



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Климатическое районирование территории Арктики»

Исполнитель Колякин Павел Павлович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Лаврова Ирина Викторовна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

« 9 » июня 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
Глава 1. Климатическое описание района исследования.	5
1.1. Общие условия климата Арктики.	6
1.2. Морской лёд и климат	8
1.3. Причины изменения климата Арктики	11
1.3.1. Антропогенный фактор потепления.	13
1.3.2. Солнечная активность как фактор потепления Арктики.	15
1.4. Радиационные условия в Арктике.....	16
1.5. Дальний перенос загрязнений в Арктику.....	17
Глава 2. Методы и данные, используемые в работе.....	18
2.1. Исходные данные.	19
2.2. Кластерный анализ, метод k-средних.	20
2.3. Метод разностной интегральной кривой.....	24
Глава 3. Районирование территории Арктики.	25
3.1. Результаты районирования территории Арктики при помощи кластерного анализа, полученные для теплого полугодия.	25
3.2. Результаты районирования территории Арктики при помощи кластерного анализа, полученные для холодного полугодия.	31
3.3. Анализ графиков разностных интегральных кривых, полученных для определения года наступления периода потепления.	37
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.	47
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	48

ВВЕДЕНИЕ

Северные регионы Земли играют важную роль в процессах, воздействующих на окружающую среду, и являются индикаторами глобальных природных изменений, в особенности изменения климата всей планеты. Изменения, наблюдающиеся в Арктике, такие как повышение температуры воздуха, деградация многолетней мерзлоты и сокращение ледяного покрова, уже показывают, что на её территории происходят наибольшие перемены по сравнению с другими регионами Земли. Поэтому Арктика является объектом пристального внимания со стороны учёных в последнее время.

Температура воздуха – это характеристика теплового состояния объекта, то есть мера средней кинетической энергии движения молекул газов, входящих в состав воздуха. Температура изменяется от места к месту, с высотой и во времени. Количественно может быть выражена в градусах Цельсия по стоградусной шкале или в Кельвинах по абсолютной шкале.

Разность средних месячных температур самого теплого и самого холодного месяцев называют годовой амплитудой температуры воздуха.

Годовая амплитуда температуры воздуха зависит от следующих факторов:

- Широта места. Годовая амплитуда температуры воздуха растет с географической широтой, так как с возрастанием широты уменьшается полуденная высота Солнца над горизонтом.
- Растительный покров. Над почвой, покрытой растительностью, годовые амплитуды температуры воздуха меньше, чем над обнаженной почвой.
- Близость моря уменьшает амплитуду годового хода температуры, с удалением от моря она увеличивается.

- Тип поверхности. Годовые амплитуды температуры воздуха над земной поверхностью обычно выше, по сравнению с водной, поскольку земля быстрее нагревается и остывает. Однако существуют местности на суше, где амплитуды температуры также могут быть низкими, если воздушные массы, приходящие в эти области, имеют морское происхождение. Аналогично, повышенные амплитуды могут наблюдаться и над океаном, если воздушные массы, приходящие в эти районы, имеют континентальное происхождение. Таким образом, условия общей циркуляции атмосферы также оказывают влияние на величину годовых амплитуд температуры. [1]

Целью работы является исследование климата Арктики по температурному режиму.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- Районировать территорию Арктики методом кластерного анализа по средней температуре воздуха у поверхности земли для теплого и холодного полугодий.
- Проанализировать полученные районы.
- Определить периоды потепления в отдельных районах Арктики.
- Сравнить средние температуры воздуха до потепления и после для холодного и теплого полугодий.

Выпускная квалификационная работа состоит из трёх глав.

В первой главе представлено климатическое описание района исследования. Рассматриваются причины изменения климата Арктики. Во второй главе описаны методы и данные, используемые в работе. В третьей главе представлены результаты районирования территории Арктики, а также произведен анализ интегральных разностных кривых и определены годы

наступления потепления в каждом выделенном районе. В заключении приведены выводы по проведенному исследованию.

Методической основой работы послужили литературные источники, справочные материалы, интернет ресурсы и методические указания.

Глава 1. Климатическое описание района исследования.

Арктика – это район Земли, примыкающий к Северному полюсу. Он включает в себя окраины североамериканского и евразийского континентов, большую часть Северного Ледовитого океана, а также север Атлантического океана. На материках южная граница проходит примерно по пояс тундры. Наиболее формальное определение Арктики – это регион к северу от полярного круга (от $66,5^{\circ}$ северной широты).

К основным метеорологическим элементам атмосферы, подлежащим изучению, относятся температура воздуха и его влажность, давление, осадки, облачность, скорость и направление ветра, снежный покров, видимость, а также метели, грозы и туманы. Физическое состояние метеоэлементов за короткий интервал времени определяет погоду, а за многолетний период наблюдений за ними – климат. [1]

Существуют особые условия формирования температурного режима в высоких широтах:

1. Одна из особенностей климата высоких широт заключается в том, что он формируется при значительно меньшем притоке тепла от Солнца по сравнению с неполярными областями. В районах севернее 70 градусов географической широты Солнце несколько месяцев не появляется совсем, данное явление называется полярная ночь, и несколько месяцев не уходит за горизонт - полярный день. Из-за большой отражательной способности льда и снега, а также преимущественно низкой высоты Солнца над горизонтом, формируется такой температурный фон, который и наблюдается в Арктике. Благодаря тому, что снег и лёд излучают больше тепла, чем его получают, воздух сильно охлажден и снежный покров не тает в течение всего года. Тепло арктического региона в значительной мере определяется количеством адвективного тепла, которое приносят океанические течения и воздушные потоки из более южных широт.

2. Вторая особенность. Арктика является районом с климатом, который наиболее чувствителен к изменениям количества парниковых газов в атмосфере (таких, как: водяной пар, углекислый газ, метан и другие), а также количества облачности. Радиационный баланс в высоких широтах преимущественно отрицательный, а температурный режим определяется в основном способностью атмосферы препятствовать тепловому излучению в космос пришедшего адвективного тепла.
3. Третья особенность - вблизи географического полюса находится геомагнитный полюс, что способствует наиболее благоприятным условиям для проникновения заряженных частиц из космоса в атмосферу Земли в северных широтах. Интенсивность потоков этих частиц зависит от переменной солнечной активности. В настоящее время имеется множество научных документов, которые подтверждают связь между изменениями погоды и климата с переменными потоками частиц при изменении солнечной активности.

Изменения климата Арктики усиливаются обратными связями, исключительно важным из которых является деградация морских льдов в Северном Ледовитом океане. Эти льды очень чувствительны к климатическим изменениям и вынесение пресной воды из этого региона оказывает влияние на распространение морского льда, термохалинную циркуляцию в прилегающей акватории Северной Атлантики и через них на региональный и глобальный климат. Наличие нескольких переменных источников тепла, а также обратные связи между ними делают Арктику регионом наибольших изменений и колебаний климата. [2]

1.1. Общие условия климата Арктики.

В летнее время атмосферное давление над Арктикой обычно несколько ниже, чем в другие времена года. Это объясняется тем, что нижние слои воздуха, которые охлаждены таянием льдов и отделены от остальной

тропосферы плотной облачностью, не играют существенной роли в общем тепловом соотношении между Северным Ледовитым океаном и окружающей его сушей, верхняя же поверхность облаков, нагреваемая незаходящим Солнцем, достаточно сильно нагревает и прилегающий воздух. С этим связано и образование летней инверсии в Арктике, которая может достигать несколько сот метров.

Циркуляция атмосферы над внутренней Арктикой в значительной степени зависят от радиационных процессов зимой, в период резкого охлаждения воздуха, над Арктикой устанавливается область высокого давления. Однако она сильно деформирована со стороны Атлантики и в меньшей степени со стороны Тихого океана притоком теплого воздуха, что обусловлено суммой причин и прежде всего циклонической деятельностью над северной Атлантикой и северной частью Тихого океана. Дальнейшему же продвижению циклонов в Арктику, особенно в Атлантическом секторе, способствует приток тепла океанических вод с юга в полярный бассейн. Распределению давления соответствует и распределение температуры: наиболее холодная область занимает центральную часть Арктики, внутреннюю Гренландию и Канадский архипелаг, в атлантическом секторе температуры наиболее высоки.

Наибольшего развития циклоническая деятельность достигает в атлантическом и тихоокеанском секторах окраинной Арктики, где, благодаря большому температурному контрасту между арктическим воздухом умеренных широт, происходит обострение арктического фронта.

Таким образом, основными процессами, накладывающими свое влияние на действие всех остальных факторов в Арктике, являются: летом – таяние льдов под действием общего притока тепла, но в то же время поглощение огромного количества тепла из воздуха на сам процесс таяния, что препятствует возможному подъему температуры нижнего слоя воздуха;

зимой – прогрессирующее в течение полярной ночи, охлаждение поверхности замерзающего океана и всего воздуха над Арктикой в результате излучения.

Своеобразие Арктики также выражается в почти полном отсутствии внутреннего влагооборота. Испарение в Арктике очень мало. И наоборот нигде так сильно, как в Арктике, не развивается процесс конденсации влаги на земной поверхности непосредственно из воздуха. Осадки в Арктике выпадают за счет адвективного переноса влажного воздуха их умеренных широт. Почти вся осевшая тем или иным путем влага в Арктике выносится морскими течениями в Атлантический и Тихий океаны, и лишь очень малая доля остается в арктическом воздухе. Из чего следует, что Арктика является огромным осушителем и в этом кроется её опасная роль в развитии весенне-летних засух на прилегающих к ней континентах. [4]

1.2. Морской лёд и климат

В начале XX века первые систематические отчеты о расположении границ морского арктического льда были зафиксированы в приатлантической Арктике. В 1930-х годах наблюдение за льдами в сибирских арктических морях началось благодаря развитию мореплавания вдоль побережья Сибири. Но основным методом наблюдения за льдами в это время стала авиация, а данные были представлены в виде ледовых карт. На основе анализа исторических данных установлено, что в XX веке происходили четыре стадии развития морских арктических льдов: две стадии разрастания (1900-1918 и 1938-1968 гг.) и две стадии сокращения ледяного покрова (1918-1938 и 1968-1999 гг.), выраженные на фоне общего векового сокращения площади арктических льдов. Расхождения между историческими данными из различных источников исчезают после перехода на спутниковые наблюдения. Обобщение данных инструментальных наблюдений за

морскими льдами со спутников после 1978 года показывает сокращение их протяженности, которое ускорилось в последние два десятилетия.

Исследования морских льдов предусматривали также измерения толщины дрейфующего льда и припая - неподвижного льда вдоль берегов. В «Атласе морфометрических характеристик льда и снега в Арктическом бассейне», подготовленным И.П. Романовым, обобщены данные измерений толщины льда и снега на льду, выполненные во время посадок на дрейфующий лёд при океанографических съёмках в Арктическом бассейне в 1972–1984 гг., на дрейфующей станции «Северный полюс» и на высокоширотных маршрутах атомных ледоколов. С.И. Фролов и другие показали возможность использования для мониторинга толщины морских льдов попутных измерений с борта ледоколов и других судов, способных совершать плавание во льдах. Применение телевизионного комплекса для фиксации измерений позволило собирать обширные массивы данных о толщине льда на маршрутах, пересекающих Арктический бассейн в разных направлениях. На основе сравнительного анализа данных 1977, 1987 и 2000х годов установлено сокращение доли многолетних льдов в 2-3 раза, а также уменьшение их средней толщины в Арктическом бассейне к 2005–2006 гг. на 23% .

Вероятно, В.Ю. Визе был первым, кто отметил, что усиление циркуляции атмосферы и океана является основной причиной потепления и, следовательно, сокращения морского ледяного покрова в Арктике. Его выводом было то, что потепление происходит из-за усиления общей циркуляции атмосферы, что приводит к увеличению западных и юго-западных ветров над Северной Атлантикой и Норвежским морем, а также повышению притока атлантических вод в Арктику и одновременному увеличению обратного потока вод и льдов из Арктического бассейна в Гренландское море. Визе отмечал, что его наиболее заметное проявление происходит в приатлантической Арктике в зимний период от западной

Гренландии до Карского моря, а также сокращение площади морских льдов летом в Баренцевом и Карском морях, связанное с распреснённой водой в верхнем слое океана. Граница между более теплой солёной и холодной распреснённой водой арктического происхождения в приатлантическом секторе Арктики также определяет южную границу распространения морского льда в конце зимы. Современные исследования указывают на широкий спектр причин, вызывающих сокращение морского ледяного покрова, однако явное влияние оказывает потепление климата, которое приводит к повышению температуры воздуха. Очевидно, что причина сокращения количества арктических льдов в конце летнего периода также связана с потеплением климата, которое проявляется, в первую очередь, в повышении температуры воздуха. Корреляция между изменениями летней приповерхностной температуры воздуха и площадью, занятой морским льдом в сентябре, составила 0,94 по данным за период 1979-2012 годов. [6]

Научное издание Science Alert опубликовало результаты нового исследования, в котором ученые проанализировали спутниковые снимки, и пришли к выводу, что в 2021 году многолетний морской лёд в Арктике оказался на 50 сантиметров тоньше, чем годом ранее. Согласно данным спутниковых измерений за последние 18 лет, морской лёд потерял 6000 км³, что составляет около трети его общего объёма. Важно отметить, что речь идёт именно о многолетнем морском льде, так как сезонный лёд в Арктике тает каждое лето. Такие оценки удалось получить благодаря работе спутников ICESat-2 и CryoSat-2. Космические аппараты отправляют на поверхность Земли лазерные лучи и радиоволны, которые по-разному отражаются от нашей планеты в зависимости от толщины, плотности и других свойств поверхности. Изучив характеристики излучения, ученые и узнали наиболее точные данные об изменениях объема льда. [10]

Таяние ледников – одно из последних изменений климата, которое может стать причиной значительного повышения уровня мирового океана,

что в свою очередь может повлечь за собой ураганы, наводнения, затоплению городов и привести к резкому спаду сельского хозяйства и прочим экономическим убыткам, а также данный процесс замедляет на полюсах океанические течения.

1.3. Причины изменения климата Арктики

Причины изменения климата Арктики являются дискуссионным вопросом. В настоящее время признают четыре возможных фактора изменения климата, происходящие как в региональном, так и в глобальном масштабе:

- Антропогенный эффект парниковых газов (главный фактор)
- Увеличение потоков приходящей солнечной радиации
- Увеличение роли аэрозольного рассеивания
- Внутренние колебания климатической системы, которая состоит из атмосферы, гидросферы, криосферы, океана и суши. (второстепенный фактор)

Выделяются два глобальных потепления. Первое потепление было зональным и максимально проявилось в высоких широтах. Второе потепление оказалось более распространенным по разным широтным зонам.

В 1930-х годах наблюдалось потепление, которое связывалось с увеличением продолжительности зональной циркуляции, что в свою очередь приводило к более длительному перемещению атлантических циклонов вдоль побережья Евразии. Это способствовало повышению температуры воздуха в умеренных широтах и на прибрежных метеорологических станциях в Арктическом бассейне, а самый высокий уровень продолжительности зональной циркуляции был зафиксирован в период с 1931 по 1940 годы. Это годы первого глобального потепления.

Второе глобальное потепление начинается с 1970-х годов и связывается с ростом продолжительности группы циркуляции циклонов на полюсах. В Северном полушарии происходят выходы циклонов из низких широт в высокие, что сопровождается повышением температуры в средних и высоких широтах. [3]

Ближайшим источником энергии долгопериодных возмущений в атмосфере является теплообмен системы океан - атмосфера и процессы океанической циркуляции. Академик Российской академии наук, специалист в области гидродинамики, Андрей Сергеевич Монин, указывал на то, что климат формируется под действием ряда факторов, которые можно разбить на следующие группы:

- а) Внешние (астродинамические) факторы. Из-за взаимодействия Земли с Луной и планетами возникают изменения в параметрах орбитального движения Земли и наклоне ее оси, что имеет большое значение для формирования радиационных составляющих климата планеты. Земля всегда испытывает переменные повторяющиеся гравитационные воздействия со стороны других солнечной системы. Возмущения могут значительно различаться по величине и иметь разный временной масштаб от нескольких дней до тысячелетий. Увеличение возмущений зависят от массы возмущающих тел и от расстояния от них до Земли. Гравитационное взаимодействие Земли с планетами и Луной создаёт вариации скорости движения Земли по орбите, изменяет скорость вращения Земли вокруг своей оси, как следствие изменяется расстояние от Земли до Солнца.
- б) Геофизические и географические факторы. Они включают в себя ряд особенностей планеты, из которых для климата Земли наиболее важными являются свойства подстилающей поверхности, которые определяют её динамическое и тепловое взаимодействие с атмосферой.
- с) Атмосферные факторы - масса и состав атмосферы.

1.3.1. Антропогенный фактор потепления.

В последние десятилетия наибольшее внимание уделялось антропогенному изменению состава атмосферы, как возможному фактору усиления парникового эффекта атмосферы и потепления климата во второй половине XX века. В публикациях международной группы экспертов по изменениям климата (МГЭИК) был сделан вывод об антропогенном характере современного потепления, связанного с ростом концентрации CO₂, метана, фреонов и других парниковых газов в атмосфере. Среди них наибольший вклад вносит CO₂, что объясняется его высокой концентрацией и долгим временем задержания в атмосфере. Исходя из большого количества публикаций, на основе модельных оценок был получен вывод о том, что быстрый рост выбросов парниковых газов является следствием развития человеческой деятельности в области производства за счет применения более эффективных средств производства и его организации. Парниковый эффект, обусловленный удержанием излучения Земли в атмосфере этими газами, приводит к повышению температуры поверхности Земли и изменению климата. Однако в последнее время появляются публикации, в которых приводятся и альтернативные гипотезы.

Северная Евразия зимой является наиболее вероятным регион-источником загрязнения Арктики (например, сульфатными аэрозолями и двуокисью серы). Перенос из Северной Евразии в Арктику проходит в блокирующих ситуациях, из-за наличия блокирующего антициклона, когда преобладающее направление с запада на восток сменяется меридиональным переносом с ярко-выраженной северно-южной составляющей.

По данным заслуженного географа - Владимира Михайловича Котлякова, глобальная температура и концентрация парниковых газов согласованно изменялись в прошлом. На это указывает анализ ледяных кернов за несколько столетий. Несмотря на резкий рост концентрации газов в атмосфере за последние 100 лет, современные изменения температуры

остаются в пределах её естественных флуктуаций, которые имели место до индустриальной эпохи. Концентрация CO_2 в атмосфере подвержена природным колебаниям, связанным с температурой верхнего слоя океана. При потеплении он выделяется из океана в атмосферу, а при похолодании – усиленно растворяется в океане. Ещё одним из основных естественных источников поступления CO_2 в атмосферу является вулканическая деятельность.

По данным советского учёного - Р.И. Нигматулина [5], величины естественных потоков углекислого газа из атмосферы в океан и из океана в атмосферу многократно превышают его выбросы в результате человеческой деятельности. Это означает, что нельзя точно сказать, насколько хорошо существующие модели описывают изменения концентрации CO_2 в верхних слоях океана и как точно они могут измерить воздействие антропогенной добавки CO_2 в изменения климата. Несмотря на признание того, что антропогенный фактор является важной причиной изменения климата, необходимо учитывать, что естественные колебания климата всегда присутствовали, и будут оставаться.

Из данных наблюдений на тысяче метеорологических станциях России автором [7] были выполнены исследования вклада повышения концентрации CO_2 во второй половине XX века в изменения температуры воздуха. Были проведены статистические эксперименты, в ходе которых нивелировались влияния парникового эффекта водяного пара, адвекции тепла и облачности в изменениях температуры воздуха на разных широтах и в разных сезонах, а также оценивалась зависимость оставшихся изменений температуры от радиационного баланса у поверхности земли. После исключения перечисленных природных факторов, был сделан вывод о том, что изменения радиационного баланса и температуры в основном, могли происходить из-за изменения концентрации CO_2 в атмосфере. По полученным результатам, оказалось, что вклад CO_2 в общую изменчивость температуры воздуха

составил около 25%. Данные наблюдений подтвердили факт влияния повышенной концентрации парниковых газов на климат, но одновременно показали, что оценки физико-математических моделей о доминирующей роли усиления парникового эффекта в потеплении климата во второй половине XX века были завышены.

1.3.2. Солнечная активность как фактор потепления Арктики.

Климат Земли формируется под влиянием Солнечной энергии и при имеющихся астродинамических параметрах Земли. Главными факторами, обеспечивающими стабильность климата, являются постоянство светимости Солнца и параметров орбиты Земли. Однако, изменения этих факторов происходят в долгосрочном временном масштабе и имеют малую амплитуду. В начале 1980х годов была обнаружена переменность солнечной постоянной с амплитудой 0,1-0,2%, которая была связана с 11-летним солнечным циклом. Уменьшение солнечной постоянной связано с появлением на Солнце очень больших групп пятен - тёмных образований, в свою очередь увеличение связано с солнечными факелами - светлыми, яркими областями на поверхности Солнца, окружающих солнечные пятна. При высокой солнечной активности на Солнце увеличивается число пятен от площади которых в некоторой мере зависит солнечная постоянная. Появление на диске Солнца пятен и факелов объясняет только 50-70% всех наблюдаемых вариаций солнечной постоянной. Возможными причинами циклической переменности солнечной постоянной также может быть изменение диаметра Солнца.

Астрофизик Х.И. Абдусаматов [8], исследовал причины изменения 11-летней и вековой составляющей изменения солнечной постоянной. Исследование причин изменений 11-летней и вековой составляющей вариации потока интегральной радиации Солнца – “солнечной постоянной”, и, следовательно, климата Земли в прошлом и настоящем особо актуально в связи с наблюдаемым глобальным потеплением климата. На основе

длительных космических измерений потока радиации он утверждал, что 11-летний гелиоцикл представляет собой скоординированное идентичное колебание, как активности, так и потока солнечной радиации. Последние результаты космических измерений потока радиации полностью показывают, что кривые 11-летних вариаций уровня активности и величины солнечной постоянной взаимокоррелированы и квазипараллельны как по фазе, так и по амплитуде. На более длительных шкалах времени – порядка века – также установлено наличие достоверной корреляции между четко установленными периодами значительных вариаций уровня солнечной активности и соответствующими достоверными изменениями в климате Земли, тождественными изменениям потока радиации Солнца в течение всего прошлого тысячелетия. В каждом из 18 глубоких минимумов солнечной активности, установленных в течение последних тысяч лет, наблюдалось похолодание климата, а в период высоких максимумов – потепление.

1.4. Радиационные условия в Арктике.

Одним из основных процессов, влияющих на изменение температуры воздуха - является радиация. Радиация – излучаемая и распространяемая энергия в форме фотонов или электромагнитных волн. Она излучается всеми телами, которые имеют температуру выше абсолютного нуля. Электромагнитная волна – перемещение возмущения через среду без постоянного изменения или переноса свойств среды.

Радиационные условия в Арктике своеобразны. В период полярной ночи приток солнечной радиации отсутствует и остается только атмосферная радиация, за счет теплого воздуха, притекающего в Арктику из умеренных широт в верхних слоях тропосферы. Охлаждение земной поверхности в условиях малооблачной погоды весьма велико и оседающий воздух все больше и больше, что вызывает приток воздуха в верхних слоях из умеренных широт и соответствующий рост давления у земной поверхности.

Антициклональный характер циркуляции приводит к размыванию облачности и дальнейшему охлаждению приземного воздуха. Об интенсивности и устойчивости этого процесса можно судить по мощной приземной инверсии температуры, которая сохраняется на некоторой высоте даже при очень сильных ветрах.

Летом солнечная радиация в Арктике весьма значительна благодаря незаходящему Солнцу: за период с июня по август она не меньше, чем в средних широтах, но по причине большой облачности и частых туманов в прямом виде редко достигает земной поверхности. Однако общий приток тепла настолько велик, что приводит к началу массового таяния снега и льда. Но в то же время процесс таяния дает и предел возможному повышению температуры.

1.5. Дальний перенос загрязнений в Арктику.

Перенос солнечной энергии, происходящий в атмосфере, определяет нагрев атмосферы, земной поверхности, облаков. Также атмосфера и земля излучают энергию в космическое пространство. Парниковые газы и облака поглощают часть этой энергии, а оставшаяся часть излучается обратно в космическое пространство. Когда атмосфера и облака поглощают энергию, они переизлучают инфракрасную радиацию в разных направлениях. Поверхностная радиация переносится в тропосферу при помощи турбулентности, а испарение поднимает скрытое тепло в тропосферу, где оно может высвободиться при конденсации.

Перенос скрытого тепла представляет собой важный процесс переноса солнечной энергии, поглощенной поверхностью и атмосферой вблизи экватора, в сторону полюсов. Вблизи экватора поглощается больше радиации, чем излучается, в результате чего образуется переизбыток энергии, а вблизи полюсов, наоборот, излучается больше энергии, чем поглощается и образуется дефицит энергии. При отсутствии обмена энергией между

экватором и полюсами, температура вблизи полюсов постоянно уменьшалась бы, а вблизи экватора – увеличивалась. Однако существуют три процесса, которые приводят к частичному выравниванию энергетического баланса Земли:

- a. Перенос энергии адвекцией от экватора к полюсам;
- b. Перенос энергии океанскими течениями от экватора к полюсам;
- c. Полярный перенос скрытого тепла.

При испарении водяного пара около экватора скрытое тепло аккумулируется в нем, а по мере его переноса к полюсам происходит конденсация и, следовательно, высвобождение тепла.

Более частые лесные пожары в зоне бореальных лесов с большим запасом углерода в долгосрочной перспективе могут повлиять на состав полярной атмосферы и климата. Сжигание биомассы в высоких широтах имеет особое значение для полярной атмосферы из-за высокого содержания черного углерода. Тонкий слой темных аэрозолей, поглощающих радиацию, может нагревать систему Земля-Атмосфера особенно над поверхностями с высокой отражательной способностью. Зимой слои дымки важны для радиационного баланса, поскольку они прямо или косвенно контролируют инфракрасную часть спектра. Отложения черного углерода на поверхности льда и снега имеют тот же эффект. Таким образом, выбросы от лесных пожаров полярной атмосферы могут вызывать изменения радиационного баланса.

Глава 2. Методы и данные, используемые в работе.

Для районирования территории Арктики использовался метод кластерного анализа k-средних. Для определения даты начала периода потепления были построены графики интегральных кривых по данным средних значений температуры воздуха.

2.1. Исходные данные.

В качестве исходных данных использовался массив данных реанализа NCEP/NCAR Reanalysis I [15], содержащий среднемесячные значения температуры воздуха на уровне 2 метра над поверхностью земли в узлах регулярной сетки $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ за период 1948-2021 гг.

Данный реанализ первый в своем роде для NOAA. NCEP использовала такую климатическую модель, которая была инициализирована с помощью широкого спектра метеорологических наблюдений: судов, самолетов, RAOB, данных станций, спутниковых наблюдений и многого другого. Используя данную модель, ученые могут изучать статистику климата или погоды, а также динамические процессы без осложнений, которые могут вызвать изменения модели. Набор данных поддерживается в актуальном состоянии с помощью наблюдений, близких к реальному времени.

Реанализ является совокупностью данных о состоянии атмосферы и океана, которые были получены путем объединения наблюдений за климатом из разных источников - кораблей, спутников, наземных станций и радаров. Эти данные были ассимилированы при помощи одной и той же климатической модели на протяжении всего периода повторного анализа. Такой подход уменьшает влияние изменений моделирования на климатические характеристики. Большинство систем реанализа представляют собой глобальные базы данных, которые регулярно обновляются и доступны в сети Интернет для свободного использования. [11]

Архивы, содержащие ретроспективный анализ погоды, включают поля метеорологических величин. Для их расчета используются различные алгоритмы обработки данных наблюдений, такие как гидродинамические модели, процедуры ассимиляции и статистические методы. Получаемые метеорологические поля задаются через равные временные промежутки в узлах регулярной горизонтальной сетки, которая образуется меридианами и

параллелями, проведенными через равные промежутки, называемыми горизонтальным шагом.

Данные реанализа имеют свои преимущества и недостатки. Помимо тех удобств, которые дает регулярная сетка и глобальное покрытие, нужно отметить также и то, что при построении реанализа используются данные наблюдений, получаемые из различных источников (станционные измерения, спутниковые снимки, данные радиолокаторов). Использование гидродинамических моделей позволяет осуществить физическое согласование данных из разнородных источников, что позволяет минимизировать ошибки, которые могут иметь наблюдения вследствие различных причин, например, из-за недостаточного количества метеорологических станций. С другой стороны, необходимо учитывать, что архивы реанализа являются не данными, а по сути, их восстановлением с интерполяцией и экстраполяцией на регулярную сетку. Поэтому, с учетом того, что спутники не позволяют измерять ряд важных метеорологических характеристик, таких как давление, а также что некоторые области Земного шара например, Мировой океан, или области, не имеющие частого покрытия станциями, то для них данные реанализа могут отображать и воспроизводить метеорологические поля с ошибками, что естественно является недостатком. Однако, несмотря на возможные ошибки, они все же представляют собой важный инструмент для изучения климата и прогнозирования погоды. [12]

2.2. Кластерный анализ, метод k-средних.

Кластерный анализ - это многомерная статистическая процедура, выполняющая сбор данных, содержащих информацию о выборке объектов, и затем упорядочивающая объекты в сравнительно однородные группы (кластеры). Кластер - группа элементов, характеризующихся общим свойством, главной целью кластерного анализа является нахождение групп схожих объектов в выборке.

Иными словами, кластерный анализ – это один из способов классификации объектов по их признакам

Достоинство кластерного анализа состоит в том, что он работает даже тогда, когда данных мало и не выполняются требования нормальности распределений случайных величин и другие требования классических методов статистического анализа.

Кластерный анализ позволяет провести объективную классификацию любых объектов, которые охарактеризованы рядом признаков. Из этого можно извлечь ряд следующих преимуществ:

1. Полученные кластеры можно интерпретировать, то есть описывать, какие же собственно группы существуют.
2. Отдельные кластеры можно выбраковывать. Это полезно в тех случаях, когда при наборе данных допущены определённые ошибки, в результате которых значения показателей у отдельных объектов резко отклоняются. При применении кластерного анализа такие объекты попадают в отдельный кластер.
3. Для дальнейшего анализа могут быть выбраны только те кластеры, которые обладают интересующими характеристиками.

В пакете Statistica реализуются следующие методы кластеризации:

1. Иерархические алгоритмы – древовидная кластеризация. В основе иерархических алгоритмов лежит идея последовательной кластеризации. На начальном шаге каждый объект рассматривается как отдельный кластер. На следующем шаге некоторые из ближайших друг к другу кластеров будут объединяться в отдельный кластер.

2. Метод k-средних. Этот метод используется наиболее часто. Он относится к группе так называемых эталонных методов кластерного анализа. Число кластеров k задаётся пользователем.
3. Двухходовое объединение. При использовании этого метода кластеризация проводится одновременно как по переменным (столбцам), так и по результатам наблюдений (строкам). Результатами процедуры являются описательные статистики по переменным и наблюдениям, а также двумерная цветная диаграмма, на которой цветом отмечаются значения данных. По распределению цвета можно составить представление об однородных группах.

В моей работе использовался метод k-средних.

Метод k-средних – это метод кластерного анализа, цель которого является разделение m наблюдений на k кластеров, при этом каждое наблюдение относится к тому кластеру, к центру (центроиду) которого оно ближе всего.

В качестве меры близости в данном методе используется Евклидово расстояние:

$$p(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{\sum_{p=1}^n (x_p - y_p)^2} \quad (1)$$

Итак, рассмотрим ряд наблюдений: $(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)})$, $x^{(j)} \in R^{(n)}$

Метод k-средних разделяет m наблюдений на k групп (или кластеров) ($k \leq m$) $S=(S_1, S_2, \dots, S_k)$, чтобы минимизировать суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от центроидов этих кластеров:

$$\min \left[\sum_{i=1}^k \sum_{x^{(j)} \in S_j} \|x^{(j)} - \mu_i\|^2 \right] \quad (2)$$

$$x^{(j)} \in R^n, \mu_i \in R^n$$

где μ_i - центроид для кластера S_i .

Итак, если мера близости до центроида определена, то разбиение объектов на кластеры сводится к определению центроидов этих кластеров. Число кластеров k задается исследователем заранее. На первом этапе центроиды кластеров выбираются случайно или по определённом правилу (например, выбрать центроиды, максимизирующие начальные расстояния между кластерами). Относим наблюдения к тем кластерам, чье среднее (центроид) к ним ближе всего. Каждое наблюдение принадлежит только к одному кластеру, даже если его можно отнести к двум и более кластерам.

Затем центроид каждого i -го кластера перевычисляется по следующему правилу:

$$\mu_i = \frac{1}{S_i} \sum_{x^j \in S_i} x^j \quad (3)$$

Таким образом, алгоритм k -средних заключается в перевычислении на каждом шаге центроида для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге. Алгоритм останавливается, когда значения μ_i не меняются:

$$\mu_i^{\text{шаг } \tau} = \mu_i^{\text{шаг } \tau+1} \quad (4)$$

При использовании метода k -средних важно провести проверку подходящего числа кластеров для данного набора данных, чтобы избежать некорректных результатов. [14]

Итак, еще раз подчеркнем некоторые особенности метода k -средних:

- В качестве метрики используется Евклидово расстояние
- Число кластеров заранее не известно и выбирается исследователем заранее
- Качество кластеризации зависит от первоначального разбиения

Преимущества алгоритма:

- Алгоритм k-средних хорошо справляется с задачей кластеризации в случае, когда кластеры линейно разделимы и представляют собой отдельные скопления точек.
- Быстрая работа алгоритма.

Недостатки:

- Результат зависит от выбора исходных центров кластеров, их оптимальный выбор неизвестен.
- Число кластеров желательно знать заранее. [13]

2.3. Метод разностной интегральной кривой.

Впервые способ разностной интегральной кривой для оценки циклических колебаний многих явлений природы был предложен русским ученым-гидрологом Виктором Григорьевичем Глушковым.

Способ вычисления разностной интегральной кривой заключается в том, что сначала для данного ряда наблюдений находится минимальное значение ряда, после чего выполняется нахождение отклонения каждого значения ряда от найденного минимального.

Затем производится построение интегральной кривой путем последовательного суммирования этих отклонений по выражению:

$$\sum_1^i (M_i - M_{min}) = f(t) \quad (5)$$

Где M_i – значение данного ряда, M_{min} – минимальное значение ряда.

Из выражения (5) следует, что разностная интегральная кривая представляет собой нарастающую сумму отклонений значений данного ряда от минимального многолетнего значения ряда на конец каждого M_i года.

Положительные значения отклонений при суммировании за интервал времени дают наклон разностной интегральной кривой вверх относительно

горизонтальной линии, а отрицательные значения – дают наклон кривой вниз. [9]

Глава 3. Районирование территории Арктики.

Для анализа режима температуры выполнено разделение рассматриваемого региона на районы с использованием кластерного анализа методом k-средних. Рассмотрены разделения на три, четыре и пять районов. Также построены графики изменчивости температуры для каждого района. Анализ будем выполнять по полугодиям – теплому и холодному. Теплое полугодие в работе представлено месяцами с мая по октябрь; холодное полугодие месяцами с ноября по апрель.

3.1. Результаты районирования территории Арктики при помощи кластерного анализа, полученные для теплого полугодия.

На рисунке 1 представлены результаты районирования Арктики при делении на три района для теплого полугодия, а на рисунке 2 изображён график изменчивости средней температуры воздуха для каждого выделенного района.

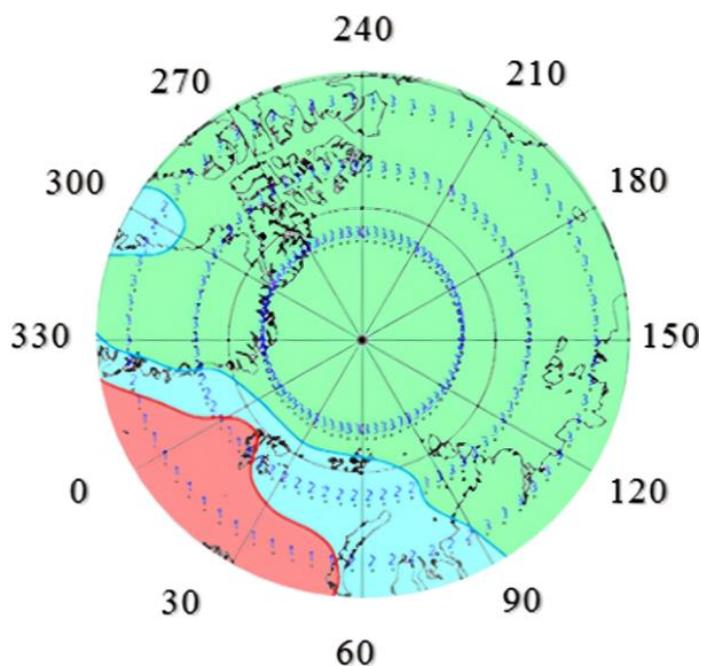


Рисунок 1. Районирование территории Арктики по средней температуре воздуха для теплого полугодия (май-октябрь) при делении на 3 района. Район 1 – красный цвет, район 2 – голубой цвет, район 3 – зелёный цвет.

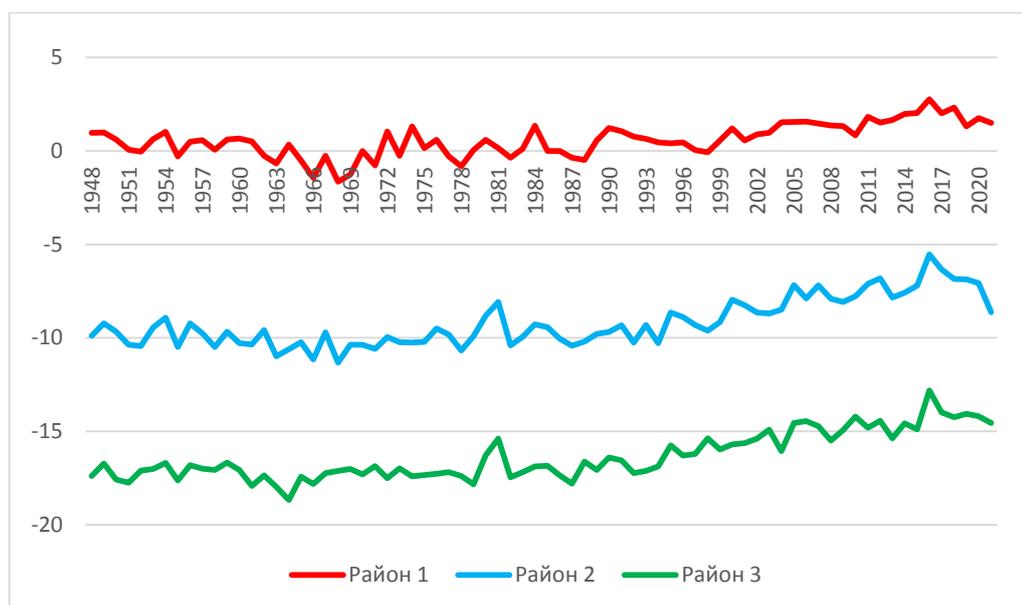


Рисунок 2. График изменчивости средней температуры воздуха при делении на три района для периода май-октябрь.

Район 1 обозначен красным цветом. Это атлантико-европейская область Арктики. В основном расположен над водной поверхностью (Гренландское, Норвежское и Баренцево моря), но также он охватывает западную часть архипелага Шпицберген. В данной местности средняя температура воздуха равна $0,6^{\circ}\text{C}$.

В районе 2, обозначенный голубым цветом, среднее значение температуры воздуха составляет $-9,2^{\circ}\text{C}$. Он занимает северную часть Евразии, включающую полуостров Ямал, архипелаги Новая Земля и Земля Франца-Иосифа и восточную часть архипелага Шпицберген, а также Карское море и север Баренцева моря. Западная и восточная части острова Гренландия, включая море Баффина, также располагаются в данной области.

Большая часть территории Арктики располагается в районе 3, который обозначен зелёным цветом. Он покрывает Канадский Арктический архипелаг, центральную и северную часть Гренландии, северо-запад Северной Америки и север азиатской части Евразии, включая в себя

полуостров Таймыр, а также архипелаги Северная Земля и Новосибирские острова. Здесь среднее значение температуры воздуха составляет $-16,4^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 2 представлен график изменчивости температуры воздуха за теплое полугодие при делении на три района. Наиболее теплым из выделенных районов является первый, так как он находится под влиянием теплой Атлантической воздушной массы. Район 3 является наиболее холодным, это территория влияния Арктической воздушной массы. Район 2 находится на границе между 1 и 3 районами - атлантической и арктической воздушными массами. Стоит отметить, что за 25 лет для всех районов наблюдается заметная тенденция на увеличение температуры воздуха.

На рисунке 3 представлены результаты районирования Арктики при делении на четыре района для теплого полугодия, а на рисунке 4 изображён график изменчивости средней температуры воздуха для каждого выделенного района.

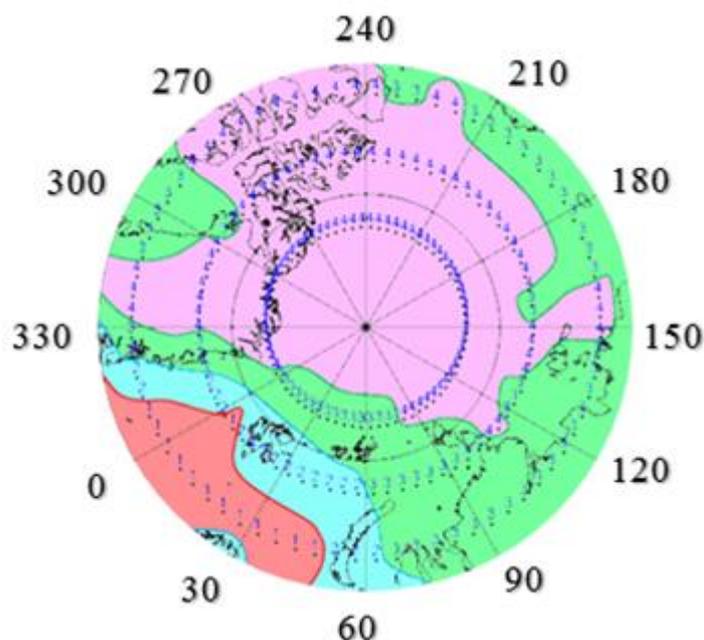


Рисунок 3. Районирование территории Арктики по средней температуре воздуха для теплого полугодия (май-октябрь) при делении на 4 района. Район 1 – красный цвет, район 2 – голубой цвет, район 3 – зелёный цвет, район 4 – фиолетовый цвет.

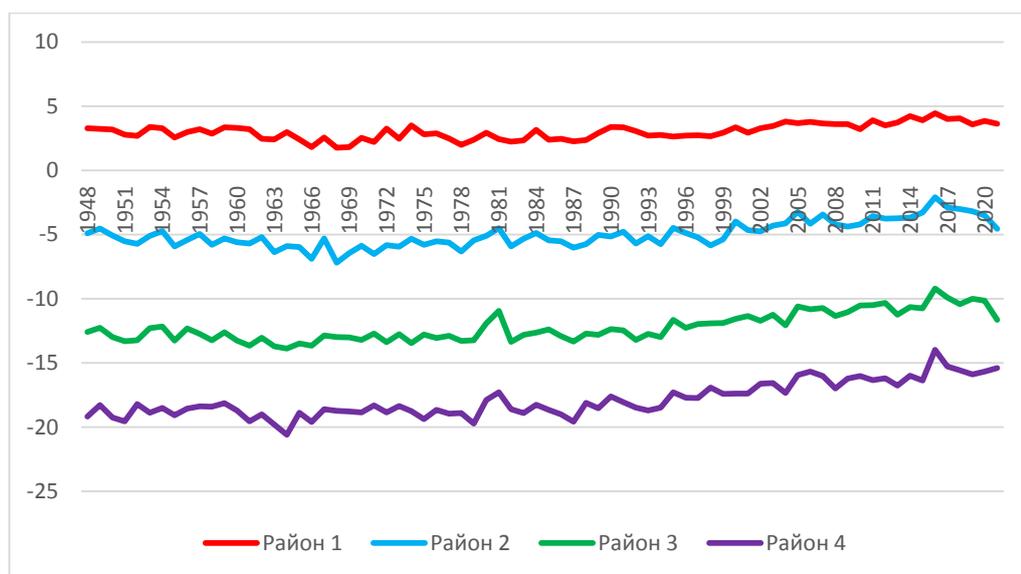


Рисунок 4. График изменчивости средней температуры воздуха при делении на четыре района для периода май-октябрь.

Для данного теплого полугодия было выделено 4 района. Большая площадь Арктики покрывается районами 3 и 4.

Район 1 обозначен красным цветом. Он преобладает над Норвежским морем и захватывает юго-восточную часть Гренландского, юго-западную часть Баренцева морей, огибая север Скандинавского полуострова. Средняя температура воздуха в этом районе составляет $3,0^{\circ}\text{C}$.

Район 2 обозначен голубым цветом, находится над архипелагом Новая Земля и архипелагом Шпицберген. Средняя температура воздуха здесь составляет $-5,0^{\circ}\text{C}$.

Район 3 обозначен зелёным цветом, располагается в этом случае над всей северной территорией азиатской части Евразии, морем Баффина у берегов Гренландии, северо-восточной частью Карского моря, морем Лаптевых и северо-западом Северной Америки. Средняя температура воздуха этих территорий $-12,2^{\circ}\text{C}$. Летом данная часть Арктики освобождается ото льда.

Район 4 обозначен фиолетовым цветом, покрывает Северный полюс, Центральную часть Гренландии и Канадский Арктический архипелаг.

Акватория, входящая в этот район, покрыта многолетними льдами, которые сохраняются и в теплый период. Средняя температура воздуха здесь равна $-17,9^{\circ}\text{C}$.

На графике изменчивости температуры воздуха (рисунок 4) видно, что средняя температура для районов 1 и 2 имеет плавный ход. Температуры в районах 3 и 4 более изменчивые, но имеют согласованный ход.

На рисунке 5 представлены результаты районирования Арктики при делении на пять районов для теплого полугодия, а на рисунке 6 изображён график изменчивости средней температуры воздуха для каждого выделенного района.

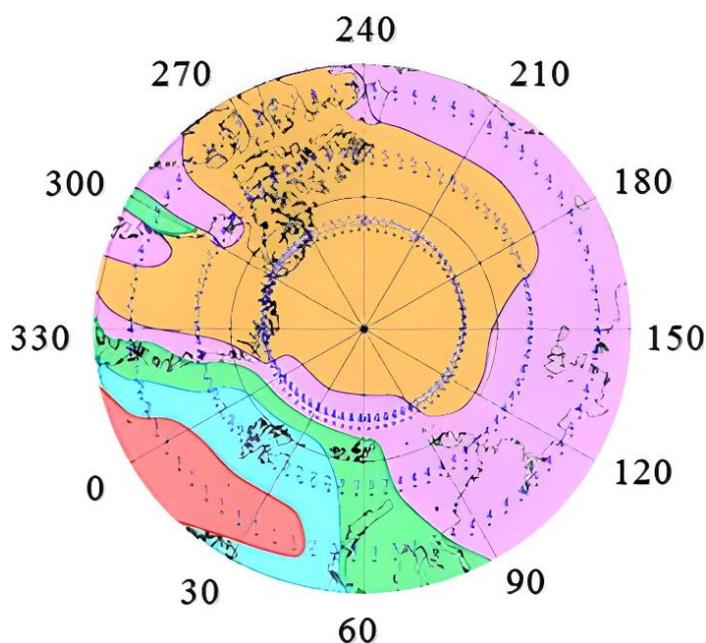


Рисунок 5. Районирование территории Арктики по средней температуре воздуха для теплого полугодия (май-октябрь) при делении на 5 районов. Район 1 – красный цвет, район 2 – голубой цвет, район 3 – зелёный цвет, район 4 – фиолетовый цвет, район 5 – оранжевый цвет.

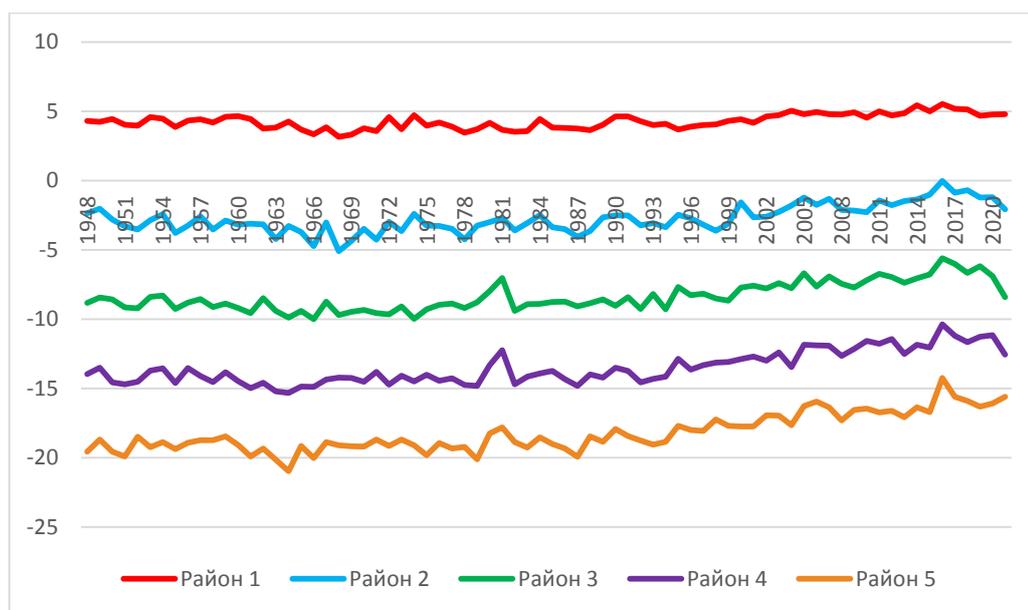


Рисунок 6. График изменчивости средней температуры воздуха при делении на пять районов для периода май-октябрь.

На данном рисунке преобладает два района: 4 и 5.

Район 5 обозначен оранжевым цветом, покрывает Северный полюс, Канадский Арктический архипелаг, северную и центральную часть Гренландии. Средняя температура воздуха в данном районе равна $-18,2^{\circ}\text{C}$.

Район 4, который обозначен фиолетовым цветом, в основном располагается над севером Азии от полуострова Таймыр до северной части Чукотского полуострова, включая восточную часть Карского моря, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море и Чукотское море. Также в данной области расположена юго-западная и восточная часть острова Гренландия и море Баффина. Средняя температура воздуха в этом районе составляет $-13,5^{\circ}\text{C}$.

В районе 3, который обозначен зелёным цветом, средняя температура воздуха равна $-8,3^{\circ}\text{C}$. Он размещается над архипелагами Земля Франца-Иосифа и Новая Земля, а также над юго-западным берегом Карского моря.

Район 2 обозначен голубым цветом, покрывает северо-западную часть Гренландского моря, архипелаг Шпицберген, большую часть Баренцева моря. В среднем температура воздуха по данному району $-2,8^{\circ}\text{C}$.

Район 1 обозначен красным цветом, полностью покрывает водную поверхность, представленную Гренландским морем и западной частью Баренцева моря. Данный район имеет среднюю температуру воздуха равную $4,3^{\circ}\text{C}$.

По графику изменчивости средней температуры воздуха (рисунок 6) можно сказать, что наиболее близкие районы к Атлантике (первый и второй) являются наиболее теплыми и имеют плавный ход средней температуры воздуха, а районы три, четыре и пять имеют схожее распределение и незначительно отличаются по значениям.

3.2. Результаты районирования территории Арктики при помощи кластерного анализа, полученные для холодного полугодия.

На рисунке 7 представлены результаты районирования территории Арктики при делении на три района для холодного полугодия, а на рисунке 8 изображен график изменчивости средней температуры воздуха для каждого выделенного района.

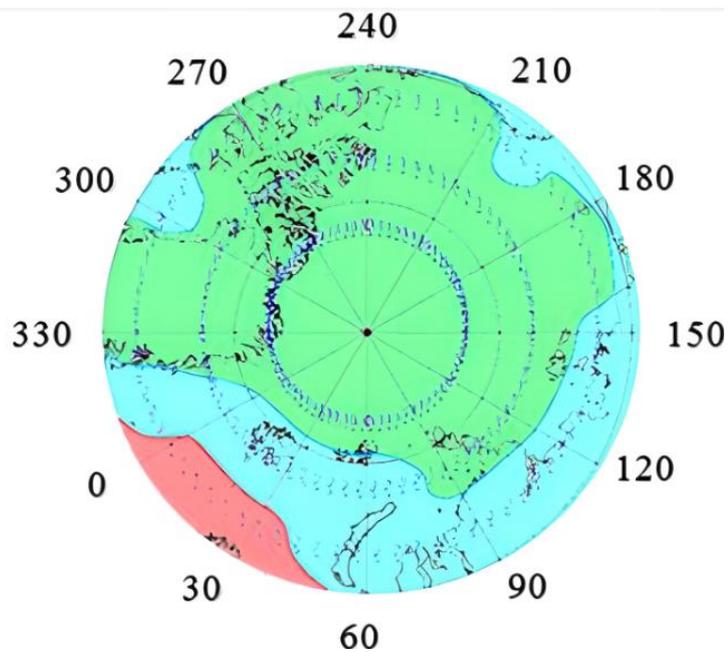


Рисунок 7. Районирование территории Арктики по средней температуре воздуха для холодного полугодия (ноябрь-апрель) при делении на 3 района. Район 1 – красный цвет, район 2 – голубой цвет, район 3 – зелёный цвет.

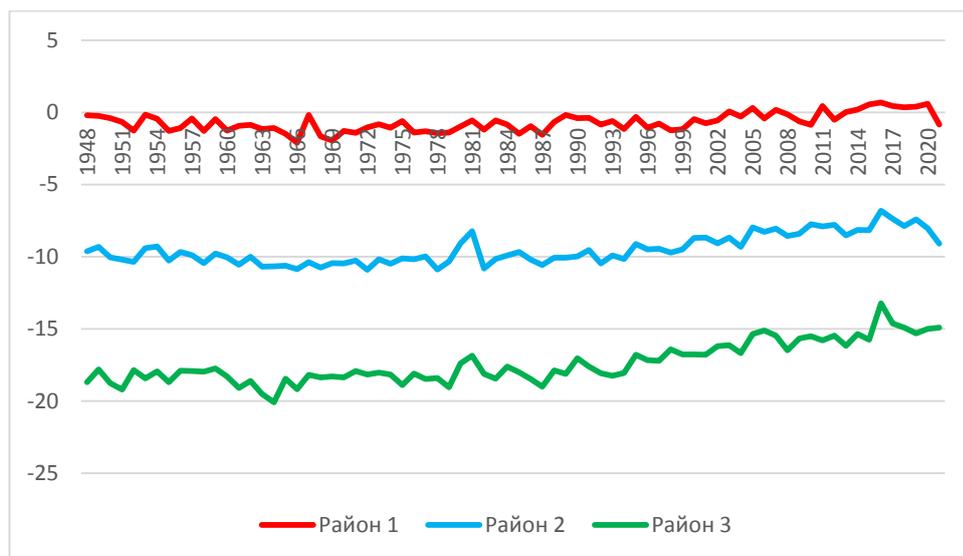


Рисунок 8. График изменчивости средней температуры воздуха при делении на три района для периода ноябрь-апрель.

В первом случае для холодного полугодия в Арктическом регионе было выделено три района, наибольшую площадь из которых занимает район 3, а наименьшую площадь район 1.

Район 1 обозначен красным цветом, он покрывает Гренландское и Норвежское моря, южную и западную части Баренцева моря. По сравнению с аналогичным делением для теплого периода, в данном случае, район по

форме больше вытянут вдоль широты и не так далеко заходит на север. Средняя температура воздуха перечисленных территорий составляет $-0,7^{\circ}\text{C}$.

Район 2 обозначен голубым цветом, в целом имеет широтное распределение, охватывая север Евразии и Северной Америки, но также включает в себя Чукотское море, море Баффина, северо-западную часть Гренландского моря, северо-восточную часть Баренцева моря, куда в этот период так же проникают циклоны. Данный район имеет среднюю температуру воздуха равную $-9,5^{\circ}\text{C}$.

В районе 3, который обозначен зелёным цветом, среднее значение температуры воздуха составляет $-17,4^{\circ}\text{C}$. Он полностью покрывает Северный Ледовитый океан, включая Северный полюс, а также остров Гренландия и Канадский Арктический архипелаг.

Из графика изменчивости средней температуры воздуха (рисунок 8) можно отметить, что район 1 имеет плавный ход, районы 2 и 3 имеют согласованный ход.

На рисунке 9 представлены результаты районирования Арктики при делении на четыре района для холодного полугодия, а на рисунке 10 изображён график изменчивости средней температуры воздуха для каждого выделенного района.

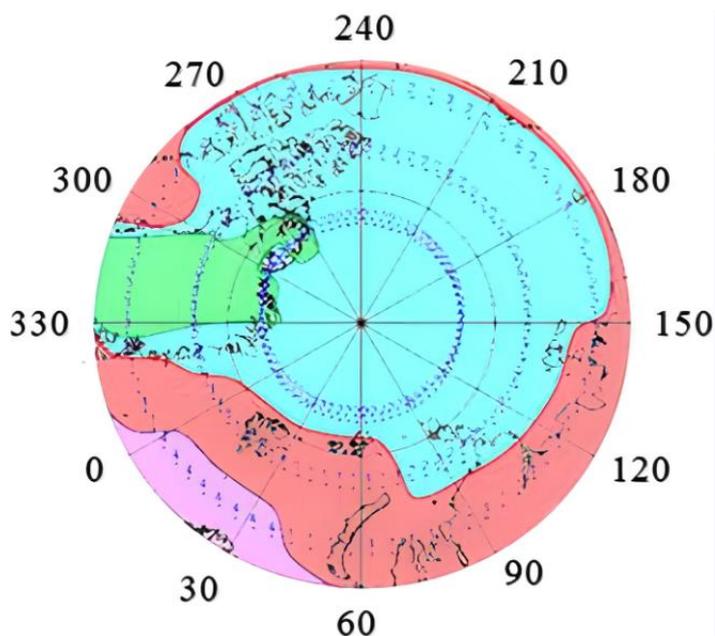


Рисунок 9. Районирование территории Арктики по средней температуре воздуха для холодного полугодия (ноябрь-апрель) при делении на 4 района. Район 1 – красный цвет, район 2 – голубой цвет, район 3 – зелёный цвет, район 4 – фиолетовый цвет.

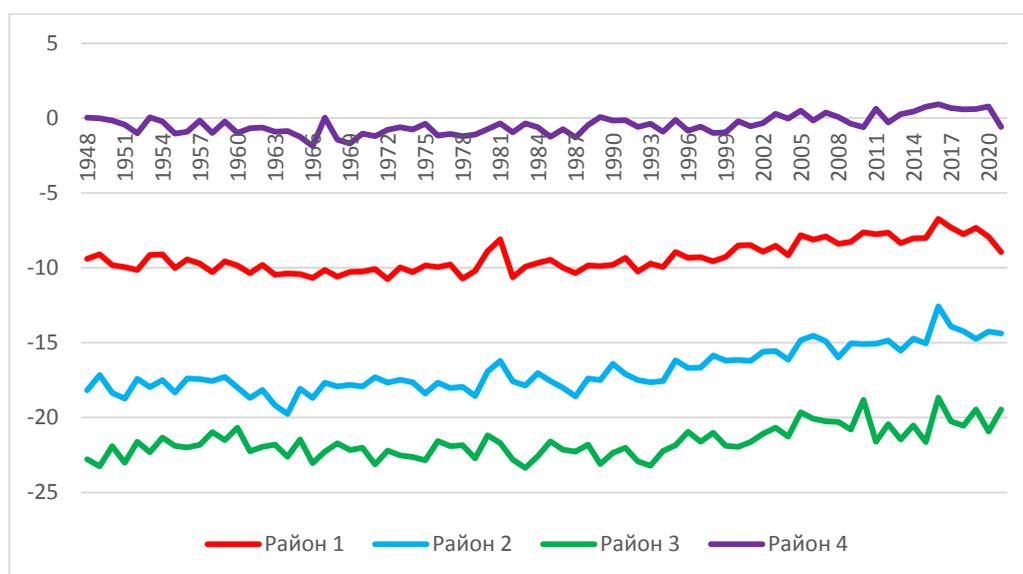


Рисунок 10. График изменчивости средней температуры воздуха при делении на четыре района для периода ноябрь-апрель.

На этом рисунке преобладающими районами являются 1 и 2.

Район 2 обозначен голубым цветом. Он охватывает весь Северный Ледовитый океан и Канадский Арктический архипелаг, а также захватывает западное и восточное побережье острова Гренландия, Восточно-Сибирское и

Чукотское моря. Средняя температура воздуха в этой области составляет $-16,9^{\circ}\text{C}$.

Район 1 обозначен красным цветом, располагается над всей северной азиатской территорией Евразии, а также включает в себя архипелаги Шпицберген и Новая Земля, Гренландское море и море Баффина. Средняя температура воздуха здесь составляет $-9,3^{\circ}\text{C}$.

Район 3 обозначен зелёным цветом, расположен над центральной территорией острова Гренландия, здесь климат более континентальный, в отличие от центральной Арктики, где даже через толстый лед происходит постоянный обмен теплом в течение всего года. Средняя температура воздуха данного района равна $-21,6^{\circ}\text{C}$.

Район 4, который обозначен фиолетовым цветом, находится над территорией Норвежского моря и юго-запада Баренцева моря. Средняя температура воздуха составляет $-0,5^{\circ}\text{C}$.

По графику изменчивости средней температуры воздуха (рисунок 10) видно, что район, находящийся под наибольшим влиянием Атлантики имеет ровный ход температуры и является наиболее теплым. Кривые для районов 1,2 и 3 имеют весьма согласованный ход.

На рисунке 11 представлены результаты районирования Арктики при делении на три района для холодного полугодия, а на рисунке 12 изображён график изменчивости средней температуры воздуха для каждого выделенного района.

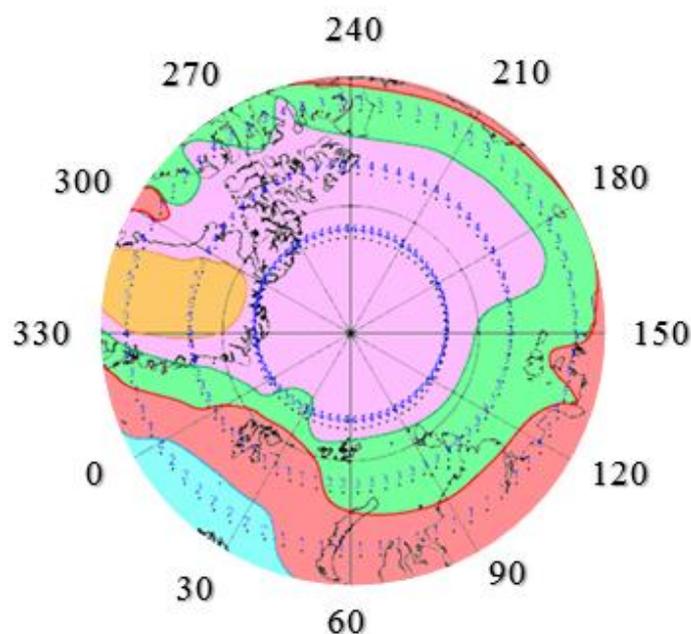


Рисунок 11. Районирование территории Арктики по средней температуре воздуха для холодного полугодия (ноябрь-апрель) при делении на 5 районов. Район 1 – красный цвет, район 2 – голубой цвет, район 3 – зелёный цвет, район 4 – фиолетовый цвет, район 5 – оранжевый цвет.

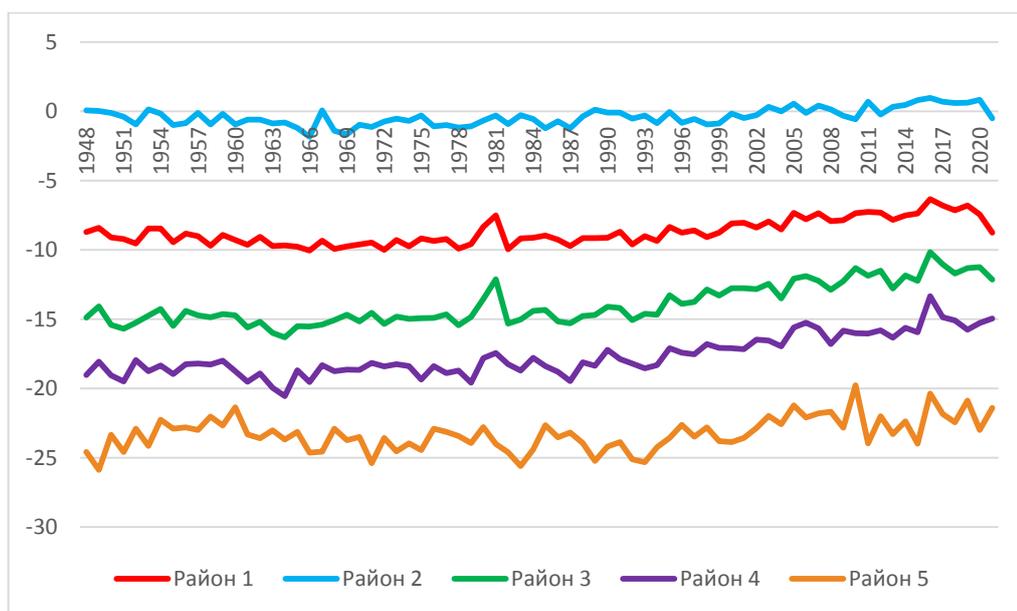


Рисунок 12. График изменчивости средней температуры воздуха при делении на пять районов для периода ноябрь-апрель.

Наименьшую площадь занимает район 5, расположенный в центральной части острова Гренландия, наибольшую - районы 1 и 4.

Район 1, который обозначен красным цветом, покрывает собой север азиатской части Евразии, также включает архипелаг Шпицберген, юг

Карского моря, северо-восток Баренцева моря и Гренландское море. Средняя температура воздуха здесь составляет $-8,7^{\circ}\text{C}$.

Район 4 обозначен фиолетовым цветом. Он размещается над Северным полюсом, Канадским Арктическим архипелагом и берегами острова Гренландия. Средняя температура воздуха по району $-17,7^{\circ}\text{C}$.

Район 5 обозначен оранжевым цветом, занимает центральную часть Гренландии, со средним значением температуры воздуха равным $-23,3^{\circ}\text{C}$.

Район 3 обозначен зелёным цветом, простирается широтно над северной частью Северной Америки, морями Севера (северо-западная часть Гренландского моря, Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море) и опускается к юго-восточным берегам острова Гренландия. Средняя температура воздуха в перечисленных территориях $-13,9^{\circ}\text{C}$.

Над территорией Норвежского моря и юго-западной части Баренцева моря был выделен район 2, обозначен голубым цветом. Средняя температура воздуха составляет здесь $-0,4^{\circ}\text{C}$.

По графику изменчивости средней температуры воздуха (рисунок 12) видно, что наиболее близкие районы к Атлантике (1 и 2) являются наиболее теплыми и имеют плавный ход средней температуры воздуха, районы 3 и 4 имеют схожее распределение и незначительно отличаются по значениям. Район 5, занимающий территорию острова Гренландия является наиболее холодным из представленных.

3.3. Анализ графиков разностных интегральных кривых, полученных для определения года наступления периода потепления.

Оптимальное число деления районов по средней температуре воздуха как теплого, так и холодного полугодий было выбрано равное четырём. Такое число было выбрано вследствие того, что деление на три района отражает значения температуры весьма в обширных интервалах, что

приводит к менее точному разделению районов. В случае с пятью районами уже наоборот наблюдается не особо большая разница между значениями температуры разных областей, что приводит к делению на маленькие районы, которые впоследствии сложнее анализировать. Поскольку на графиках изменчивости средней температуры воздуха отмечается хорошо выраженная тенденция увеличения температуры, определим дату перехода между холодным и теплым периодам. Для этого построим графики разностных интегральных кривых средней температуры воздуха.

Ниже представлены графики разностных интегральных кривых, полученные для теплого полугодия при делении территории Арктики на четыре района.

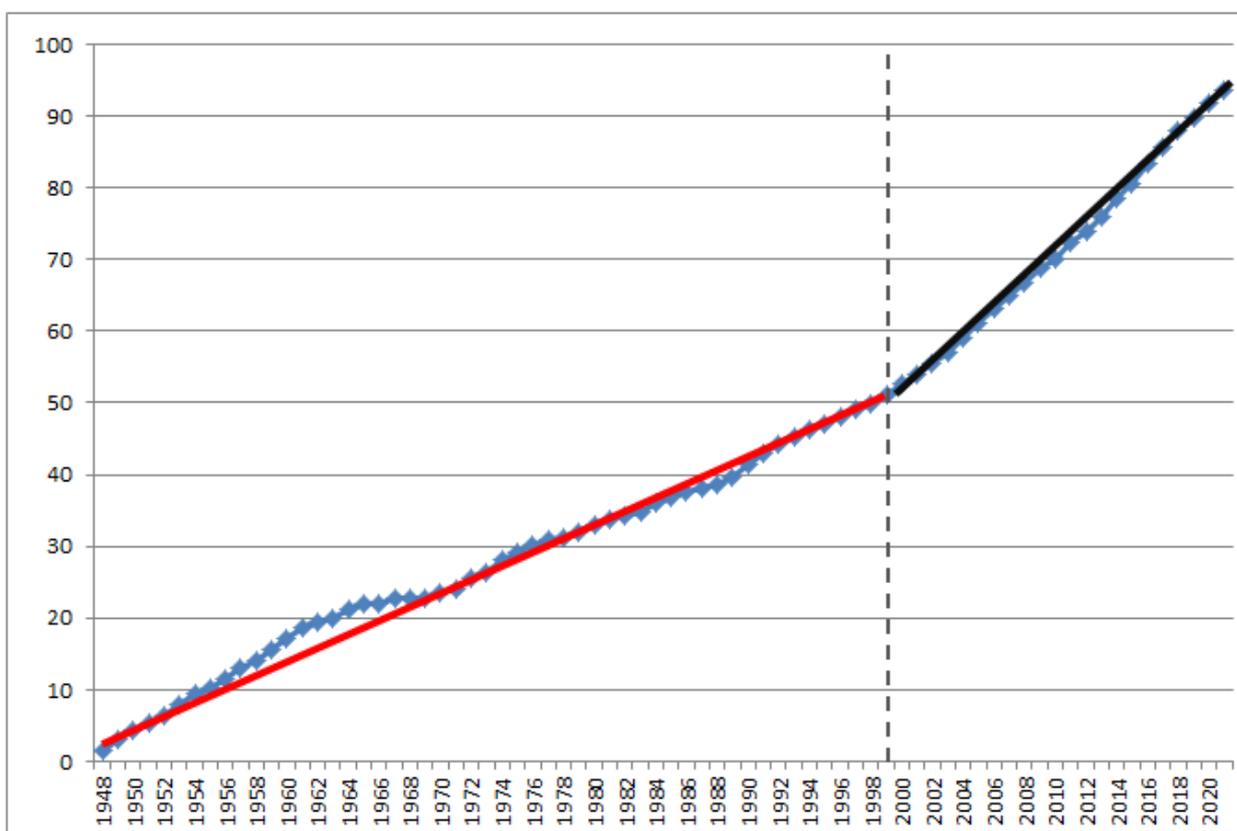


Рисунок 13.Разностная интегральная кривая средней температуры воздуха для района 1 за период май-октябрь.

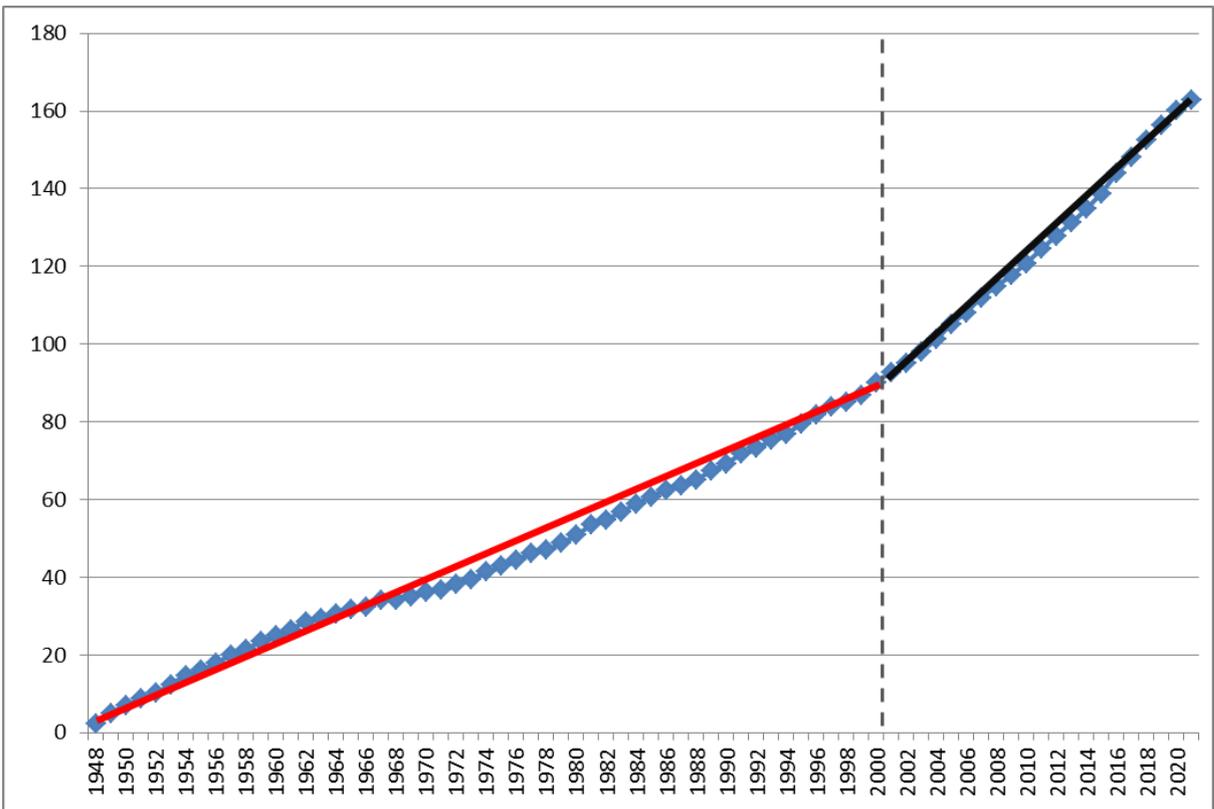


Рисунок 14. Разностная интегральная кривая средней температуры воздуха для района 2 за период май-октябрь.

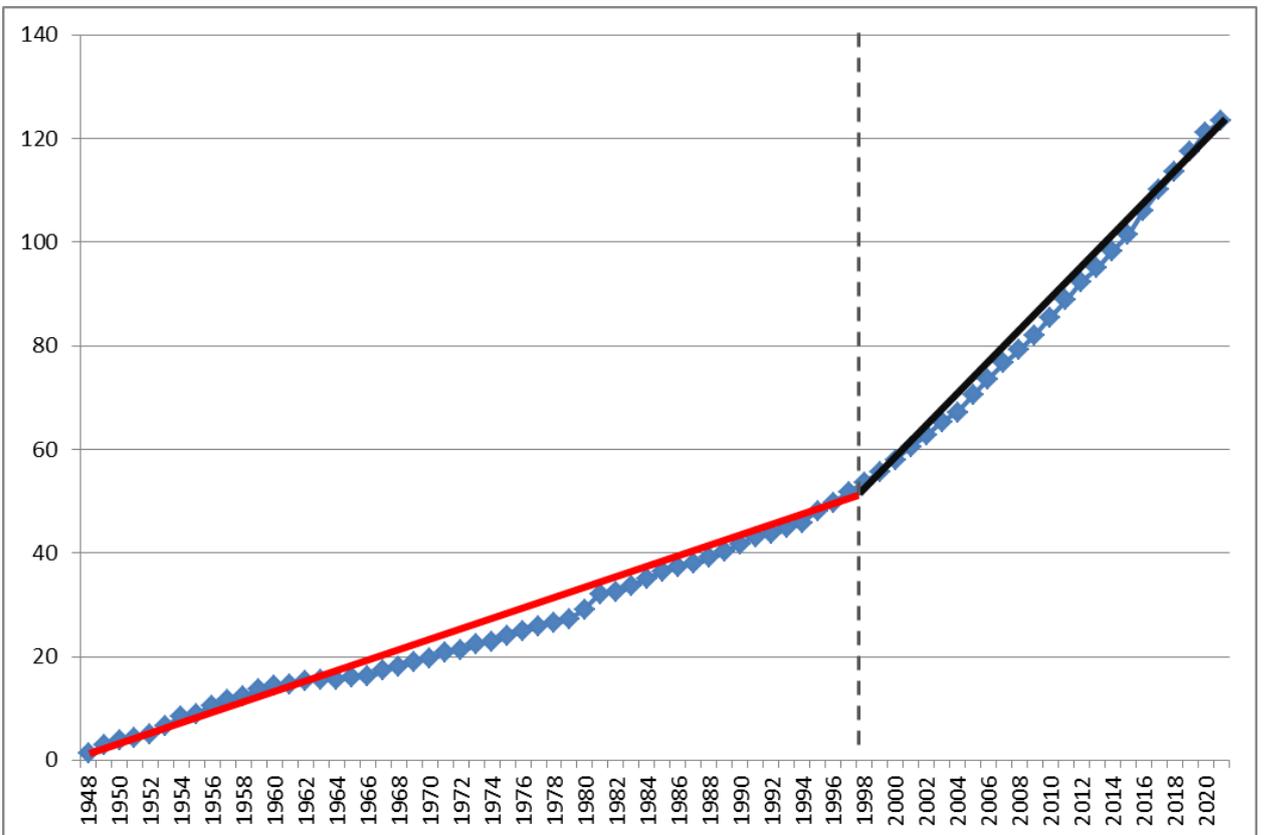


Рисунок 15. Разностная интегральная кривая средней температуры воздуха для района 3 за период май-октябрь.

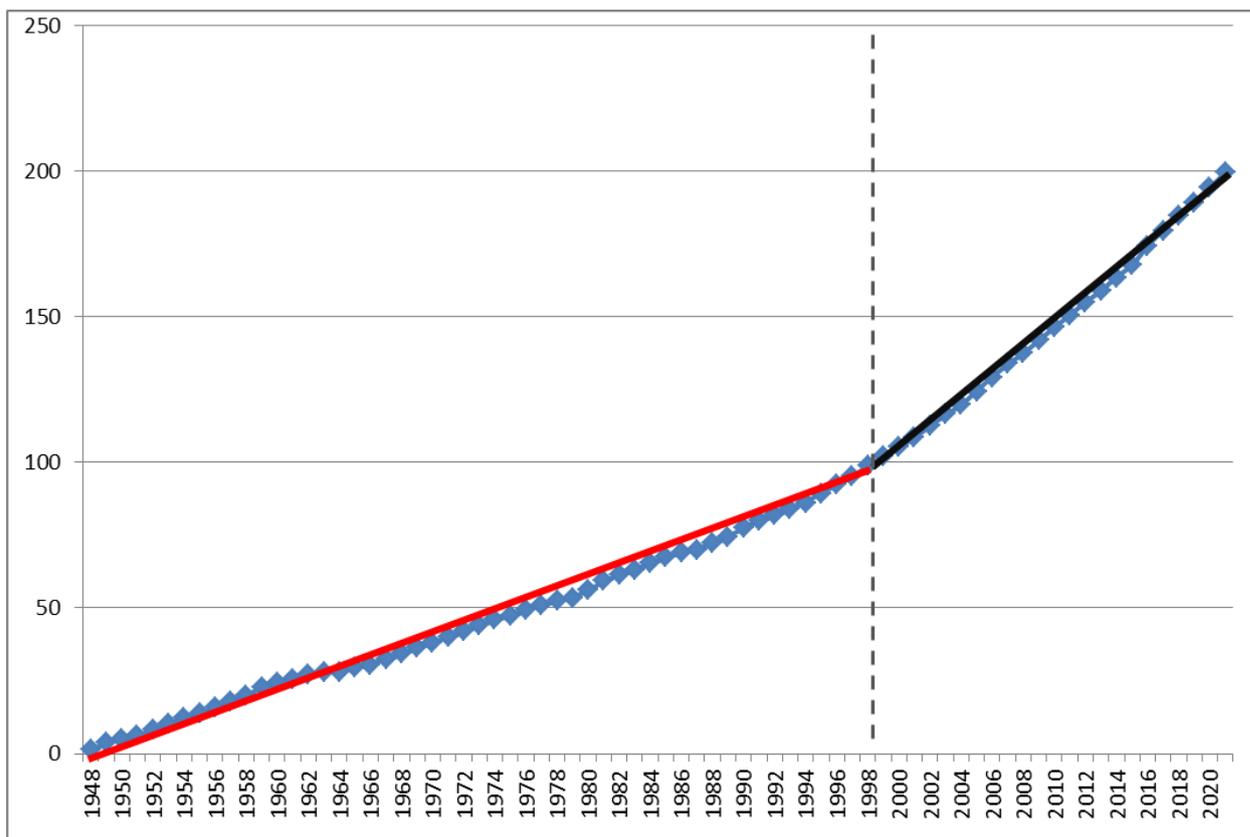


Рисунок 16. Разностная интегральная кривая средней температуры воздуха для района 4 за период май-октябрь.

Номер района	Год потепления	Изменение температуры воздуха до потепления и после, °С	
		Средняя температура воздуха до потепления	Средняя температура воздуха после потепления
1	1999	+2,7	+3,7
2	2000	-5,5	-3,8
3	1997	-12,9	-10,9
4	1998	-18,7	-16,2

Таблица 1. Таблица средних значений температуры воздуха до и после потепления для теплого полугодия (май-октябрь).

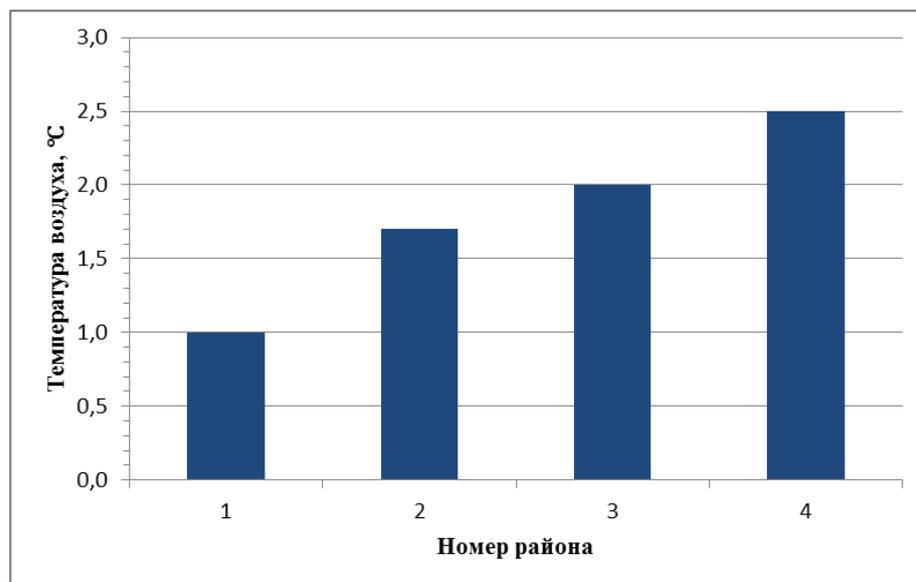


Рисунок 17. Столбчатая диаграмма изменения средней температуры воздуха после перехода на период потепления для теплого полугодия (май-октябрь).

На рисунках 13-16 представлены графики разностных интегральных кривых для 4-х районов за теплое полугодие (май-октябрь), а в таблице 1 приведены значения средней температуры воздуха за периоды до и после потепления, а также указан год, в который начался период потепления для каждого района. По полученным графикам видно, что для района 1 период потепления начинается в 1999 году, для района 2 в 2000 году, для района 3 в 1997 году, а для района 4 в 1998 году. Для района 1 средняя температура воздуха за период с 1948 по 1998 год составляла $+2,7^{\circ}\text{C}$, а с 1999 по 2021 года $+3,7^{\circ}\text{C}$. Следовательно, в районе 1 средняя температура воздуха повысилась на $1,0^{\circ}\text{C}$ после наступления периода потепления. В районе 2 средняя температура воздуха с 1948 по 1999 была равна $-5,5^{\circ}\text{C}$; после начала периода потепления с 2000 по 2021 год составила $-3,8^{\circ}\text{C}$. Таким образом, средняя температура воздуха после 2000 года повысилась на $1,7^{\circ}\text{C}$ по сравнению с периодом до потепления. В районе 3 средняя температура воздуха в период с 1948 по 1996 год равнялась $-12,9^{\circ}\text{C}$; с 1997 по 2021 года была равна $-10,8^{\circ}\text{C}$, соответственно после перехода на период потепления средняя температура воздуха возросла на $2,1^{\circ}\text{C}$. Для района 4 средняя температура воздуха в период с 1948 по 1997 год составляла $-18,7^{\circ}\text{C}$, а с 1998

по 2021 года была равна $-16,2^{\circ}\text{C}$, исходя из этого средняя температура воздуха для данного района выросла на $2,5^{\circ}\text{C}$ после наступления периода потепления.

Таким образом, из столбчатой диаграммы изменения средней температуры воздуха после перехода на период потепления для месяцев с мая по октябрь (рисунок 17), мы можем отметить, что наибольший рост средней температуры воздуха отмечается в районе 4, который представляет собой Северный полюс, Центральную часть Гренландии и Канадский Арктический архипелаг. Повышение температуры составляет $2,5^{\circ}\text{C}$. А наименьшей рост, равный $1,0^{\circ}\text{C}$, в районе 1, который занимает водную поверхность южнее архипелага Шпицберген.

Ниже представлены графики разностных интегральных кривых, полученные для холодного полугодия при делении территории Арктики на четыре района.

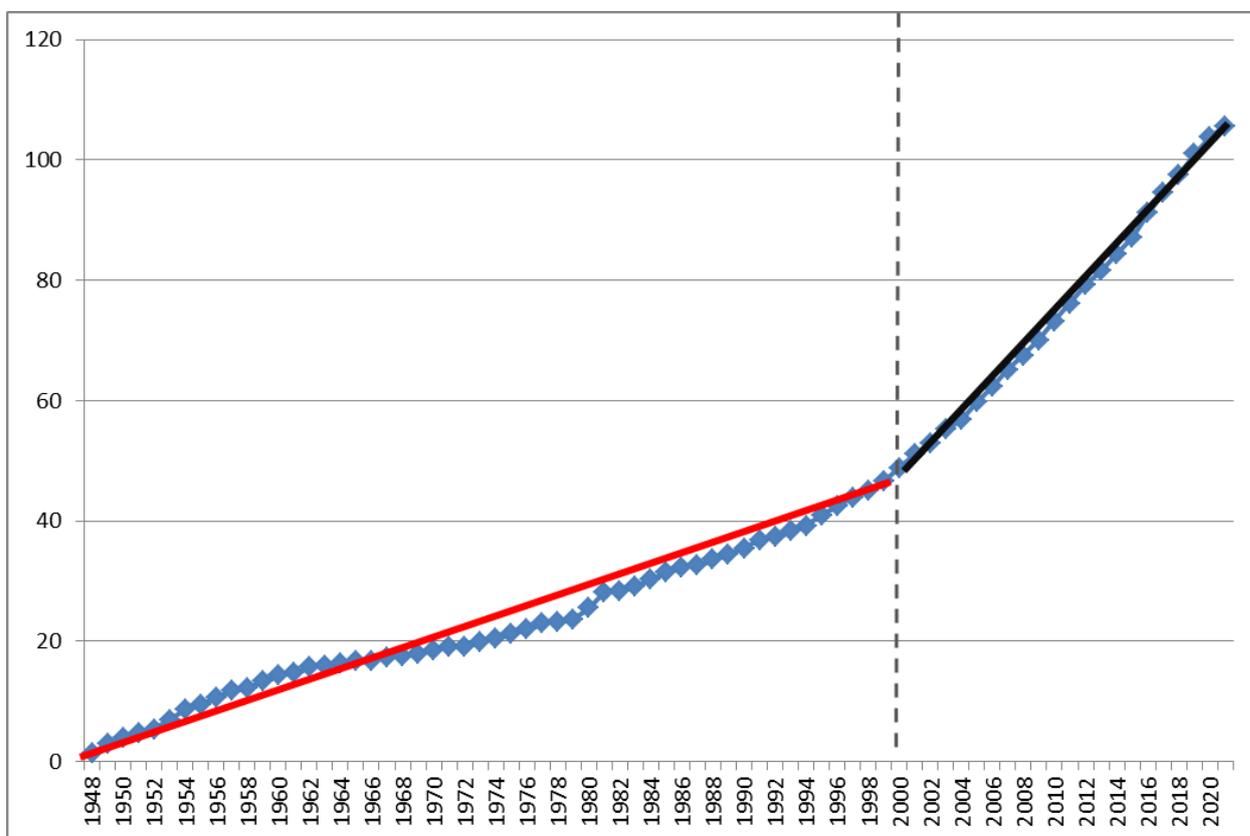


Рисунок 18. Разностная интегральная кривая средней температуры воздуха для района 1 за период ноябрь-апрель.

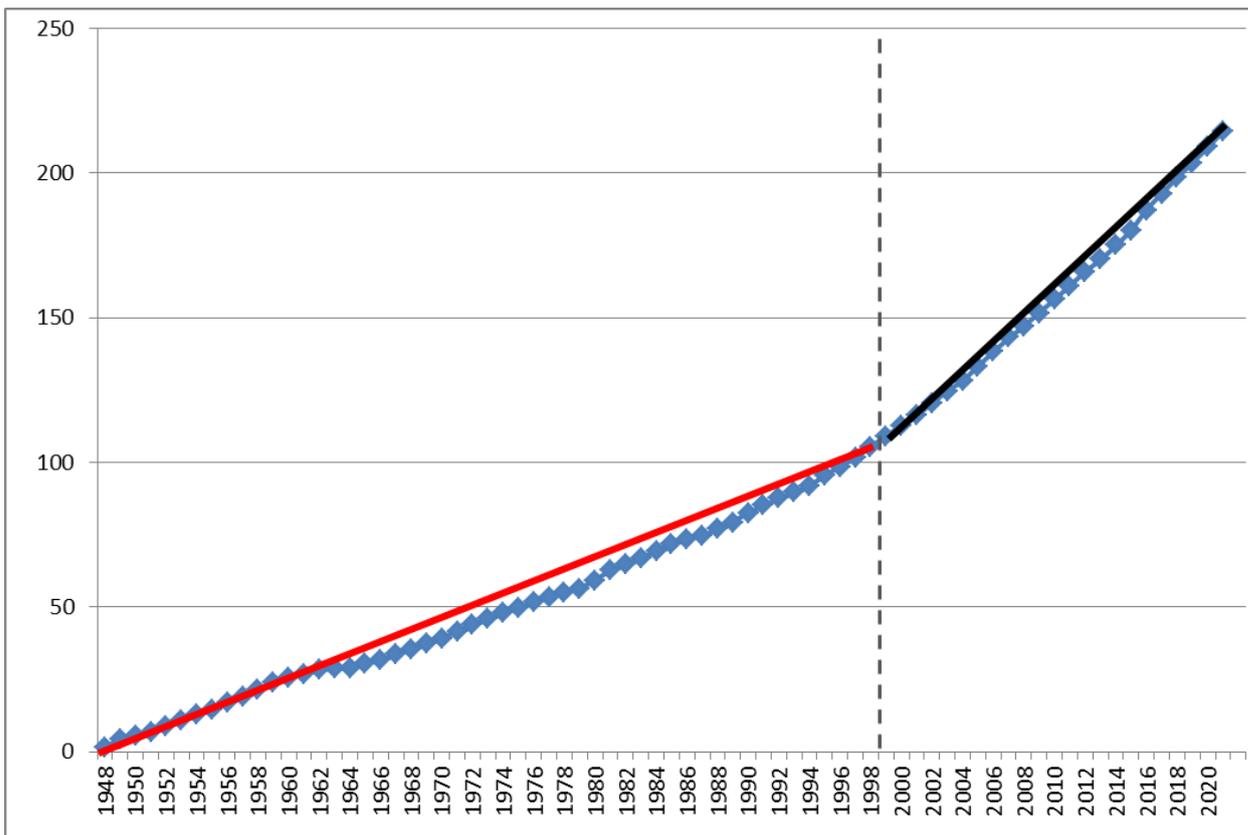


Рисунок 19. Разностная интегральная кривая средней температуры воздуха для района 2 за период ноябрь-апрель.

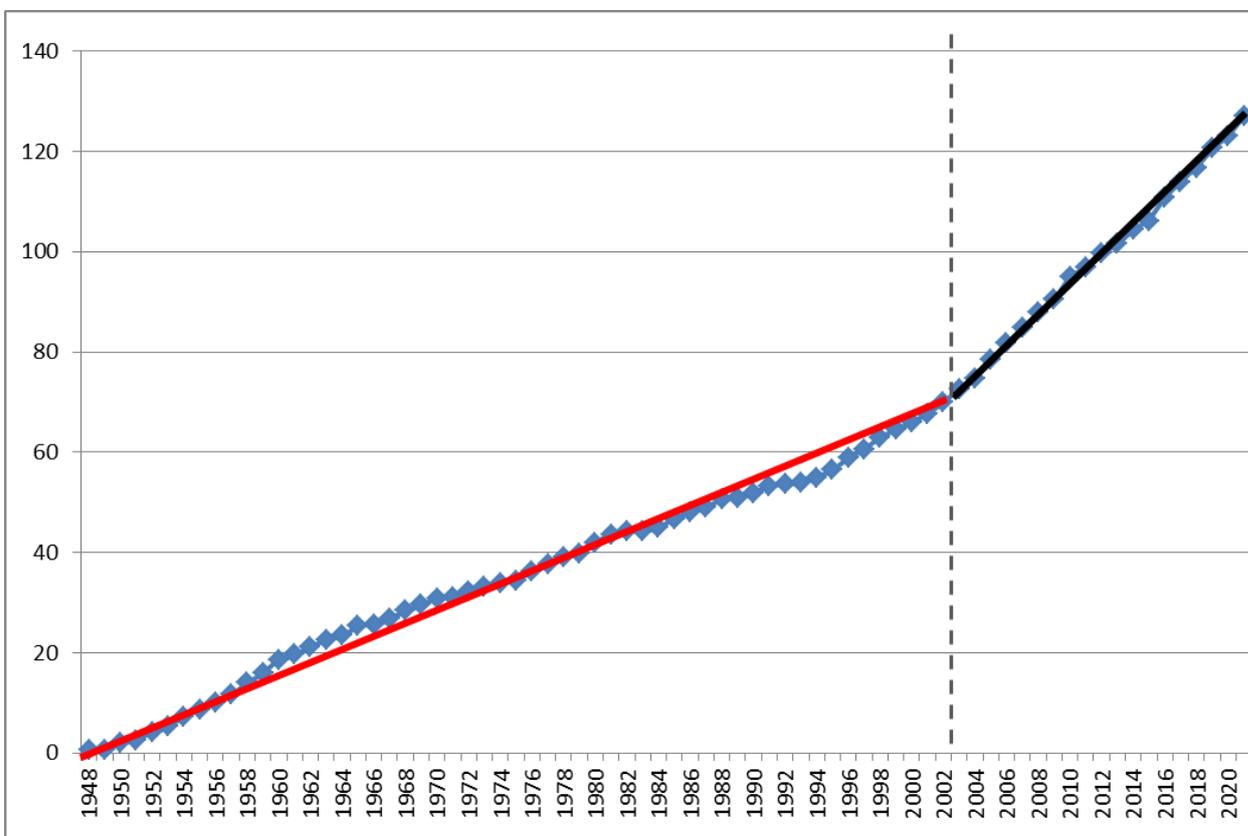


Рисунок 20. Разностная интегральная кривая средней температуры воздуха для района 3 за период ноябрь-апрель.

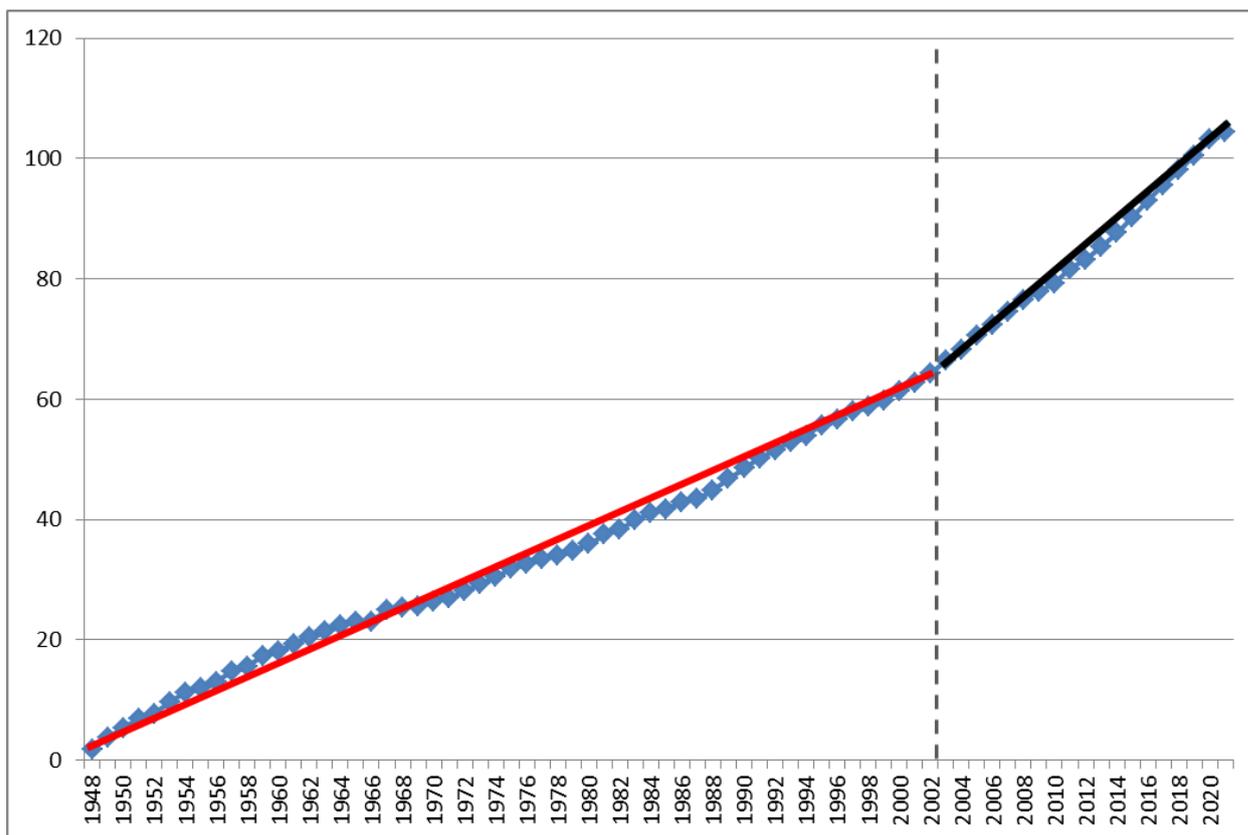


Рисунок 21. Разностная интегральная кривая средней температуры воздуха для района 4 за период ноябрь-апрель.

Номер района	Год потепления	Изменение температуры воздуха до потепления и после, °С	
		Средняя температура воздуха до потепления	Средняя температура воздуха после потепления
1	1999	-9,9	-8,1
2	1998	-17,7	-15,0
3	2002	-22,1	-20,4
4	2002	-0,7	+0,2

Таблица 2. Таблица средних значений температуры воздуха до и после потепления для холодного полугодия (ноябрь-апрель).

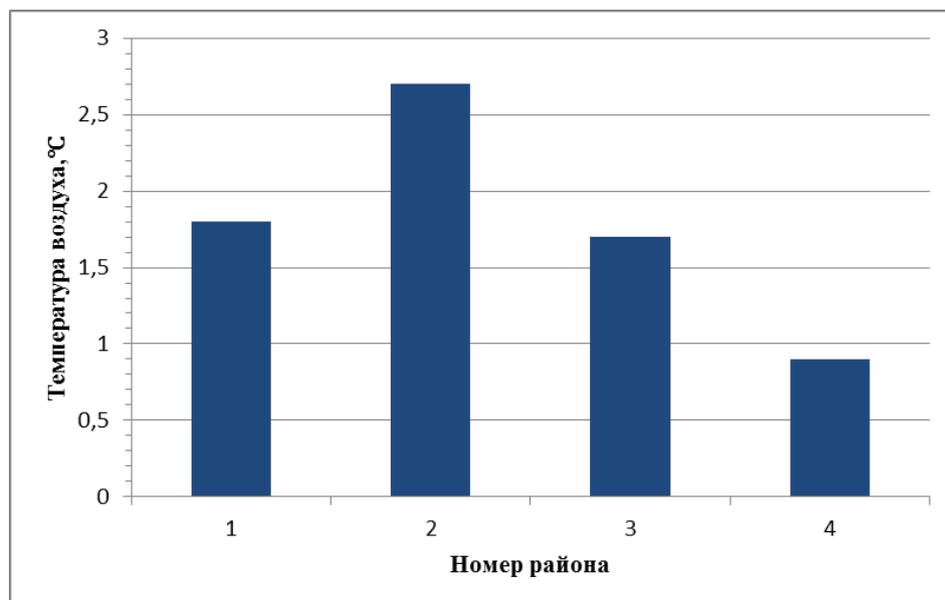


Рисунок 22. Столбчатая диаграмма изменения средней температуры воздуха после перехода на период потепления для холодного полугодия (ноябрь-апрель).

На рисунках 18-21 представлены графики разностных интегральных кривых для четырёх районов за холодное полугодие (ноябрь-апрель), а в таблице 2 приведены значения средней температуры воздуха за периоды до и после потепления для данного полугодия с указанием года, в который произошло начало периода потепления. По полученным выше результатам видно, что для района 1 период потепления начинается в 1999 году, для района 2 в 1998 году, а для районов 3 и 4 в 2002 году. Средняя температура воздуха для района 1 за период с 1948 по 1998 год составляла $-9,9^{\circ}\text{C}$, а с 1999 по 2021 года $-8,1^{\circ}\text{C}$. Таким образом, средняя температура воздуха после 1999 года повысилась на $1,8^{\circ}\text{C}$ по сравнению с периодом до потепления. Для района 2 средняя температура воздуха с 1948 по 1997 года была равна $-17,7^{\circ}\text{C}$; после начала периода потепления с 1998 по 2021 год составляла $-15,0^{\circ}\text{C}$. Следовательно, в районе 2 средняя температура воздуха возросла на $2,7^{\circ}\text{C}$. В районе 3 средняя температура воздуха в период с 1948 по 2001 год равнялась $-22,1^{\circ}\text{C}$; с 2002 по 2021 года была равна $-20,4^{\circ}\text{C}$, соответственно после перехода на период потепления средняя температура воздуха возросла на $1,7^{\circ}\text{C}$. Район 4 является наиболее

теплым, средняя температура воздуха здесь в период с 1948 по 2001 год составляла $-0,7^{\circ}\text{C}$, а с 2002 по 2021 года $+0,2^{\circ}\text{C}$, из чего можно заключить что средняя температура данного района выросла на $0,9^{\circ}\text{C}$.

Анализируя столбчатую диаграмму изменения средней температуры воздуха после перехода на период потепления для месяцев холодного полугодия (рисунок 22), можно заключить, что наибольший рост средней температуры воздуха произошел в районе 2 и составил $2,7^{\circ}\text{C}$. Данный район охватывает весь Северный Ледовитый океан (Северный полюс) и Канадский Арктический архипелаг, а также захватывает западное и восточное побережье острова Гренландия. А наименьшей рост, равный $0,9^{\circ}\text{C}$, наблюдается над территорией Норвежского моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

По окончании выполнения данной выпускной квалификационной работы была успешно достигнута изначально поставленная цель, а именно - исследование климата Арктики по температурному режиму.

В ходе работы для достижения цели были решены следующие задачи:

- Выполнено районирование территории Арктики по значениям средней температуры воздуха для теплого и холодного полугодий.
- Проанализированы полученные районы.
- Определены даты перехода между теплым и холодным периодами для теплого и холодного полугодий.
- Произведено сравнение средней температуры воздуха до потепления и после для холодного и теплого полугодий.

По итогам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Изменения отмечаются во все сезоны примерно одинаковые, наибольшие в центральных районах Арктики на 2,5-2,7°C, наименьше изменения наблюдаются в районе расположенного ближе всего к Атлантике, здесь температура повысилась только на 1,0°C.
2. В теплое полугодие потепление наступает чуть раньше в центральных районах Арктики 1997-1998гг., чуть позже в 1999-2000 гг. для Атлантико-Европейской области. В холодное полугодие потепление наступает также чуть раньше в центральных районах Арктики в 1998гг., в 2002 со стороны теплого Атлантического течения.

Стоит отметить, что изучение климата Арктики в настоящее время имеет особо важное значение, поскольку он оказывает весомое воздействие на жизнедеятельность всей планеты. А также определяет степень комфортности окружающей среды для проживания и хозяйственной деятельности людей, особенно в суровых климатических условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Братков В.В., Воронин А.П., Климатология и метеорология, 2015г, 239 с.
2. Шмыркова О.О. Анализ термического режима Арктического побережья, 2022г.
3. Шерстюков Борис Георгиевич, Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата, 2016г.
4. Б.П. Алисов, Климатические области зарубежных стран, 1959г, 346 с.
5. Нигматулин Р.И. Заметки о глобальном климате и океанских течениях // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012.Т. 48, № 1.
6. Г.В. Алексеев, Д.Ю. Большианов, В.Ф. Радионов, С.В. Фролов - 95 лет исследований климата и криосферы Арктики в ААНИИ 2015 г.
7. Шерстюков Б.Г. Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. Изд. ГУ ВНИИГМИ-МЦД, 2008, 246 с.
8. Абдусаматов Х.И. О долговременных вариациях потока интегральной радиации и возможных изменениях температуры в ядре Солнца// Кинематика и физика небесных тел. 2005, Т. 21. 471 с.
9. https://studbooks.net/1244921/ekologiya/metod_raznostnoy_integralnoy_krivoy
11. Анализ NOAA: официальный сайт. – URL: <https://psl.noaa.gov/>
10. Изучение толщины льда в Арктике спутниковыми наблюдениями. URL: <https://hi-news.ru/research-development>.
12. Булгаков К.Ю., Федосеева Н.В., Смирнова А. И., Лопуха В.О., Кузнецов А.Д. Обработка и анализ цифровых архивов метеорологических данных удаленного доступа. Учебное пособие. – СПб.: РГГМУ, 2021. – 68 с.
13. Кластеризация пространственных данных. URL: <https://cartetika.ru/>
14. Стукач О.В. Программный комплекс Statistica в решении задач управления качеством: учебное пособие. Изд-во ТПУ, 2011.
15. Архив данных по температуре воздуха: официальный сайт. – URL: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>