



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 в г Мурманске»

Исполнитель Голубева Татьяна Николаевна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат технических наук  
(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)

Сероухова Ольга Станиславовна  
(фамилия, имя, отчество)

« 02 » июня 2023 г.

Санкт-Петербург  
2023

## Введение

Изменения климата в Арктическом регионе происходит наиболее интенсивно. Актуальность исследований с практической точки зрения вызвана тем, что в будущем Мурманск, как глубоководный незамерзающий порт будет играть ключевую роль при освоении биоресурсов и полезных ископаемых Арктического региона, эксплуатации Северного морского пути и обеспечении обороноспособности данного региона.

**Целью** данной работы является оценка современных климатических изменений в г. Мурманск. Для этого будут использованы статистические многолетние данные характеристик погоды Мурманской области. Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ физико-географических и синоптико-климатических особенностей Мурманской области.
2. Сформировать базу временных рядов для анализа, проверить их качество.
3. Выполнить статистическое моделирование для оценивания современных климатических изменений температуры воздуха и осадков в г. Мурманск.

**Объектом** исследования бакалаврской работы является воздушный бассейн Мурманской области. Для решения поставленных задач были использованы следующие материалы: данные по многолетним среднегодовым температурам воздуха и многолетним среднегодовым значениям количества осадков по годам и по месяцам, в период с 1918 по 2022 год.

### **Методы исследования**

Основной метод исследования – статистическое моделирование.

Данная работа актуальна для повышения информационного обеспечения по отношению как к народному хозяйству, так и к улучшению качества жизни жителей.

Были использованы данные сайтов: <http://climexp.knmi.nl/>, а также <http://www.pogodaiklimat.ru/>.

Представленная бакалаврская работа состоит из введения, 3 глав и заключения. Текст содержит 32 рисунка и 10 таблиц. Список использованной литературы насчитывает 12 наименований.

# 1 Физико-географические и климатические особенности Мурманской области

## 1.1 Географическое положение г. Мурманск

Мурманск — крупнейший в мире город, расположенный за Северным полярным кругом, в зоне распространения многолетней мерзлоты. Мурманск находится в северо-восточной части Кольского полуострова на восточном побережье Кольского залива Баренцева моря в точке с координатами  $68^{\circ}59'$  с.ш.  $33^{\circ}06'$  в.д. Город вытянулся вдоль побережья более чем на 20 км.



Рисунок 1. – Физическая карта Мурманской области.

## 1.2 Рельеф и геологическое строение Мурманской области

Мурманская область расположена на северо-восточной части Балтийского кристаллического щита, который сложен породами раннего докембрия, их возраст варьируется 3,2 – 1,7 млрд. лет. На протяжении геологической истории развития, территория отличалась интенсивным проявлением магматической деятельности.

Рельеф Мурманской области – горно-равнинный, в котором горные системы соседствуют с низменностями. В центральной части Кольского полуострова расположены Хибины (хребет овальной формы размером 40 на 50 км) высотой достигают 1200 м. Со всех сторон отходят цепочки менее высоких гор. Главный фон рельефа Мурманска создают пологие возвышенности, в пределах которых воздымаются невысокие горы, гряды и холмы. В многочисленных тектонических разломах расположились реки и озера. По берегам Баренцева моря, особенно в западной части Мурманского берега расположились многочисленными морскими заливами – фьорды.

Значительные по площади низменности представлены и в материковой части Мурманской области. Это Нотозерская низина и полоса Лотто-Тулумских низин на северо-западе, Ковдозерская низина, расположенная на самом юге области, и широкая так называемая Южно-Кольская низменность, которая, продолжаясь на восток, сливается с Терской низиной.

Ввиду того, что горы в Мурманской области имеют не большую высоту и ограниченные размеры по горизонтали, они не прикрывают город от атмосферных фронтов и циклонов, а наоборот способствуют накоплению и задержке облачности на ее склонах, что приводит на наветренных склонах к более частому и продолжительному выпадению осадков. Кроме того, горный рельеф сам по себе приводит к тому, что на его склонах наблюдаются черты местного горного климата.

### 1.3 Гидрологический режим Мурманской области

Густота речной сети в Мурманской области значительна. Общая протяженность русел рек превышает 50 тыс. км. Реки относятся к бассейну Белого и Баренцева морей. Почти все реки имеют меридиональное направление течения, в широтном течет только одна крупная река – Поной.

Все реки делятся на 4 основные группы:

- полуравнинные (Поной, Варзуга, Стрельна),
- реки-каналы (Нива, Варзина, Колвица),
- реки озерного типа (большинство рек: Восточная Лица, Рында, Умба, Дроздовка),
- реки горного типа (Малая Белая, Куна).

Основным источником питания рек Кольского п-ова служат талые воды (до 60% годового стока). Весенние половодья длятся 2–2,5 месяца (май – июнь), после чего реки сильно мелеют. Уровень воды в них зависит от летних дождей. Ледостав на реках длится до 7 месяцев, устойчивый ледовый покров – 150 – 210 дней в году. Вскрытие рек обычно происходит в мае.

В ноябре – апреле температура воды в реках Мурманской области – около точки замерзания, в течение мая – июля она повышается, достигая максимума к концу июля (до 19 – 21 °С), после чего начинает понижаться. Крупные реки прогреваются меньше, чем мелкие.

В Мурманской области находится 105 593 озера с площадью водного зеркала более 0,01 км<sup>2</sup>, из них 15712 – сточные. Площадь озер Мурманской области составляет 917,9 тыс. га.

По происхождению озера делятся на две основные группы – ледниковые и тектонические.

Большинство озер области – это лежащие в многочисленных глубоких котловинах тектонического происхождения бессточные водоемы протяженной формы со сложной береговой конфигурацией и глубинами

свыше 25 м, среди них крупнейшие – Имандра (глубина – до 67 м), Умбозеро (до 115 м), Ловозеро (до 36 м).

Термический режим характеризуется короткой продолжительностью безледоставного периода (в среднем на малых озерах – 125–140, на больших – 120 – 135 дней). Поскольку за теплый период южные районы области получают тепла в среднем на 10,5 ккал больше, чем северные, и на 4,2 ккал больше, чем центральные, на северных озерах период открытой воды на 8 дней короче, чем на южных.

Замерзают озера в конце октября – начале ноября, вскрываются в конце мая – июне, в отдельные годы – в июле. Несмотря на запаздывание вскрытия по сравнению с озерами северо-запада, термический максимум наступает одновременно: в конце июля – начале августа. Процесс прогревания более интенсивен за счет круглосуточного поступления солнечной радиации в полярный день. С середины августа начинается понижение температуры (к началу сентября – до 10 – 12, иногда до 8 °С), к первой половине октября достигая при 4 °С состояния гомотермии (однородности температуры воды по всей глубине водоема). [3]

Болота – характерная черта ландшафта Мурманской области. Они составляют около 40% площади Мурманской области, что объясняется мягким влажным климатом, свойствами почвы, легко насыщающейся водой, и рельефом, способствующим застою поверхностных и грунтовых вод.

Наиболее заболочены восточная и северо-восточная части Мурманской области, но существует и локальная концентрация (около 60%) в юго-восточной части. Болота занимают не только впадины, но и широкие плоские равнины, встречаются на пологих склонах и даже на вершинах гор.

Болота и озера служат и аккумуляторами осадков, и регуляторами стока.

Мурманская область омывается на севере водами Баренцева моря, на юге и юго-востоке — водами Белого моря.

Ледовый режим Баренцева моря формируется под воздействием Атлантического и Северного Ледовитого океанов. Благодаря притоку теплых

атлантических вод, приносимых системой течений Гольфстрима, Баренцево море практически никогда (даже в самые суровые зимы) не покрывается полностью льдом.

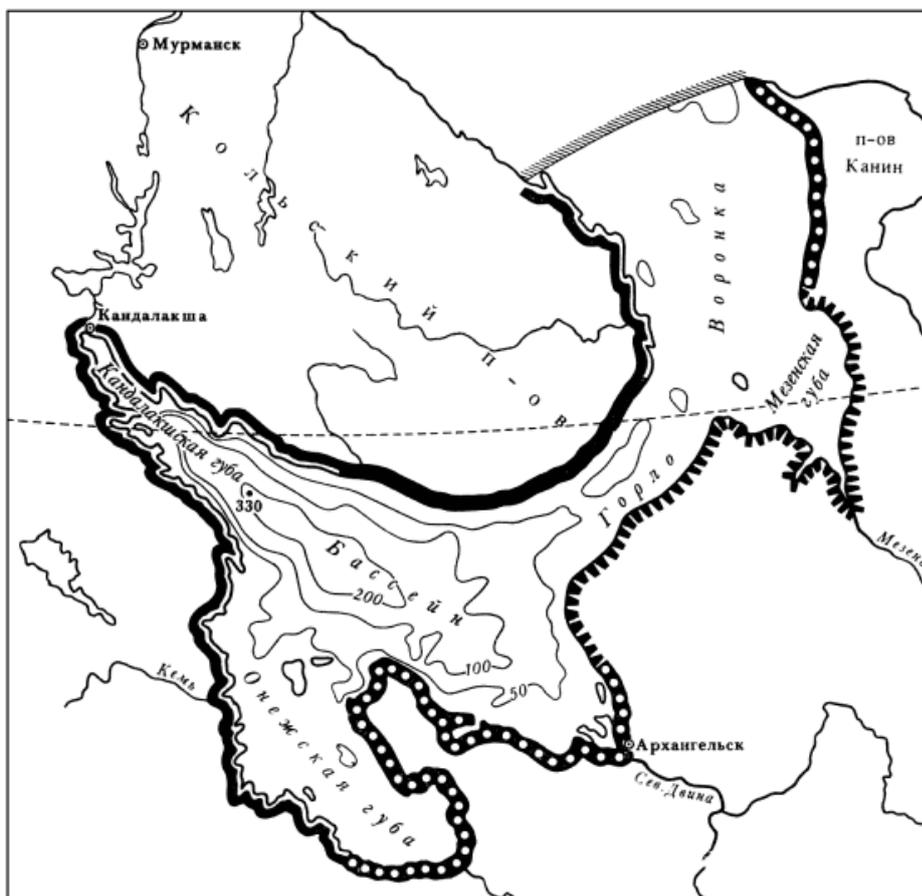


Рисунок 2. – Рельеф дна Белого моря и обозначения его частей.

Белое море — одно из холодных арктических морей, что связано не только с его положением в высоких широтах, но и протекающими в нем гидрологическими процессами. Распределение температуры воды на поверхности и в толще моря характеризуется большим разнообразием от места к месту и значительной сезонной изменчивостью. Зимой температура воды на поверхности равна температуре замерзания и имеет порядок  $-0,5—0,7^{\circ}$  в заливах, до  $-1,3^{\circ}$  в Бассейне и до  $-1,9^{\circ}$  в Горле и северной части моря (см. рис.2).

В связи с удаленностью Белого от Мурманска оно практически не оказывает влияния на климат в городе.

## 1.4 Синоптические особенности Мурманской области

По классификации Алисова Б. П. [6], Мурманская область относится к атлантико-арктической зоне умеренного пояса. Для этой зоны характерно преобладание воздушных масс арктического и атлантического происхождения, а также усиление циклонических процессов в холодную (октябрь — апрель) и ослабление их в теплую (май — сентябрь) часть года.

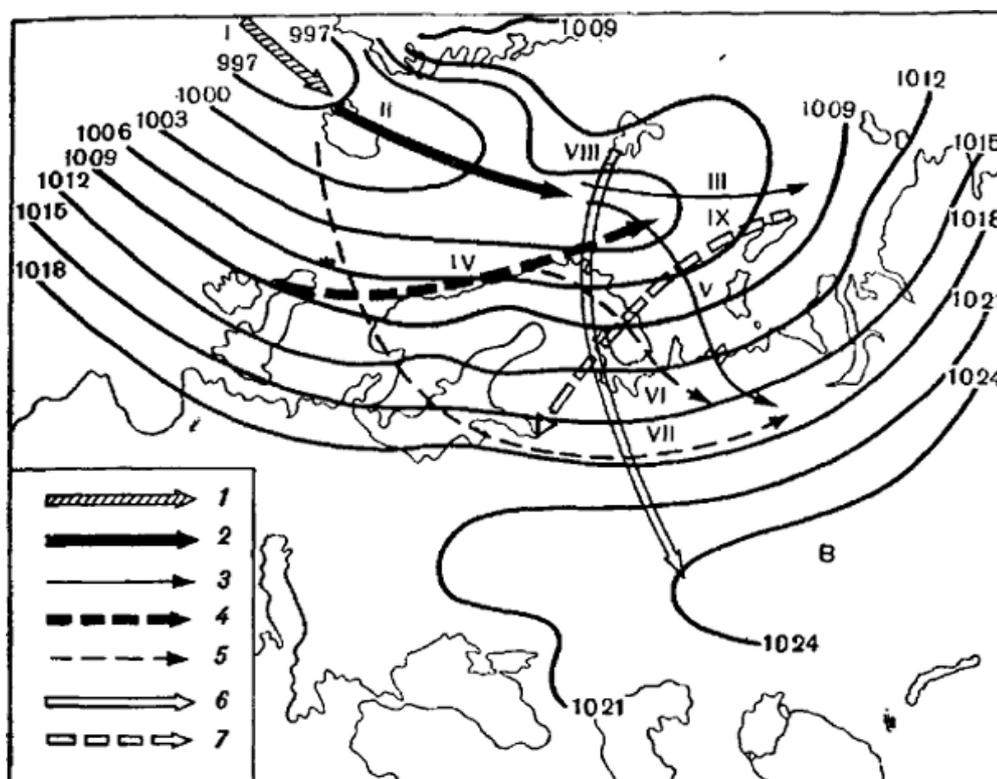


Рисунок 3. – Преобладающие траектории циклонов (I—VII) и антициклонов (VIII, IX), их повторяемость (число случаев). Январь.

В холодной половину года над акваторией Баренцевым моря преобладает циклоническая деятельность. На рисунках 3 и 4 представлены преобладающие траектории перемещения циклонов и антициклонов и их повторяемость по А. С. Звереву [7] для января. Как следует из их анализа, из района Исландского минимума циклоны смещаются на восток через Норвежское на Баренцево море.

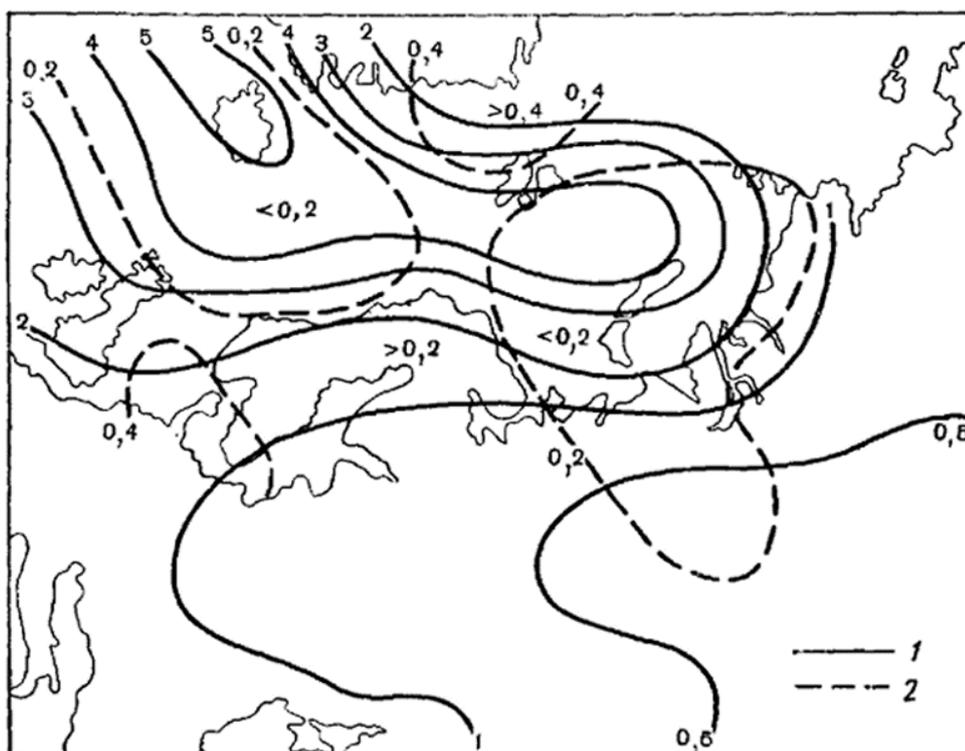


Рисунок 4. – Средняя многолетняя повторяемость (число случаев) развивающихся циклонов (1) и антициклонов (2). Январь.

Перемещение циклонов по данным траекториям обуславливает вынос теплого атлантического воздуха и значительное потепление. Значительные осадки при этом не выпадают.

Реже атлантические циклоны смещаются с южной составляющей. В теплых секторах таких циклонов обычно наблюдается существенное потепление, а в тыловых частях в арктическом воздухе – зарядовая обстановка с периодическим ливневым выпадением снега, иногда, с грозами [9]. Более устойчивая погода, с небольшими морозами и небольшими осадками наблюдается при прохождении циклонов по траектории IV.

В Мурманской области самые сильные морозы наблюдаются зимой и весной при вхождении антициклонов с Карского моря к юго-западу по траектории IX.

В теплый период (май-сентябрь) циклоническая деятельность в районе Мурманской области и над Баренцевым морем ослабевает. На рисунках 5 и 6

представлены преобладающие траектории перемещения циклонов и антициклонов и их повторяемость для июля.

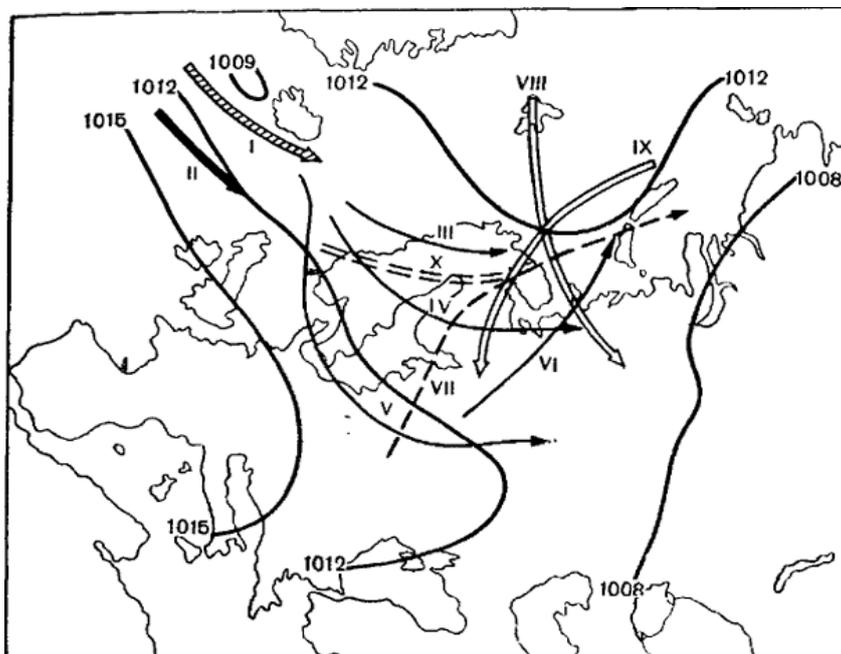


Рисунок 5. – Преобладающие траектории циклонов (I—VII) и антициклонов (VIII, X), их повторяемость (число случаев). Июль.

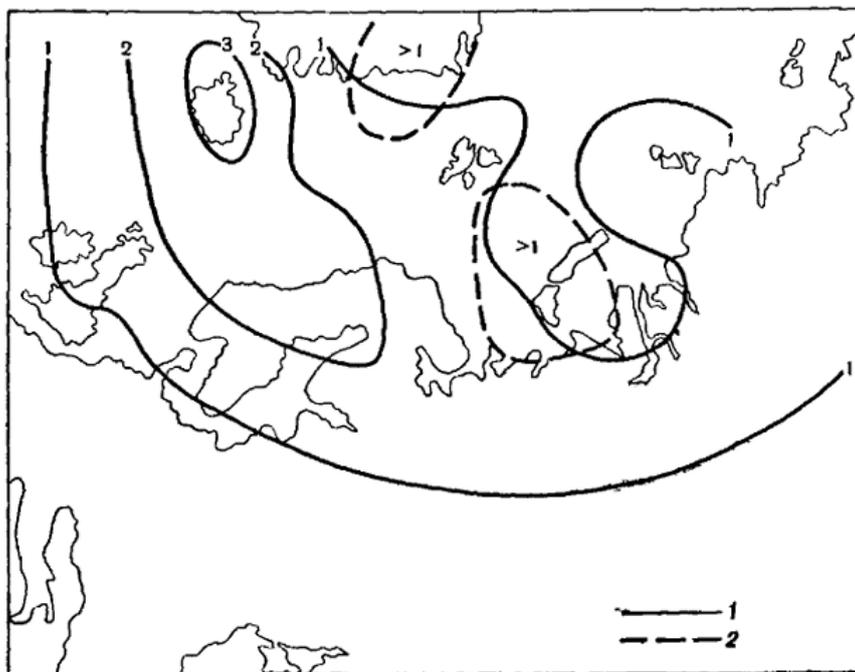


Рисунок 6. – Средняя многолетняя повторяемость (число случаев) развивающихся циклонов (1) и антициклонов (2). Июль.

Атлантические циклоны смещаются к западу по более южным траекториям {III, IV и V); увеличивается вероятность южных циклонов, смещающихся к северу по траекториям VI и VII. Траектории антициклонов VIII и IX в июне имеют примерно такую же повторяемость, как и в январе, однако скорость их перемещения к юго-востоку или юго-западу в июле меньше, чем в январе, и они в районе Мурманской области сравнительно часто становятся малоподвижными.

При прохождении циклонов по траекториям IV, V и VI, т. е. южнее и юго-восточнее Мурманской области, наблюдается адвекция воздуха с Баренцева моря, облачная или пасмурная прохладная погода с не большими осадками. При перемещении циклонов по траекториям III и VII в районе Мурманской области в теплых секторах этих циклонов протекает очень теплый континентальный воздух, который вызывает значительное потепление до 20—30°.

### 1.5 Климатические особенности Мурманской области

Вследствие особенностей своего физико-географического положения климат Мурманской области формируется в условиях малого количества солнечной радиации, под воздействием влияния Гольфстрима и северных морей, а также не только западного, но и восточного переноса воздушных масс [1, 10].

Относительно высокие для данной географической широты среднегодовые температуры обусловлены влиянием тёплого течения Гольфстрим [10].

Под влиянием тёплого морского воздуха в атлантических циклонах, проходящие через северные районы Скандинавии, и частые вторжения арктического воздуха с Северного Ледовитого океана придают погоде большую неустойчивость [10].

Как правило, средняя температура самых холодных месяцев января и февраля не опускается ниже  $-11\div-13^{\circ}\text{C}$ . Средняя температура июля постепенно растет от  $+9\div+11^{\circ}\text{C}$  на побережье до  $+14^{\circ}\text{C}$  в центральных районах полуострова. Отрицательные температуры наблюдаются 200-240 дней в году [1].

Кольский полуостров принадлежит к районам избыточного увлажнения. Годовое количество осадков доходит вплоть до 1000 мм в горах, 600-700 мм на Мурманском побережье и 500-600 мм в иных районах. Максимальное число осадков выпадает в летние и осенние месяцы, наименьшее - в весенние. Порой снегопады бывают и в июне, и в августе [1].

Отличительная особенность полярных широт: полярный день, который длится 60 суток – в летний сезон, и полярная ночь в течение 44 дней – в середине зимы. На широте Мурманска полярная ночь продолжается 44 дня. В Мурманске летом солнце не уходит за горизонт в течение 60 суток.

## 2 Анализ многолетних рядов наблюдений температуры воздуха и количества осадков

### 2.1 Выбор пунктов наблюдений

Для исследования климатических изменений температуры воздуха и количества осадков в городе Мурманск необходимо выбрать метеорологические станции, данные которых отражают погодные условия вблизи и на периферии Мурманска.

На рисунке 7 показано расположение метеорологических станций, а их названия и координаты представлены в таблице 1.

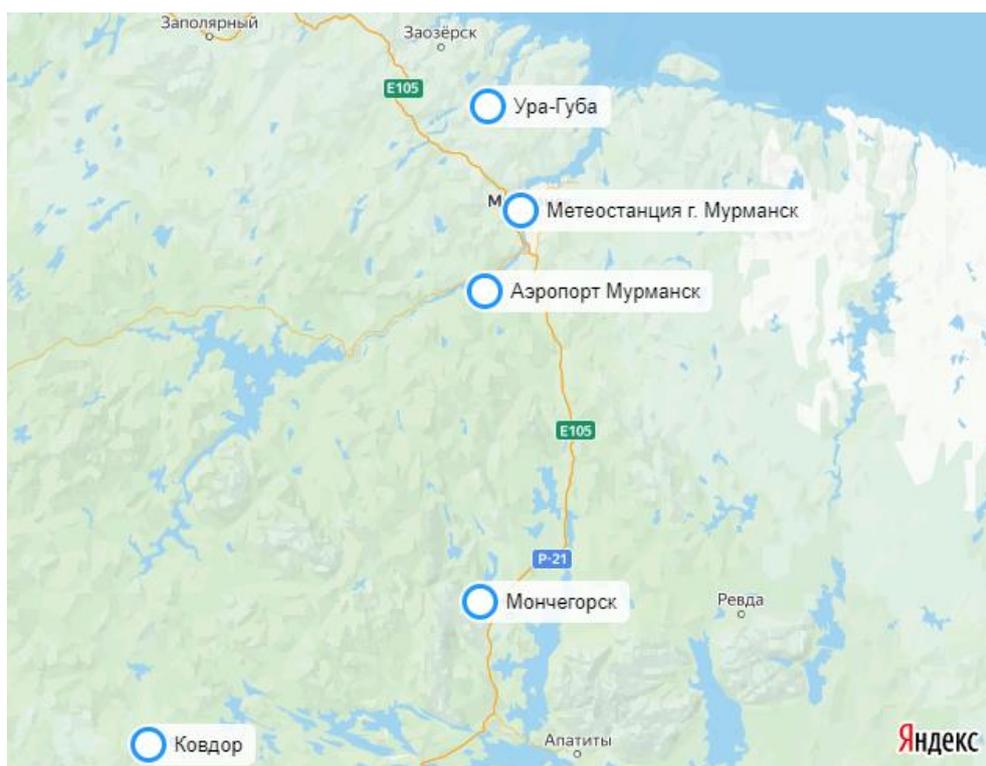


Рисунок 7. – Расположение пунктов наблюдений в Мурманской области

Метеостанция в городе Мурманск находится в центре города, если так можно сказать в отношении данного города, поскольку город, как было сказано выше, вытянут вдоль Кольского залива.

Таблица 1 – Название и координаты станций в Мурманской области

| Станция | Наименование      | Продолжительность наблюдений, гг | Кол-во лет | Широта, град | Долгота, град | Высота над уровнем моря, м |
|---------|-------------------|----------------------------------|------------|--------------|---------------|----------------------------|
| 22113   | Мурманск          | 1918-2022                        | 105        | 68.97        | 33.05         | 51                         |
| 22115   | Мурманск аэропорт | 1959-2022                        | 64         | 67.78        | 32.75         | 81                         |
| 22018   | Ура-Губа          | 1953-2022                        | 70         | 69.28        | 32.80         | 16                         |
| 22204   | Ковдор            | 1959-2022                        | 64         | 67.33        | 30.31         | 246                        |
| 22212   | Мончегорск        | 1969-2022                        | 54         | 67.93        | 32.95         | 132                        |

Международный аэропорт Мурманск расположен к юго-западу в 24 км от центра города, в городском поселении Мурмаши Мурманской области.

Станция в Ура-Губе располагается на побережье губы Ура, практически на самом севере Кольского полуострова, расстояние по прямой 37 км на северо-запад от столицы региона.

Метеорологическая станция в Мончегорске находится в 115 км к югу от Мурманска. Мончегорск расположен на северном склоне горного массива Мончетундра, на берегу озёр Имандра и Лумболка.

Город Ковдор находится в 188 км юго-западнее Мурманска. Ковдор расположен на склонах возвышенности Мангселькя в бассейне реки Ковдоры.

Многолетние данные о средней месячной и годовой температуре приземного воздуха и данные о месячных и годовых суммах выпавших осадков на 5 станциях, расположенных в Мурманской области взяты с сайта «Погода и климат».

## 2.2 Методика оценивания однородности и стационарности

Для исследования необходимо оценить однородность эмпирических распределений метеорологических характеристик, которая может быть нарушена из-за аномальных максимальных и минимальных значений. Для проверки однородности применяются критерии резко отклоняющихся экстремальных значений в эмпирическом распределении: критерии Диксона и Смирнова-Граббса.

Статистики критериев Диксона рассчитываются на основании эмпирических данных по следующим формулам:

а) для максимального члена ранжированной в возрастающем порядке выборки ( $Y_n$ ):

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

$$D2_n = (Y_n - Y_{n-1}) / (Y_n - Y_2), \quad (2)$$

$$D3_n = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_2), \quad (3)$$

$$D4_n = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_3), \quad (4)$$

$$D5_n = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_1), \quad (5)$$

б) для минимального члена ранжированной в возрастающем порядке выборки ( $Y_1$ ):

$$D1_1 = (Y_1 - Y_2) / (Y_1 - Y_n), \quad (6)$$

$$D2_1 = (Y_1 - Y_2) / (Y_1 - Y_{n-1}), \quad (7)$$

$$D3_1 = (Y_1 - Y_3) / (Y_1 - Y_{n-1}), \quad (8)$$

$$D4_1 = (Y_1 - Y_3) / (Y_1 - Y_{n-2}), \quad (9)$$

$$D5_1 = (Y_1 - Y_3) / (Y_1 - Y_n), \quad (10)$$

где:  $n$  – объем выборки.

Статистика критерия Смирнова-Граббса для максимального члена ранжированной последовательности ( $Y_n$ ) рассчитывается по формуле:

$$G_n = (Y_n - Y_{cp}) / \sigma_Y, \quad (11)$$

и для минимального ( $Y_1$ ):

$$G_1 = (Y_{cp} - Y_1) / \sigma_Y, \quad (12)$$

где:  $Y_{cp}$ ,  $\sigma_Y$  - среднее значение и среднее квадратическое отклонение анализируемой выборки, определяемые по формулам:

$$Y_{cp} = \sum Y_i / n, \quad (13)$$

$$\sigma^2_Y = \sum (Y_i - Y_{cp})^2 / (n - 1), \quad (14)$$

где:  $\sigma^2_Y$  - дисперсия.

Оценивание однородности состоит в сравнении расчетного значения статистики, полученной по эмпирическим данным, с ее табличным критическим значением при заданном уровне значимости, объеме выборки, коэффициентах автокорреляции и асимметрии [11].

Коэффициенты асимметрии  $C_s$  и автокорреляции  $r(1)$  определяются по формулам:

$$C_s = \sum (Y_i - Y_{cp})^3 / n \sigma^3 \quad \text{или} \quad (15)$$

$$\tilde{C}_s = \left[ n \sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3 \right] / \left[ \tilde{C}_v^3 (n-1)(n-2) \right] \quad (15')$$

$$r(1) = \sum (Y_i - Y_{cp1})(Y_{i+1} - Y_{cp2}) / n \sigma_1 \sigma_2 \quad \text{или} \quad (16)$$

$$r(1) = \sum (Y_i - Y_{cp1})(Y_{i+1} - Y_{cp2}) / \sqrt{(\sum (Y_i - Y_{cp1})^2 \sum (Y_{i+1} - Y_{cp2})^2)}, \quad (16')$$

где:  $C_v$  - коэффициент вариации, равный  $C_v = \sigma_Y / Y_{cp}$  и  $k_i = Y_i / Y_{cp}$ .

$$Y_{cp1} = \sum_{n} Y_i / n,$$

2

$n-1$

$$Y_{cp2} = \sum_{1} Y_i / n.$$

1

После вычисления  $C_s$  и  $r(1)$  необходимо оценить их статистическую значимость. Методика оценивания подробно описана в [11].

При оценивании стационарности средних значений и дисперсий применяются критерии Стьюдента и Фишера. Для этого временной ряд разбивается на две или несколько подвыборок одинаковой или разной длины, причем границы разбиения желательно связать с датами предполагаемого нарушения стационарности. По каждой подвыборке вычисляются значения средних ( $Y_{cp\ j}$ ) и дисперсий ( $\sigma_j^2$ ), которые используются для получения расчетных значений статистики Фишера:

$$F = \sigma_j^2 / \sigma_{j+1}^2 \quad (17)$$

при  $\sigma_j^2 > \sigma_{j+1}^2$ , где  $\sigma_j^2$ ,  $\sigma_{j+1}^2$  – соответственно дисперсии двух следующих друг за другом подвыборок ( $j$  и  $j+1$ ) объемом  $n_1$  и  $n_2$ .

Гипотеза о стационарности дисперсий принимается, если расчетное значение статистики меньше критического. Критические значения статистики Фишера  $F^*$  получены методом статистических испытаний и приведены в [11].

Расчетное значение статистики критерия Стьюдента для оценивания стационарности определяется по формуле:

$$t = \frac{Y_{cp\ I} - Y_{cp\ II}}{\sqrt{n_1 \sigma_I^2 + n_2 \sigma_{II}^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 2)}{n_1 + n_2}} \quad (18)$$

где:  $Y_{cp\ I}$ ,  $Y_{cp\ II}$ ,  $\sigma_I^2$ ,  $\sigma_{II}^2$  – средние значения и дисперсии двух последовательных выборок,  $n_1$  и  $n_2$  – объемы выборок.

Критические значения статистики Стьюдента  $t'_\alpha$  определяются при равных объемах выборок по формуле:

$$t'_\alpha = C_t t_\alpha, \quad (19)$$

Оценивание стационарности по критерию Стьюдента осуществляется также путем сравнения расчетных и критических значений статистик. Если расчетное значение больше критического, гипотеза о стационарности принимается.

### 2.3 Оценка однородности и стационарности температур воздуха

Проверка однородности рядов наблюдений температуры воздуха осуществлено по методике, описанной в п. 2.2.

Первоначально были построены хронологические графики температур воздуха за январь и июль для выбранных метеостанций, представлены на рисунках 8-17.



Рисунок 8. – Хронологический график средней температуры за январь для станции Мурманск

Визуальный анализ графика 8 показал, что в Мурманске в 1985 г. наблюдался резко выраженный минимум, который приблизительно на 3° ниже экстремальных значений в другие годы за рассматриваемый период. За всё время наблюдений прослеживается тенденция к уменьшению температуры воздуха.



Рисунок 9. – Хронологический график средней температуры за январь для станции Мурманск аэропорт

При рассмотрении рисунка 9 можно заметить два минимума температуры в 1985 и 2016 гг, которые выделяются из всего ряда наблюдений в аэропорту Мурманск. В период 1959-2022 гг. наблюдается тенденция к увеличению температуры воздуха.

На графике, изображенном на рисунке 10 средняя температура в январе на метеорологической станции Ура-Губа имеет тенденцию на повышение температуры.

По данным графика 11 в 1985 году температура воздуха в Мончегорске составила  $-24,7^{\circ}$ , что является абсолютным минимумом за весь наблюдаемый период и на  $5^{\circ}$  ниже экстремальных значений за все остальные годы. На протяжении всего ряда можно отметить тенденцию температуры на повышение.



Рисунок 10. – Хронологический график средней температуры за январь для станции Ура-Губа



Рисунок 11. – Хронологический график средней температуры за январь для станции Мончегорск

Анализируя график средней температуры воздуха за январь на станции в г. Ковдор (рис. 12), можно отметить тенденцию на повышение температуры. Ярко выраженных экстремумов не наблюдается.



Рисунок 12. – Хронологический график средней температуры за январь для станции Ковдор



Рисунок 13. – Хронологический график средней температуры за июль для станции Мурманск

Визуальный анализ графика 13 показал, что в Мурманске в 1960 г. наблюдался максимум, а в 1968 г. – минимум в период наблюдений с 1918 года по 2022 год. За всё время наблюдений прослеживается тенденция к увеличению температуры воздуха.



Рисунок 14. – Хронологический график средней температуры за июль для станции аэропорт Мурманск



Рисунок 15. – Хронологический график средней температуры за июль для станции Ура-Губа

При рассмотрении рисунка 14, можно сделать вывод, что максимумом температуры в аэропорту Мурманска является значение  $20,1^{\circ}$  в 1960 г, и минимумом –  $8,8^{\circ}$  в 1968 г. В период 1959-2022 гг. наблюдается тенденция к увеличению температуры воздуха.

На графике, изображенном на рисунке 15 средняя температура в июле на метеорологической станции Ура-Губа имеет тенденцию на повышение

температуры. Наблюдаемый максимум за рассматриваемый период составил  $18,8^{\circ}$  в 1960 г, а минимум –  $7,6^{\circ}$  в 1968 г.



Рисунок 16. – Хронологический график средней температуры за июль для станции Мончегорск



Рисунок 17. – Хронологический график средней температуры за июль для станции Ковдор

По данным графика 16 в 2018 году температура воздуха в Мончегорске составила  $18,6^{\circ}$ , что является абсолютным максимумом за весь наблюдаемый

период. Минимум наблюдался в 2015 году и он составил  $10,6^{\circ}$ . На протяжении всего ряда можно отметить тенденцию температуры на повышение.

Анализируя график средней температуры воздуха за июль на станции в г. Ковдор (рис. 17), можно отметить тенденцию на повышение температуры. Минимум приходится на 1968 год, а максимум на 2018 год.

По формулам (1)-(12) произведены расчеты статистик по критериям Диксона и Смирнова-Граббса, оценки однородности приведены в Табл. 2.

Таблица 2 – Оценки однородности эмпирического распределения температур воздуха для метеостанций за январь и июль

| Название метеостанции | max    |    | min |    | max  |    | min |    |
|-----------------------|--------|----|-----|----|------|----|-----|----|
|                       | Д      | СГ | Д   | СГ | Д    | СГ | Д   | СГ |
|                       | Январь |    |     |    | Июль |    |     |    |
| Мурманск              | +      | +  | +   | +  | +    | +  | +   | +  |
| Мурманск аэропорт     | +      | +  | +   | +  | +    | +  | +   | +  |
| Ура-Губа              | +      | +  | +   | +  | +    | +  | +   | +  |
| Мончегорск            | +      | +  | +   | +  | -    | -  | -   | -  |
| Ковдор                | +      | +  | +   | +  | +    | +  | +   | +  |

Выводов о неоднородности временных рядов получено 4. Все они относятся к станции Мончегорск в теплое время года. Выводы об неоднородности сделаны как для минимальных, так и максимальных экстремумов.

Оценки стационарности на тех же 5 станциях по критериям Фишера и Стьюдента приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Оценки стационарности эмпирического распределения температур воздуха для метеостанций за январь и июль

| Название метеостанции | Ф      | Ст | Ф    | Ст |
|-----------------------|--------|----|------|----|
|                       | Январь |    | Июль |    |
| Мурманск              | +      | +  | +    | +  |
| Мурманск аэропорт     | +      | +  | +    | +  |
| Ура-Губа              | +      | +  | -    | +  |
| Мончегорск            | +      | +  | +    | +  |
| Ковдор                | +      | +  | +    | +  |

Проверка стационарности дисперсий и средних значений по критериям Фишера и Стьюдента показала, что нестационарность наблюдается только в июле на станции Ура-Губа (по критерию Фишера).

#### 2.4 Оценка однородности и стационарности количества осадков

Проверка однородности временного ряда среднегодового количества осадков было осуществлено по методике, описанной в п. 2.2.

Первоначально были построены хронологические графики годовых сумм осадков для выбранных метеостанций, которые представлены на рисунках 18-22.

Исходя из данных графика (рис.18) в г. Мурманск наблюдался резко выраженный максимум в 2020 году, который почти на 200 мм больше всех остальных экстремальных значений.

В аэропорту Мурманск также присутствует максимум, значение которого больше экстремальных значений в другие годы, примерно на 100 мм.



**Рисунок 18 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции Мурманск**



**Рисунок 19 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции аэропорт Мурманск**



Рисунок 20 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции Ура-Губа



Рисунок 21 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции Мончегорск

Анализируя график годовых сумм осадков на станции в Ура-Губе (рис. 20), можно отметить тенденцию на понижение количества осадков в период 1961-1986 гг, а после 1986 г. наблюдается тенденция, наоборот, к его увеличению.

На всех 5 станциях по выбранным периодам наблюдения годовые суммы осадков в среднем имеют тенденцию к повышению.



Рисунок 22 – Хронологический график годовых сумм осадков для станции Ковдор

Проверка однородности экстремумов количества осадков по критериям Диксона и Смирнова-Граббса приведены в табл. 6.

Таблица 6 – Оценки однородности эмпирического распределения годовых сумм осадков для метеостанций

| Название метеостанции | max |    | min |    |
|-----------------------|-----|----|-----|----|
|                       | Д   | СГ | Д   | СГ |
| Мурманск              | +   | +  | +   | +  |
| Мурманск аэропорт     | +   | +  | +   | -  |
| Ура-Губа              | +   | +  | +   | +  |
| Мончегорск            | +   | +  | +   | -  |
| Ковдор                | +   | +  | +   | +  |

Выводов о неоднородности временных рядов получено 2 (по критерию Смирнова-Граббса). Они относятся к станциям Мурманск (аэропорт) и Мончегорск для минимальных экстремумов.

Оценки стационарности на тех же 5 станциях по критериям Фишера и Стьюдента приведены в табл. 7.

Таблица 7 – Оценки стационарности временных рядов годовых сумм осадков

| Название метеостанции | Ф | Ст |
|-----------------------|---|----|
| Мурманск              | + | +  |
| Мурманск аэропорт     | + | +  |
| Ура-Губа              | + | +  |
| Мончегорск            | + | +  |
| Ковдор                | + | +  |

Выводов об отсутствии стационарности дисперсий и средних значений временных рядов для выбранных метеостанций не сделано.

### 3 Оценивание современных климатических изменений температуры воздуха и осадков в г. Мурманск

#### 3.1 Статистические методы оценивания современных климатических изменений

Климатическая система не является стабильной и постоянно изменяется. Структуру временных рядов можно представить двумя основными видами моделей: стационарной и нестационарной. В стационарных моделях основные параметры временного ряда не изменяются во времени. Однако помимо случайных флуктуаций во временных рядах климатических характеристик могут иметь место и нестационарные составляющие, обусловленные влиянием факторов климатической системы с большими временными масштабами.

Если предположить, что нестационарные компоненты являются реакцией климатической системы на внешние воздействия, то показатели этих воздействий могут быть двух основных типов: монотонные (трендовые или циклические колебания) и ступенчатые изменения. Механизм монотонного изменения происходит в уравновешенной системе, которая почти сразу реагирует на внешние воздействия ориентации. Механизм или пусковой механизм ступенчатого изменения характеризует несбалансированную систему, способную нейтрализовать внешние воздействия ориентации или противостоять им в течение определенного периода времени до тех пор, пока их суммарный эффект не поднимет систему на новый уровень, поэтому стационарные временные ряды могут быть частным случаем сбалансированных и несбалансированных систем, существующих одновременно.

Модель линейного тренда, как это следует из названия, описывается линейной функцией рассматриваемой климатической характеристики  $Y$  от времени:

$$Y(t)=b_1t+b_0 \quad (20)$$

где  $b_1, b_0$  – коэффициенты уравнения регрессии, определяемые по формулам:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})(t_i - t_{cp})}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2} \quad (21)$$

$$b_0 = Y_{cp} - b_1 t_{cp} \quad (22)$$

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

Статистическая значимость модели линейного тренда оценивается по статистической значимости коэффициента корреляции  $R$ :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})(t_i - t_{cp})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})^2 \sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2}} \quad (23)$$

Модель ступенчатых изменений аналогична двум (или нескольким) стационарным моделям для двух (или нескольких) частей временного ряда, что характеризуется неизменностью во времени среднего значения и среднего квадратического отклонения для каждой части ряда:

$$Sr1(t1) = const1, \sigma1(t1) = const1, \quad (24)$$

$$Sr2(t2) = const2, \sigma2(t2) = const2, \quad (25)$$

где  $Sr1, \sigma1$  – среднее значение и среднее квадратическое отклонение первой части ряда при изменении  $t1$  от 1 до  $t_n$ ;  $Sr2, \sigma2$  – среднее значение и среднее квадратическое отклонение второй части ряда при изменении  $t2$  от  $t_n + 1$  до  $n$ ,  $n$  – объем ряда.

Время изменения шага ( $t_n$ ) определяется визуально или на основании дополнительной информации о факторе и дате нарушения плавности (например, изменения индекса атмосферной циркуляции, даты изменения регистрирующего устройства), а также может быть определено с помощью итерационных процедур.

## 3.2 Оценка климатических изменений температур воздуха

### 3.2.1 Оценка климатических изменений температур воздуха за январь

Был выбран ряд среднемесячных температур воздуха за январь по метеостанции Мурманск с 1918 по 2022 г. Рассчитаны основные параметров временного ряда  $T_{ср} = -10,1^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma = 3,1^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma^2 = 9,4^{\circ}\text{C}$ ,  $r(1) = 0,15$ .

Основные параметры модели линейного тренда:  $b_1 = -0,0081$ ,  $b_0 = 5,9211$ ,  $R = 0,0065$ ,  $\sigma_{\varepsilon} = 0,51$ ,  $\sigma^2_{\varepsilon} = 0,26$ . Модель линейного тренда представлена на рисунке 23.

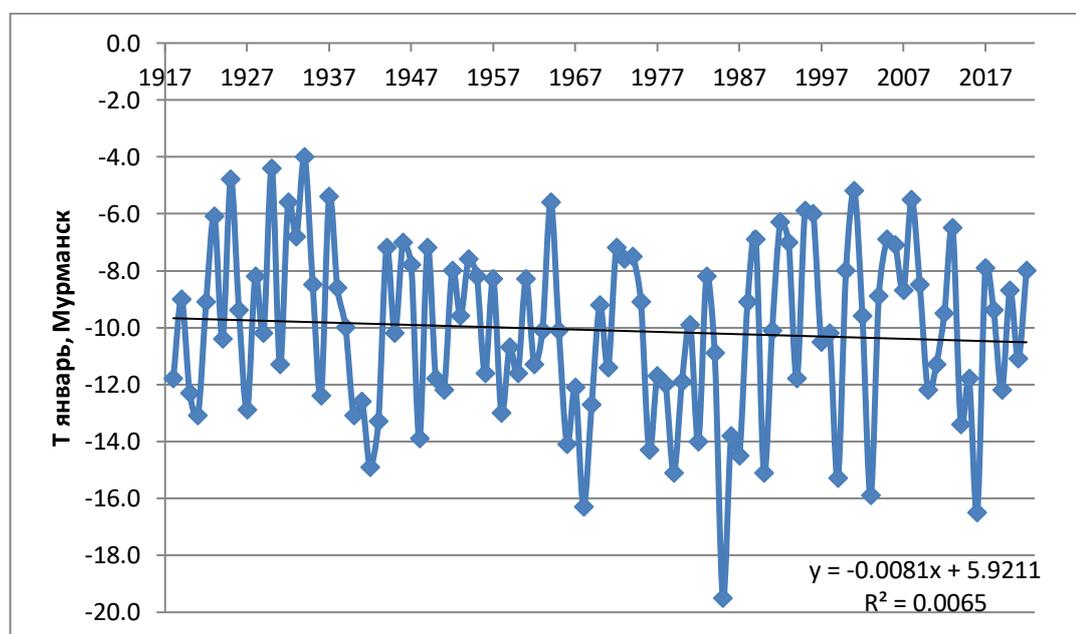


Рисунок 23 – Аппроксимация моделью линейного тренда среднегодовой температуры воздуха января для метеостанции Мурманск

Для построения модели ступенчатых изменений временной ряд разбит на два интервала со следующими параметрами:

1918-1987 гг.:  $n = 70$ ,  $Y_{ср} = -10,3^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma = 2,79^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma^2 = 7,80^{\circ}\text{C}$ .

1988-2022 гг.:  $n = 35$ ,  $Y_{ср} = -9,6^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma = 3,05^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma^2 = 9,32^{\circ}\text{C}$ .

Общее стандартное отклонение остатков ступенчатой модели составило  $\sigma = 2,92$ . Модель ступенчатых изменений представлена на рисунке 24.

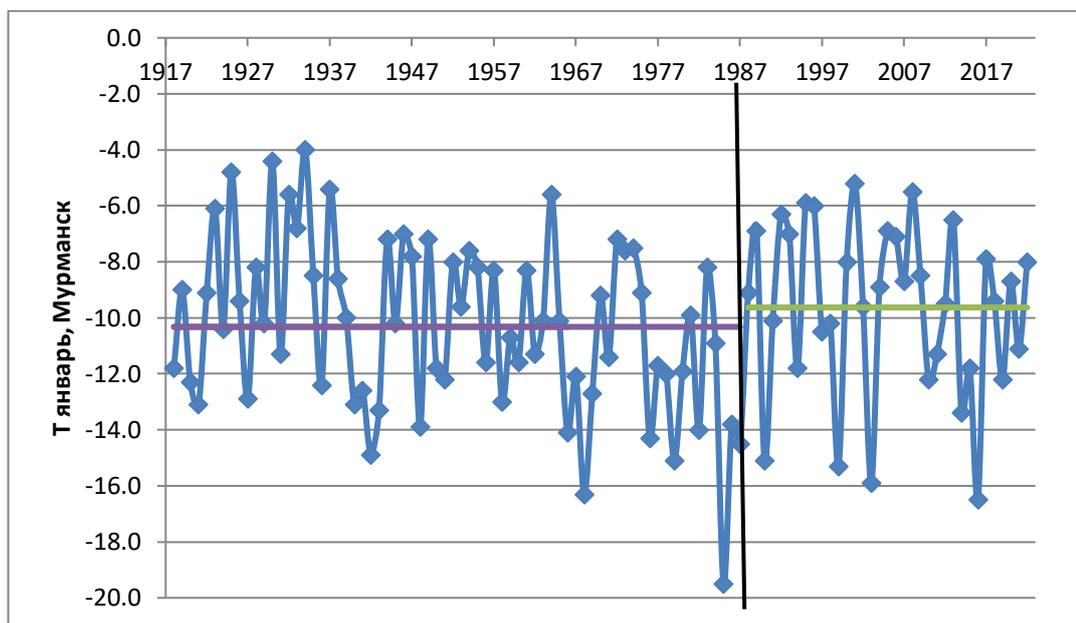


Рисунок 24 – Аппроксимация моделью ступенчатых изменений среднегодовой температуры воздуха января для метеостанции Мурманск

Таблица 8 – Результаты оценки эффективности нестационарных моделей для многолетних рядов температур января

| n   | R    | $\Delta_{гр}\%$ | $\Delta_{гар}\%$ | $\Delta_{ступ}\%$ | F <sub>гр</sub> | F <sub>гар</sub> | F <sub>ступ</sub> |
|-----|------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| 105 | 0,15 | -44,2           | 92,5             | -46,4             | 35,8            | 13062,8          | 34,7              |

Моделями статически более значимыми по критериям Фишера, при уровне значимости 5% являются все модели. Коэффициент корреляции, при значении  $R < 0,23$  не является статистически значимым.

### 3.2.2 Оценка климатических изменений температур воздуха за июль

Был выбран ряд среднемесячных температур воздуха за июль по метеостанции Мурманск с 1918 по 2022 г.

Рассчитаны основные параметров временного ряда  $T_{ср} = 13,0^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma = 2,1^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma^2 = 4,5^{\circ}\text{C}$ ,  $r(1) = 0,06$ .

Основные параметры модели линейного тренда:  $b_1 = 0,0063$ ,  $b_0 = 0,5233$ ,  $R = 0,0084$ ,  $\sigma_\varepsilon = 0,40$ ,  $\sigma^2_\varepsilon = 0,16$ . Модель линейного тренда представлена на рисунке 25.

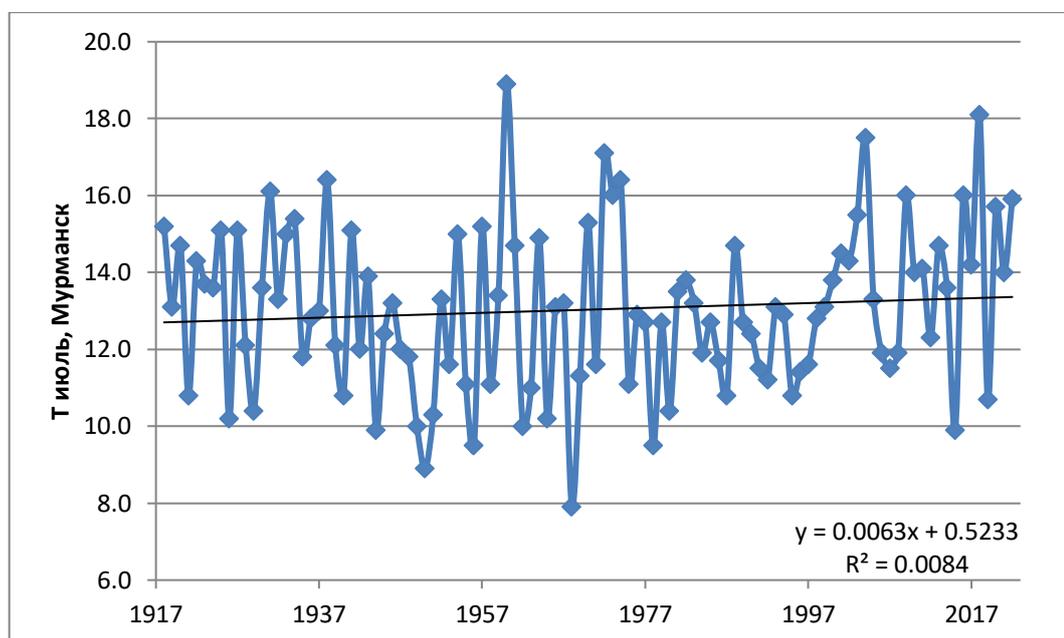


Рисунок 25 – Аппроксимация моделью линейного тренда среднегодовой температуры воздуха июля для метеостанции Мурманск

Для построения модели ступенчатых изменений временной ряд разбит на два интервала со следующими параметрами:

1918-2002 гг.:  $n = 85$ ,  $Y_{\text{ср}} = 12,8^\circ\text{C}$ ,  $\sigma = 2,03^\circ\text{C}$ ,  $\sigma^2 = 4,13^\circ\text{C}$ .

2002-2022 гг.:  $n = 20$ ,  $Y_{\text{ср}} = 14,0^\circ\text{C}$ ,  $\sigma = 2,21^\circ\text{C}$ ,  $\sigma^2 = 4,88^\circ\text{C}$ .

Общее стандартное отклонение остатков ступенчатой модели составило  $\sigma = 2,12$ .

Таблица 9 – Результаты оценки эффективности нестационарных моделей для многолетних рядов температур июля

| n   | R    | $\Delta_{\text{тр}}\%$ | $\Delta_{\text{гар}}\%$ | $\Delta_{\text{ступ}}\%$ | Fтр  | Fгар  | Fступ |
|-----|------|------------------------|-------------------------|--------------------------|------|-------|-------|
| 105 | 0,06 | 81,9                   | 92,5                    | 81,6                     | 28,2 | 162,7 | 27,4  |

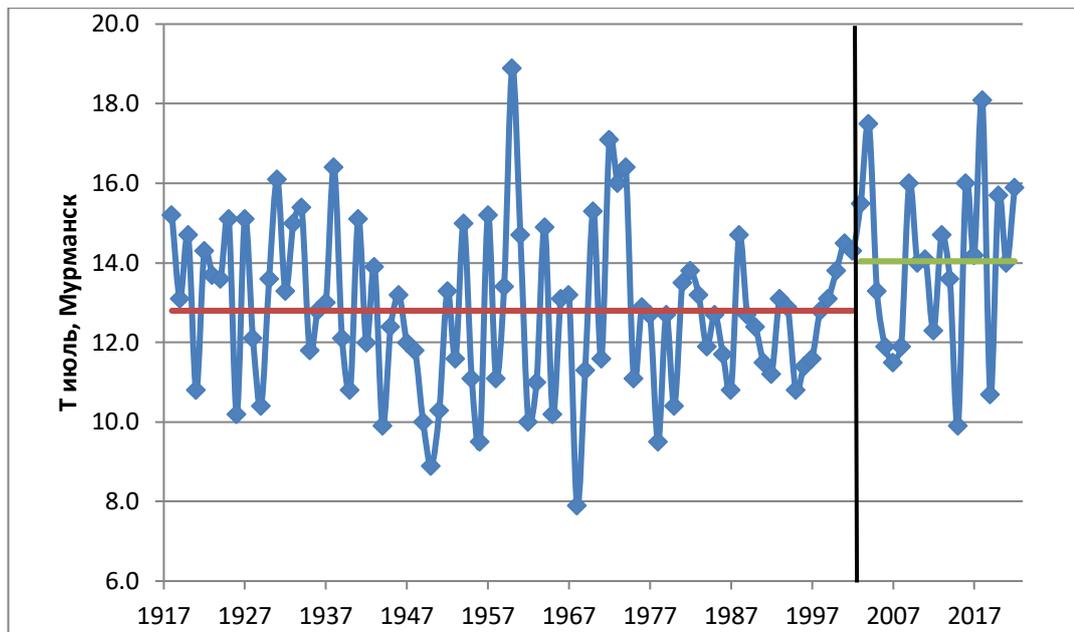


Рисунок 26 – Аппроксимация моделью ступенчатых изменений среднегодовой температуры воздуха июля для метеостанции Мурманск

После получения результатов расчёта  $\Delta_{тр}$ ,  $\Delta_{гар}$  и  $\Delta_{ступ}$ , видно, что в июле погрешности для всех моделей  $\Delta > 10\%$ . Моделями статически более значимыми по критериям Фишера, при уровне значимости 5% являются все 3 нестационарные модели.

### 3.3 Оценка климатических изменений количества осадков

Был выбран ряд среднегодовых сумм осадков по метеостанции Мурманск с 1936 по 2022 г.

Расчитаны основные параметров временного ряда  $U_{ср} = 477$  мм,  $\sigma = 104$  мм,  $\sigma^2 = 10818$  мм,  $r(1) = 0,46$ .

Основные параметры модели линейного тренда:  $b_1 = 2,4707$ ,  $b_0 = 4412,7$ ,  $R = 0,36$ ,  $\sigma_{\epsilon} = 0,33$ ,  $\sigma^2_{\epsilon} = 0,11$ . Модель линейного тренда представлена на рисунке 27.

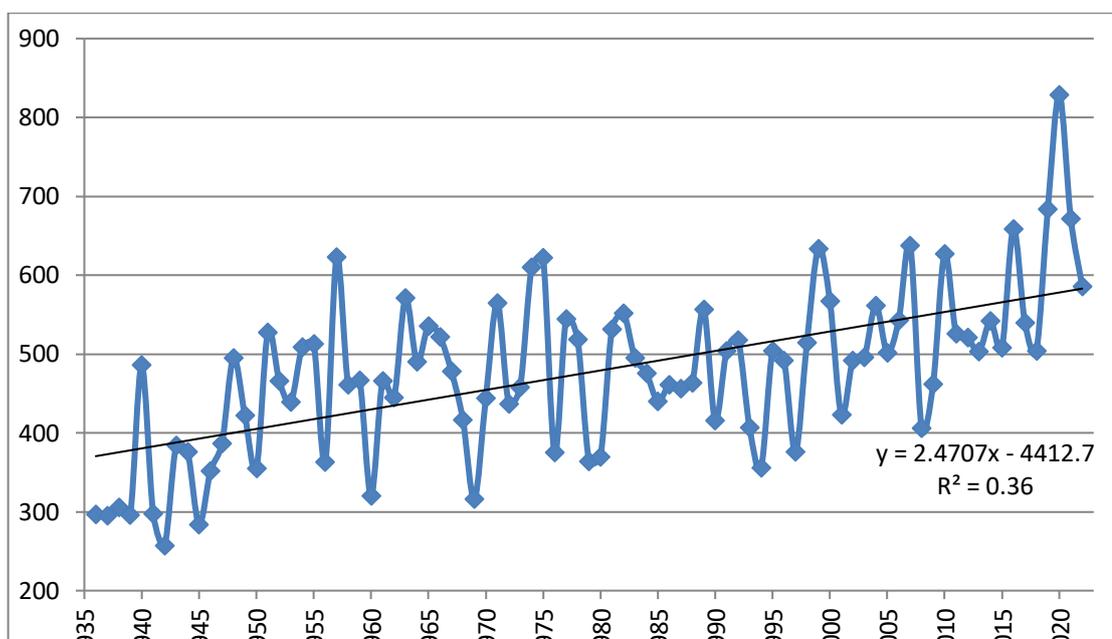


Рисунок 27 – Аппроксимация моделью линейного тренда среднегодовых сумм осадков для метеостанции Мурманск

Для построения модели ступенчатых изменений временной ряд разбит на два интервала со следующими параметрами:

1936-1969 гг.:  $n = 34$ ,  $Y_{\text{ср}} = 418,24$  мм,  $\sigma = 95,29$  мм,  $\sigma^2 = 9081,03$  мм.

1970-2022 гг.:  $n = 53$ ,  $Y_{\text{ср}} = 514,26$  мм,  $\sigma = 91,95$  мм,  $\sigma^2 = 8454,35$  мм.

Общее стандартное отклонение остатков ступенчатой модели составило  $\sigma = 93,62$ .

Таблица 10 – Результаты оценки эффективности нестационарных моделей для многолетних рядов количества осадков

| n  | R    | $\Delta_{\text{тр}}\%$ | $\Delta_{\text{гар}}\%$ | $\Delta_{\text{ступ}}\%$ | F <sub>тр</sub> | F <sub>гар</sub> | F <sub>ступ</sub> |
|----|------|------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| 87 | 0,46 | 99,3                   | 16,7                    | 99,3                     | 99717,5         | 6,9              | 97493,8           |

После получения результатов расчёта  $\Delta$  для всех моделей нам известно, что  $\Delta > 10\%$  для среднегодовых осадков Мурманска. Модели статистически более значимые по критериям Фишера, при уровне значимости 5%.

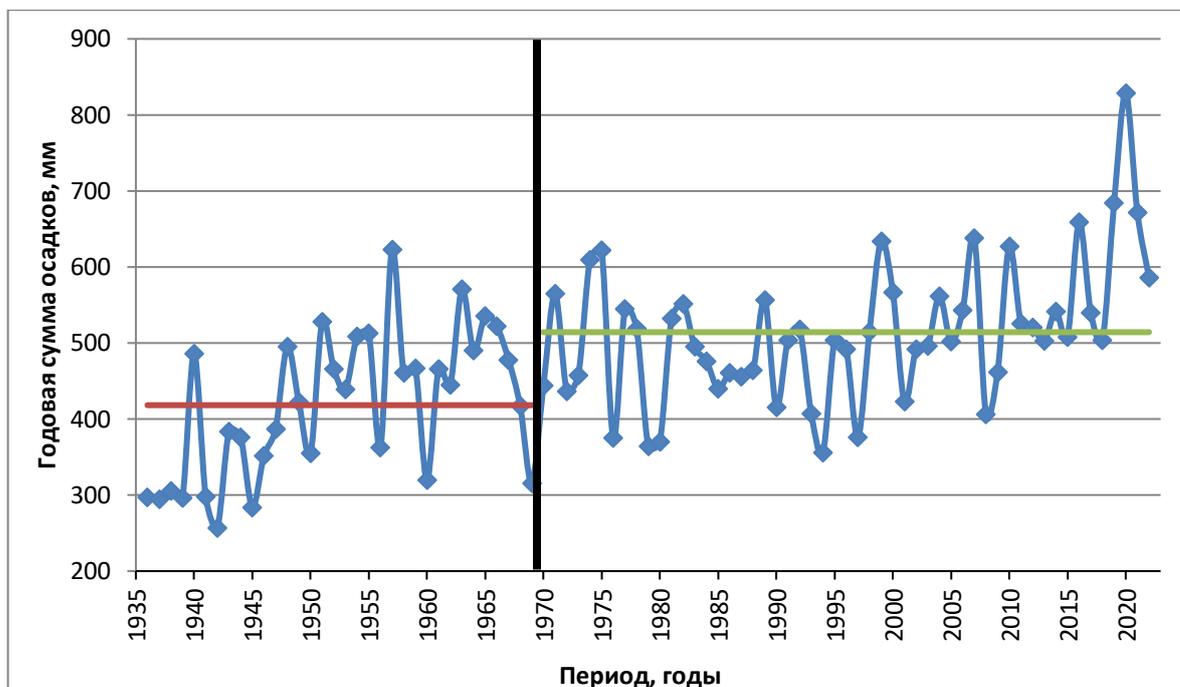


Рисунок 28 – Аппроксимация моделью ступенчатых изменений среднегодовых сумм осадков для метеостанции Мурманск

Следовательно, для описания изменения годового количества осадков в январе и июле на ст Мурманск нестационарные модели являются статистически значимыми, так как критическое значение статистики Фишера  $F=1,195$  меньше расчетного значения. Модель линейного тренда является наилучшей.

## Заключение

В настоящей работе выполнено оценивание современных климатических изменений температуры воздуха и количества осадков в г. Мурманск.

Проведен анализ физико-географических и синоптико-климатических условий Мурманской области. Основное влияние на климат Мурманска оказывает его географическое положение и влияние теплого течения Голфстрим, вследствие чего зима на всем Кольском полуострове достаточно мягкая и влажная. По мере удаления от побережья суровость климата увеличивается. Обилие водных ресурсов приводит к повышенной влажности.

Синоптические процессы в Мурманской области имеют ярко выраженный сезонный характер. В холодный период года наблюдается усиление циклонических процессов и их ослабление в теплую. Характерная черта – резкие изменения и большая неустойчивость погоды, связанная с частой сменой воздушных масс. В основном, оказывают влияние воздушные массы арктического и атлантического происхождения.

Для анализа были выбраны наблюдательные станции г Мурманска и аэропорта, а также, для сравнения, близлежащие станции, которые находятся как ближе к побережью (Ура-Губа), так и внутри полуострова (Мончегорск и Ковдор).

Было произведено оценивание однородности эмпирических распределений температур воздуха для метеостанций за январь и июль по критериям Диксона и Смирнова-Граббса и оценивание стационарности по критериям Стьюдента и Фишера. Выводы о неоднородности временного ряда по температуре сделаны для теплого времени года для Мончегорска. Вывод о нестационарности временного ряда сделаны по температуре по критерию Фишера для ст. Ура-Губа. Выводы о неоднородности временного ряда по количеству осадков по критерию Смирнова-Граббса по минимальному значению сделаны для аэропорта Мурманск и для Мончегорска. Оценивание

стационарности эмпирического распределения годовых сумм осадков для метеостанций показало, что гипотеза о стационарности не отклоняется для всех станций по двум критериям.

Проведено оценивание климатических изменений среднемесячной температуры воздуха (для января и июля) и годовой суммы осадков в городе Мурманск. Как показал анализ, для описания изменения температуры на ст. Мурманск нестационарные модели (были использованы модель линейного тренда и модель ступенчатых изменений) не являются статистически значимыми. Наилучшие результаты дает стационарная модель. При этом были отмечены следующие особенности. Согласно линейной модели за период 105 лет наблюдается слабый тренд к понижению температуры в январе, и к повышению температуры – в июле. Однако визуальный анализ показывает, что понижение температуры, которое наблюдалось до 70-80-х гг прошлого века и в январе, и в июле в дальнейшем сменилось ростом температуры. Причем моделью гармонических колебаний данные изменения не описать, т.к. понижение температуры было более пологим, чем ее рост в последние десятилетия.

Для описания изменения годового количества осадков в январе и в июле на ст. Мурманск нестационарные модели являются статистически значимыми. Для многолетних рядов количества осадков наиболее эффективной оказалась модель линейного тренда. Можно сделать вывод, что количество осадков выросло с 381мм до 584 мм в период 1918-2022 гг.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1) Исходя из физико-географических и синоптических особенностей Мурманской области – расположение на Кольском полуострове, севернее Полярного круга в субарктической зоне, обмывание водами Баренцева моря с воздействием теплого течения Гольфстрим и сильным влиянием Северного Ледовитого океана, сочетанием горного рельефа и болотистой местности,

чередованием полярного дня и полярной ночи, систематическими изменениями температуры и количества осадков, при решении народно-хозяйственных задач в данном регионе следует учитывать местные климатические особенности и влияния изменения температуры и осадков.

2) Для получения наилучших результатов в хозяйственной деятельности руководителям предприятий, с учетом решаемых задач, целесообразно в максимальной степени использовать гидрометеорологические прогнозы и рекомендации Росгидромета, заключая соответствующие договоры с его местными организациями.