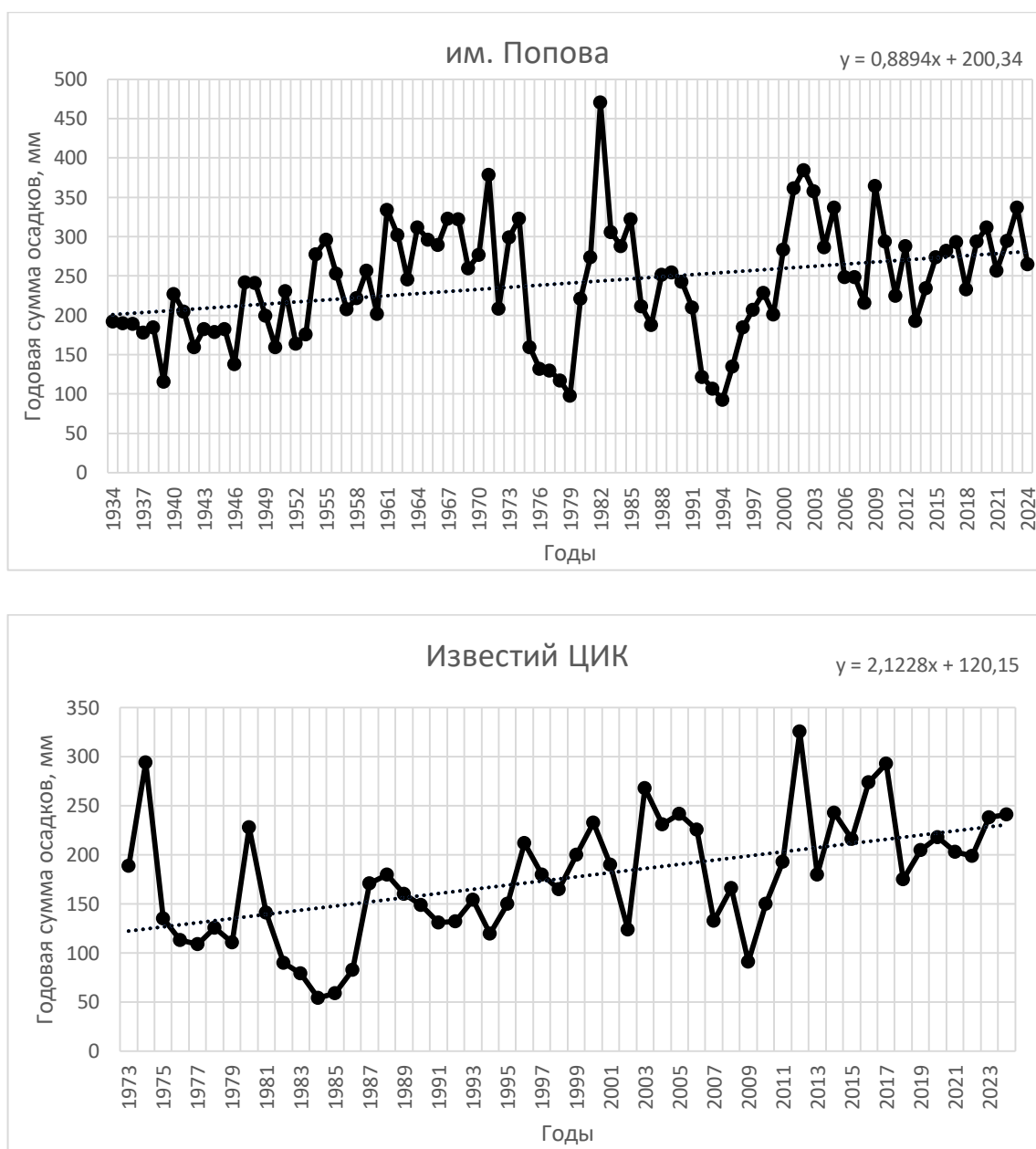


Рисунок 3.1 – Линейная модель годовых сумм осадков для значимых метеостанций.

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

Таблица 3.3 – Основные параметры ступенчатой модели количества осадков

Название метеостанции	Ступень	n	$Y_{cp,j}$, мм	σ_j	$\sigma_{ст}$
Амдерма	1	13	354,46	82,04	74,38

	2	76	422,92	72,49	
им. Попова	1	20	186,95	32,23	67,27
	2	71	256,55	73,78	
Остров Визе	1	21	231,81	42,61	48,3
	2	50	190,40	49,98	
им. Ушакова	1	25	207,60	44,78	49,37
	2	48	168,08	51,10	
Известий ЦИК	1	23	137,30	53,83	52,59
	2	29	207,41	50,65	
Стерлегово	1	32	205,66	75,11	73,51
	2	20	281,95	68,96	

В таблице 3.4 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 количества осадков.

Название метеостанции	σ_{ε}	$\sigma_{\text{ст}}$	$\Delta_{\text{тр}}$, %	$\Delta_{\text{ст}}$, %	$F_{\text{тр}}$	$F_{\text{ст}}$	F^*	Вывод

Амдерма	77,34	74,38	0,05	3,87	1	1,08	1,45	Не значима
им. Попова	68,86	67,27	5,36	7,54	1,12	1,17	1,45	Не значима
Остров Визе	50,77	48,26	0,99	5,89	1,02	1,13	1,5	Не значима
им. Ушакова	51,82	49,37	0,8	5,51	1,02	1,12	1,5	Не значима
Известий ЦИК	53,48	52,59	14,31	15,73	1,36	1,41	1,6	Не значима
Стерлегово	79,58	73,51	2,08	9,55	1,04	1,22	1,6	Не значима

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 Карского 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 стационарной модели
среднемесячных температур января станций Карского моря.

Название метеостанции	Среднее $Y_{cp}(t)$, мм	СКО $\sigma(t)$, мм
Амдерма	-17,9	4,39
им. Попова	-23,1	4,77
Остров Визе	-24,7	5,09
им. Ушакова	-26,8	4,17
Известий ЦИК	-24,9	4,25
Стерлегово	-27,8	4,41

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 Карского моря.

Таблица 3.6 – Основные параметры линейной модели среднемесячных температур января.

Название метеостанции	b_0	b_1	R	R^*	Вывод
Амдерма	-17,9	0,001	0,012	0,206	Незначима
им. Попова	-23,8	0,016	0,089	0,206	Незначима
Остров Визе	-28,2	0,086	0,392	0,22	Значима
им. Ушакова	-27,8	0,021	0,14	0,202	Незначима

Известий ЦИК	-28,1	0,088	0,432	0,234	Значима
Стерлегово	-28,9	0,023	0,138	0,206	Незначима



Рисунок 3.2 – Линейная модель среднемесячных температур января для значимых метеостанций.

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 станций остров Визе и Известий ЦИК условие (3.7) выполняется, таким образом, линейная модель для данных станций является статистически значимой (рисунок 3.2). Для всех остальных станций линейная модель не является статистически значимой.

Таблица 3.7 – Основные параметры ступенчатой модели среднемесячных температур января

Название метеостанции	Степень	n	$Y_{cp,j}$, мм	σ_j	$\sigma_{ст}$
Амдерма	1	70	-18,5	4,24	4,26
	2	21	-15,6	4,25	
им. Попова	1	72	-24,0	4,70	4,46
	2	20	-19,7	3,33	
Остров Визе	1	60	-26,5	3,85	4,06
	2	20	-19,3	4,54	
им. Ушакова	1	75	-27,8	3,87	3,71
	2	20	-23,0	2,92	
Известий ЦИК	1	53	-26,3	3,48	3,53
	2	19	-20,8	3,58	
Стерлегово	1	71	-28,7	4,13	4,11
	2	20	-24,6	3,94	

В таблице 3.8 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 среднемесячных температур января.

Название метеостанции	σ_{ε}	$\sigma_{ст}$	$\Delta_{тр}$, %	$\Delta_{ст}$, %	$F_{тр}$	$F_{ст}$	F^*	Вывод
-----------------------	------------------------	---------------	-------------------	-------------------	----------	----------	-------	-------

Амдерма	4,39	4,26	0,007	2,87	1	1,06	1,45	Не значима
им. Попова	4,75	4,46	0,39	6,41	1	1,14	1,44	Не значима
Остров Визе	4,69	4,06	8,02	20,28	1,18	1,57	1,48	Значима
им. Ушакова	4,13	3,71	0,99	11,07	1,02	1,26	1,43	Не значима
Известий ЦИК	3,83	3,53	9,82	16,89	1,23	1,45	1,5	Не значима
Стерлегово	4,37	4,11	0,96	6,73	1,02	1,15	1,45	Не значима

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

Таким образом, стационарная модель является наилучшей для описания изменения температуры в январе для станций Карского 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 стационарной модели
среднемесячных температур июля станций Карского моря.

Название метеостанции	Среднее $Y_{cp}(t)$, мм	СКО $\sigma(t)$, мм
Амдерма	7,1	2,73
им. Попова	4,7	1,88
Остров Визе	0,6	0,53
им. Ушакова	0,7	0,61
Известий ЦИК	1,8	1,21
Стерлегово	3,4	1,57

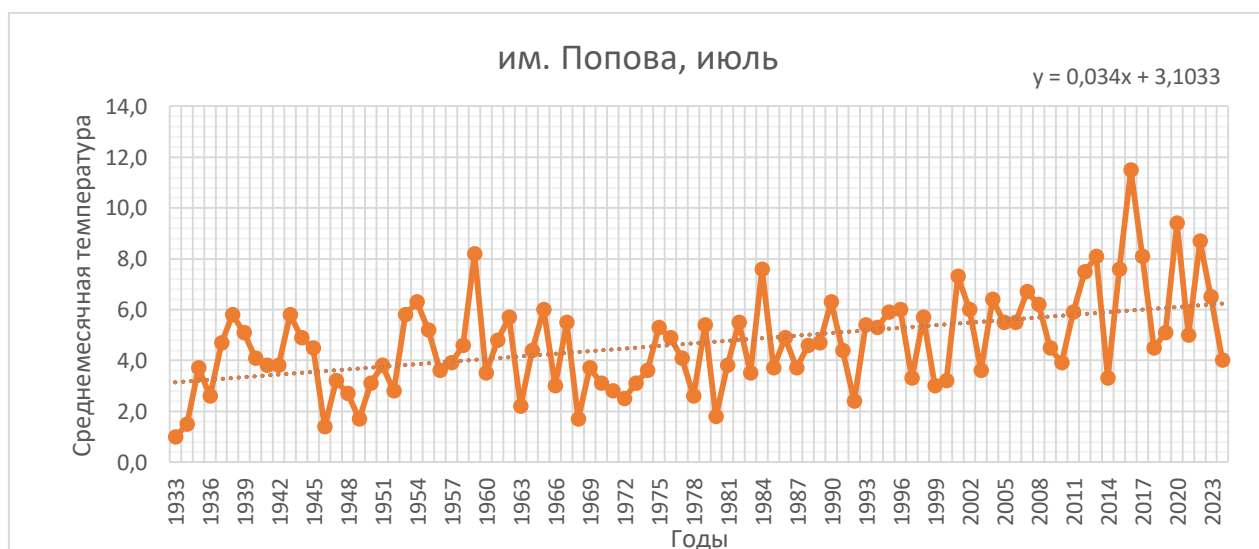
В таблице 3.10 приведены основные параметры линейной модели для рассматриваемых станций Карского моря.

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 четырех станций из шести (рисунок 3.3). Статистически незначимой является станции им. Ушакова и Стерлегово.

Таблица 3.6 – Основные параметры линейной модели среднемесячных температур июля.

Название метеостанции	b_0	b_1	R	R^*	Вывод
Амдерма	5,5	0,04	0,353	0,206	Значима
им. Попова	3,1	0,03	0,482	0,206	Значима

Остров Визе	0,3	0,005	0,254	0,22	Значима
им. Ушакова	0,8	-0,001	-0,068	0,202	Незначима
Известий ЦИК	1,1	0,017	0,3	0,234	Значима
Стерлегово	3,1	0,006	0,108	0,206	Незначима



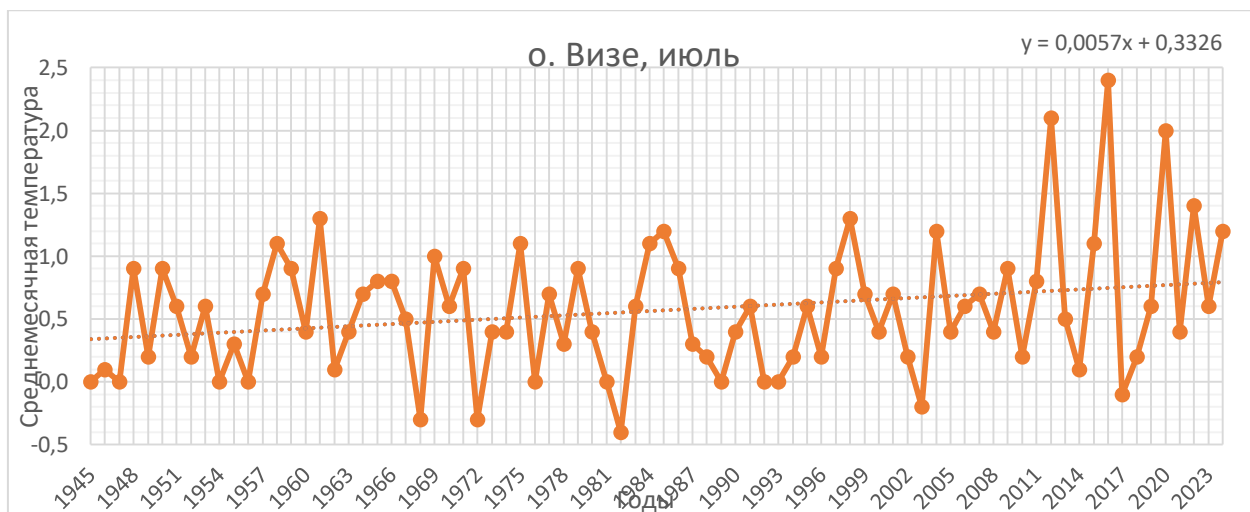


Рисунок 3.3 – Линейная модель среднемесячных температур июля для значимых метеостанций

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.

Анализ данных табл. 3.12 показывает, что нестационарные модели не являются статистически значимыми, т.к. критическое значение статистики Фишера F^* всегда больше расчетного значения.

Таблица 3.11 – Основные параметры ступенчатой модели среднемесячных температур июля.

Название метеостанции	Степень	n	$Y_{cp,j}$, мм	σ_j	$\sigma_{ст}$
Амдерма	1	78	6,7	2,44	2,56
	2	13	9,7	3,07	
им. Попова	1	68	4,1	1,49	1,65
	2	24	6,3	2,0	
Остров Визе	1	66	0,5	0,42	0,5
	2	14	1,0	0,78	
им. Ушакова	1	42	0,8	0,57	0,61
	2	53	0,6	0,64	
Известий ЦИК	1	53	1,4	0,83	1,09
	2	19	2,7	1,58	
Стерлегово	1	72	3,2	1,47	1,54
	2	19	4,2	1,76	

Таблица 3.12 – Оценки эффективности и статистической значимости моделей среднемесячных температур июля.

Название метеостанции	σ_{ε}	$\sigma_{ст}$	$\Delta_{тр}$, %	$\Delta_{ст}$, %	$F_{тр}$	$F_{ст}$	F^*	Вывод

Амдерма	2,73	2,56	6,45	6,47	1,14	1,14	1,45	Не значима
им. Попова	1,88	1,65	12,37	12,68	1,3	1,31	1,44	Не значима
Остров Визе	0,53	0,5	3,27	4,04	1,07	1,09	1,48	Не значима
им. Ушакова	0,61	0,61	0,23	-0,43	1	0,99	1,43	Не значима
Известий ЦИК	1,21	1,09	4,63	9,91	1,1	1,23	1,5	Не значима
Стерлегово	1,57	1,54	0,58	1,79	1,01	1,04	1,45	Не значима

Таким образом, стационарная модель является наилучшей для описания изменения температуры в июле для станций Карского моря.

В работе исследовано влияние физико-географических особенностей на формирование климата Карского моря. Будучи подвластным дыханию студеного Северного Ледовитого океана, море встречает на своем пути архипелаг Новая Земля, подобный исполинскому барьеру, сдерживающему натиск теплых атлантических вод. Причудливый рельеф морского дна играет свою роль: часть тепла просачивается сквозь проливы, рождая глубинные теплые течения. Эта особенность приводит к тому, что в морских глубинах, особенно в желобах, температура воды оказывается выше, чем на поверхности. Благодаря этому большая часть акватории не скована припайным льдом, а лишь дрейфующими льдинами. В юго-западной части моря ощущается благотворное влияние исландского минимума и проливов Югорский Шар и Карские Ворота, делая этот район значительно теплее северо-восточного. В целом, проведенное исследование позволяет заключить, что юго-западная часть акватории Карского моря оказывает доминирующее влияние на климатические процессы во всем регионе.

Для анализа климатических изменений температуры воздуха и количества осадков над просторами Карского моря были выбраны шесть метеорологических станций. Их расположение было тщательно продумано, чтобы охватить как можно большую часть границ моря и наиболее полно отразить разнообразие климатических условий в различных его районах.

Проведена оценка однородности эмпирических распределений количества осадков и температуры воздуха за январь и июль по критериям Диксона и Смирнова-Граббса, а также оценка стационарности по критериям Стьюдента и Фишера. Экстремальные значения, нарушающие гармонию временных рядов, были исключены из расчетов основных климатических характеристик. Нестационарные временные ряды подверглись тщательному анализу с целью выявления причин, нарушающих их стабильность.

Для описания изменчивости годовых сумм осадков и температуры на станциях Карского моря были использованы стационарная модель и две нестационарные модели, отражающие линейный тренд и ступенчатые изменения.

Моделирование изменения годового количества осадков показало, что для описания климатических особенностей станций Карского моря наиболее подходящей является стационарная модель. Однако стоит отметить статистическую значимость линейной модели для станций им. Попова и Известий ЦИК. Кроме того, станции им. Попова, Известий ЦИК и

Стерлегово демонстрируют устойчивый рост количества осадков. В противоположность этому, на станциях им. Ушакова и о. Визе наблюдается тенденция к уменьшению, а в Амдерме изменения происходят более равномерно.

Анализ изменения температуры воздуха в январе также показал, что стационарная модель является наиболее подходящей для описания станций Карского моря. Тем не менее, следует отметить, что на всех станциях, за исключением Амдермы, линейные модели указывают на тенденцию роста температуры воздуха в январе, хотя статистически значимыми они являются только для станций о. Визе и Известий ЦИК. Модель ступенчатых изменений также является значимой только для станции о. Визе. Однако, подобно станции о. Визе, где отчетливый скачок температуры воздуха произошел в 2004 году, аналогичные изменения наблюдаются в тот же год на станциях им. Попова, им. Ушакова, Стерлегово, на станции Амдерма в 2003 году, а на Известий ЦИК в 2005 году. Исключив методический фактор, основываясь на журналах истории станций, можно предположить, что в 2004 году произошел некий переломный момент, повлекший за собой наблюдаемые изменения, даже несмотря на статистическую значимость модели только для о. Визе.

Моделирование изменения температуры воздуха в июле также подтвердило, что стационарная модель наиболее точно описывает данные станций Карского моря. Стоит отметить, что линейная модель подходит для большинства станций, за исключением им. Ушакова и Стерлегово, где она не является статистически значимой. На всех станциях, где применима линейная модель, наблюдается тенденция к повышению температуры воздуха, за исключением им. Ушакова, где отмечается понижение.

Таким образом, проведенное исследование подчеркивает значительное влияние климатических изменений температуры и количества осадков в Карском море на экосистему региона и необходимость дальнейшего изучения этого вопроса. Полученные данные могут послужить основой для разработки стратегий управления природными ресурсами и защиты хрупкой экосистемы Карского моря от негативных последствий климатических изменений. В дальнейшем рекомендуется продолжить непрерывный мониторинг климатических изменений в этом стратегически важном регионе. В заключение, результаты данного исследования подчеркивают необходимость комплексного и всестороннего подхода к анализу климатических изменений и их потенциальных последствий.

Список использованных источников:

1. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
2. Физико-географические характеристики / Карское море [Электронный ресурс]: Портал «Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане» [сайт]. – Режим доступа: <http://www.esimo.ru/atlas/Karsk/>
3. **Буренков, В.И.** О влиянии материкового стока на пространственное распределение гидрологических характеристик вод Карского моря [Текст] / В.И. Буренков, А.П. Васильков // Океанология. – Т. 34. №5. – 1994. – С. 652-661.
4. **Лобанов, В.А.** Лекции по климатологии. Часть 1. Общая климатология [Текст]. В 2 кн. Кн. 1: учебник для вузов / В.А. Лобанов. – СПб, РГГМУ, 2019. – 378 с.
5. **Дашко, Н.А.** Курс лекций по синоптической метеорологии. Часть 1. [Текст]: уч. пособие / Н.А. Дашко. – 2005. – 523 с.
6. Летопись погоды / Архангельская область. Россия [Электронный ресурс]: Сайт «Погода и климат» [сайт] – Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php?id=ru®ion=29>
7. Нидерландский королевский метеорологический институт [Электронный ресурс]: [сайт] – Режим доступа: <http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?id=someone@>
8. **Лобанов, В.А.** Практикум по климатологии. Часть 1: уч. пособие. [Электронный ресурс]: ЭБС «Лань» [сайт] / В.А. Лобанов, А.Б. Лебедев – СПб.: НИЦ АРТ, 2024 – 124 с. – Режим доступа: <https://reader.lanbook.com/book/427097>

9. **Комаров, В.С.** Динамико-стохастические методы и их применение в прикладной метеорологии [Текст] / В.С. Комаров, Попов Ю.Б., Суворов С.С., Кураков В.А. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. – 236 с.

10. **Лобанов, В.А.** Практикум по климатологии. Часть 2: уч. пособие. / В.А. Лобанов, И.А. Смирнов, Шадурский А.Е. – СПб.: изд. РГГМУ, 2012. – 180 с.