



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Изменчивость приземной температуры воздуха на
арктической территории России и её связь с изменениями
циркуляции атмосферы»

Исполнитель Струнина Александра Александровна
(фамилия, имя, отчество)

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

Топтунова Ольга Николаевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 11 » июня 2022 г.

Санкт-Петербург
2022

Оглавление

СОКРАЩЕНИЯ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ И КЛИМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РУССКОЙ АРКТИКИ .6	
1.1 Географическое положение русской Арктики	6
1.2 Особенности природы русской Арктики	8
2. КРУПНОМАСШТАБНЫЕ КОЛЕБАНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ	15
2.1 Североатлантическое колебание.....	15
2.2 Арктическое колебание	19
2.3 Южное колебание	23
2.4 Индекс южных колебаний (SOI).....	26
ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	28
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
Список литературы	69

СОКРАЩЕНИЯ

NAO (САК) – индекс Северо-Атлантического колебания

АО – индекс Арктическое колебания

SOI – индекс южного колебания

ЭНЮК – Эль-Ниньо Южное колебание

ЮВТО – юго-восточная часть Тихого океана

ВВЕДЕНИЕ

Изменения климата, происходящие в северных районах Земли, дают отклик на колебания климата во многих регионах. Арктический регион Российской Федерации является территорией, где колебания таких параметров, как, например, температура воздуха – происходит достаточно стремительно, по сравнению с другими регионами. Также снижение покрова льда, деградация многолетней мерзлоты и повышение речного стока подтверждают эти выводы. Неопределенность климата Арктики в дальнейшем считается нераскрытой и огромной проблемой.

В Арктике условия климата достаточно суровые. Это затрудняет формирование на территории развитой инфраструктуры. Также это является препятствием для освоения различных месторождений. Сейчас происходит развитие Арктической территории в социально-экономическом ключе.

В данный момент на всей территории Арктической зоны происходит её освоение. Это связано со снижением покрова льда, вследствие предположений о глобальном потеплении. Поэтому именно сейчас идеи по освоению Арктики стараются воплотить. Но чтобы освоить эту территорию – прогнозы по состоянию климата в дальнейшем должны быть очень достоверны и на несколько десятков лет вперед.

Изменение климата в Арктике принято изучать отдельно от изменения климата в целом на Земле. Основная причина этого заключается в том, что при современном процессе потепления именно в Арктике климат меняется наиболее интенсивно. Смотря на то, как меняются метеопараметры в Арктике, мы можем получить ответ на вопрос, как будут происходить изменения параметров и для других территорий. В связи с тем, что изучение климата

арктических регионов становится одной из перспективных ветвей изучения климата – тема работа является *актуальной* и представляет научный интерес.

Целью данной работы является выявление закономерностей изменения приземной температуры на территории Русской Арктики и анализ влияния на них крупномасштабной атмосферной циркуляции.

В работе были поставлены следующие задачи

- Изучить крупные циркуляционные процессы, такие как Североатлантическое колебание (САК), Арктическое колебание (АК), Южное колебание – Эль-Ниньо
- Произвести расчеты среднемесячных значений приземной температуры воздуха в течение холодных периодов 1991-2020 г. на основе архивных данных наблюдений 19 метеостанций;
- По полученным значениям построить карты аномалий температуры и дать анализ их хода
- Оценить значимость полученных трендов
- Рассчитать коэффициенты корреляции между индексами колебаний и аномалий и оценить их значимость

Работа докладывалась на СНО в РГГМУ и на ученых семинарах кафедры МП

Объект исследования - температура

1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ И КЛИМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РУССКОЙ АРКТИКИ

1.1 Географическое положение русской Арктики

Арктическая зона Российской Федерации – это северный край Европейской и Азиатской территорий России. К этой территории также относятся и арктические моря между участками суши и островами[1]. Арктическая часть РФ располагается вдоль морских побережий Северного Ледовитого океана и является самой протяженной морской границей Российской Федерации. В зону попадают такие моря, как Лаптевых, Карское, Баренцево, Чукотское и Восточно-Сибирское[2]. Нередко границей Арктики считают Северный полярный круг (66°C с.ш.), но местами арктические условия проявляются в более южных районах[3].

Зона Арктики на территории Российской Федерации имеет свои характерные отличительные черты и совершенно другие демографические, природно – экономические и иные условия[2].

К таким отличиям можно отнести высокую ресурсоемкость, существенную удаленность от основных промышленных центров, зависимость жизнеобеспечения населения и хозяйственной деятельности от поставок продовольствия, товаров первой необходимости и топлива из других регионов России[2].

Территория относится к одной из наименее изведанных и заселенных участков планеты[1]. Для нее характерен очаговый характер промышленно-хозяйственного освоения территорий, а также низкая плотность населения (1-2 чел. на 1 км²) [2].

Для природы Арктики характерна уязвимость от производственной деятельности человека и техногенных чрезвычайных ситуаций[2].

К характерным климатическим чертам можно отнести суровые природно-климатические условия, дрейфующие льды в арктических морях или постоянный ледовый покров[2]. Территория Российской Арктики находится под нетающим слоем снега[1].



Рисунок 1.1 – границы арктической зоны Российской Федерации[2]

На рисунке 1 представлена карта сухопутных территорий Арктической зоны России.

Площадь суши составляет 4,9 млн км². Рельеф включает в себя ландшафты без растительности, покрытые снегом. Острова занимают территорию общей площадью 0,2 млн км²[2].

4 млн км² приходится на внутренние и шельфовые моря арктической зоны РФ[2].

1.2 Особенности природы русской Арктики

Климат Арктической зоны Российской Федерации включает в себя атлантическую, тихоокеанскую и сибирскую подзоны. Первые две подзоны имеют более мягкие погодные условия. В сибирской же части погода более суровая и экстремальная. Длительность зимы составляет около 9 месяцев, а продолжительность летнего сезона – около двух недель.

Вследствие того, что водные массы отдают полученное тепло - в океане и на территории островов климат мягче, чем на материковой части. Осадков на арктической территории в течение года выпадает до 300 мм, водяных паров в воздухе мало[4].

Для природы Арктической зоны России характерно преобладание арктических пустынь и тундровой растительности. Арктические пустыни, принадлежащие России, простираются с южной стороны от острова Врангеля до острова Земли Франца-Иосифа с северной стороны[1]. Низкий радиационный баланс приводит к близким к 0°С средним температурам воздуха в летние сезоны и отрицательной среднегодовой температуре. Характерно существование многолетнемерзлых пород и ледников[2]. 160 000 км² Арктики – это холодные пустыни, в которых при выпадении снега не происходит его таяния, он покрывает поверхность земли и остается круглогодично[1]. В этой зоне не часто выпадают осадки, в связи тем, что арктический холодный воздух не способен удерживать много влаги. Это и

приводит к созданию пустынных условий. Несмотря на близость океана - воздух в Арктике сухой, как в обычной «жаркой» пустыне[1].

Климат, характерный для арктических пустынь – суровый, с холодной и продолжительной зимой и очень холодным и кратковременным летом[1].

Свое название арктические пустыни получили из-за количества осадков, примерно равного в жарких песчаных пустынях[1]. На протяжении 2 месяцев в летний сезон солнце не заходит. Это способствует умеренному прогреванию почвы и воздуха.

По сравнению с умеренными территориями, в большей части Арктики мало растительности, рельефы и породы практически полностью обнажены. В летние сезоны, когда снег тает – создаются хорошие условия для геологических исследований[1].

На территории Арктики климат формируется при очень маленьком количестве солнечного тепла. Такой недостаток восполняется внутренними термодинамическими процессами, протекающими как в системе климата в целом, так и в морской Арктике[5].

В последние года интерес к Арктической зоне возрастает, так как именно в Арктике климат меняется заметно быстро. Также, на протяжении всего XXI в, на арктическое усиление глобального потепления указывают прогнозы и выводы различных публикаций, в которых говорится, что изменения климата в Арктической зоне дошли до порогового значения, впоследствии которого могут происходить необратимые процессы, например, летом может таять лёд[6].

В Земном климате происходили заметные колебания в течение XX в. В целом, их причиной служили обратные связи в системе атмосфера — полярные льды — океан. Арктическая зона является наиболее уязвимой к климатическим изменениям территорией. Значимые процессы климата и

обратные связи, происходящие и действующие в климатической системе Арктики, недостаточно изучены. К одной из причин относят недостаток данных наблюдений, а также проблемы моделирования климата Арктики. В том, как работает и функционирует система климата в целом, и какие же факторы вызывают и определяют изменения климата в Арктических регионах, существуют большие пробелы. Именно их восполнение – это необходимое условие для уточнения оценок будущих колебаний в климате и что они могут спровоцировать[6].

Климат и различные параметры природной среды меняются. Изменчивость климата и других параметров природной среды значительно связаны с процессами непосредственного взаимодействия атмосферы и океана в широком диапазоне пространственно-временных шкал.

В Арктическом регионе наблюдается большая изменчивость климата, если сравнивать с другими частями Земли.

Это приводят к изменчивости в уязвимых экосистемах, влияют на здоровье, экономические секторы, уровень жизни северян. Последствия изменчивости климата на общество рассматривается вместе с последствиями арктических трансформаций в социально-экономических системах[5].

О дальнейших климатических изменениях Арктических территорий очень мало известно. Это можно объяснить тем, что глобальный климат терпит изменения в настоящий момент, и наши знания недостаточны для выявления причин современной изменчивости.

Арктический климат имеет особые условия формирования, что затрудняет построение хороших надёжных прогнозов будущего состояния климата в Арктической зоне.

Температура в Арктике формируется по-особенному. Очень усиливает изменчивость климата в Арктике деградация морских льдов. Из Северного

Ледовитого океана выносятся пресная вода, воздействуя на распространение морского льда. Это также меняет и циркуляцию в ближайшей акватории, что приводит к изменению климата как в близлежащих территориях, там и на более масштабном уровне[7].

Также близость Арктики к геомагнитному полюсу вызывает на данной территории располагающие условия, чтобы заряженные космические и солнечные лучи попадали в атмосферу. Интенсивности их потоков зависят от солнечной активности и её изменений.

Температурный режим в других регионах Земли в основном определяется количеством солнечной радиации, доходящей до поверхности земли. Если брать Арктический регион, то в большинстве случаев там будет отрицательный радиационный баланс. Всё потому что в исследуемой зоне большая чувствительность к тому, что в атмосфере изменяются парниковые газы и соответственно количество облачности. То есть атмосфера не способствует излучать в космос адвективное тепло. Таким образом парниковый эффект играет важную роль при формировании климата Арктики.

В большей степени количество тепла в Арктике определяется адвективным теплом. Его количество зависит от процессов в океане и атмосфере. Адвективное тепло приносят потоками с океана и течениями воздуха с территорий, на более низких широтах. Тепла от солнца на территории Арктики очень мало. Таким образом, маленькая высота солнца над горизонтом, а также лёд и снег, обладающие большой отражательной способностью и формируют температурный фон в Арктике.

Таким образом, обратные связи между присутствующими несколькими переменными источниками тепла в Арктике делают её территорией наиболее сильных колебаний и изменений климата.

Циркуляция атмосферы – это важнейший внутренний процесс в системе климата Земли. Она участвует в формировании климата и его изменчивости.

Когда изменения в перестройке циркуляции атмосферы длятся в течение большого периода, то такое влияние её сказывается на климате. Циркуляция перераспределяет тепло, тем самым может оказывать воздействие на глобальный климат и образовывать новые условия в атмосфере. Влияние циркуляции на изменчивость температуры сказывается и на региональном уровне.

Из океанических областей перераспределение влаги и тепла оказывают отепляющее воздействие на континентальные области, что влияет на климат и погоду в этих областях. Из-за того, что у поверхности океана и в атмосфере очень разная температура, то, когда океан накапливает тепло в летний период – зимой происходит перераспределение этого тепла в атмосферу. Это происходит под воздействием зональной циркуляции[8].

Изменчивость циркуляции может быть, как вследствие собственных естественных колебаний, так и под воздействием внешних факторов.

Внешние колебания и воздействия на циркуляцию вызывают вынужденные колебания в системе климата. Это образует возмущения в циркуляции атмосферы, как и её собственные возмущения[8].

Атмосфера имеет небольшую инертную составляющую системы климата, при множестве влияний на неё и из-за внешних факторов. Вследствие этого процессы в ней возникают только под действием внешних энергетических источников.

На изменение климата оказывают влияние много факторов, в том числе и энергетических источников. Например, солнечная активность. Климат может не изменяться, если не будет колебаний в солнечной светимости и параметрах земной орбиты. Но такого быть не может, постоянно наблюдаются малые изменения. Солнечные пятна приводят к высокой солнечной активности, особенно когда их число велико. Также существуют и солнечные факелы, от которых солнечная активность увеличивается, но не так сильно.

Но кроме этих двух параметров оказывать влияние на изменение солнечной активности может и изменчивость диаметра Солнца.

Солнце вызывает потоки заряженных частиц и выступает в роли модулятора потока лучей из космоса. Именно они влияют на верхнюю атмосферу земли в частности в высоких широтах. Посредством этого создаются возмущения в циркуляции атмосферы и возникают последствия для климата и погоды[8].

Большую роль в усилении потепления климата играет антропогенный фактор. Большую часть масштабного потепления определяет повышение концентрации парниковых газов в атмосфере. Их увеличение происходит в связи с человеческой деятельностью[8].

Очень важную роль в климатических изменениях количества радиации, которую поглощает поверхность Земли, играет астродинамический фактор.

Когда Земля взаимодействует с Луной и другими планетами – то в движении Земли по орбите и в наклоне оси Земли происходят изменения. Эти воздействия создают изменения в скорости движения Земли по орбите, меняют скорость вращения Земли вокруг своей оси. Изменяется расстояние от Земли до Солнца, что влияет на космическую часть процессов, формирующих климат Земли[8].

Также меняются условия поглощения солнечной радиации, продолжительность сезонов и суммарный приток тепла за год от солнца в системе климата. Угол падения лучей Солнца на землю определяет энергию солнца, которую поглощает Земля. Этот угол не зависит от угла наклона земной оси к эклиптике[8].

Также на указанные изменения, кроме радиационных, влияют и динамические возмущения во земных оболочках. Периодические гравитационные воздействия (зависят от расстояния возмущающих тел до

Земли и от их массы) разных тел системы Солнца вызывают непостоянство в движении Земли. Воздействия по продолжительности могут составлять от нескольких дней до нескольких тысяч лет[8].

Необходимо отметить колебания в системах климата и солнца. Множество нелинейных взаимодействий происходит в сложной колебательной системе климата. За много лет колебания стали практически с синхронным режимом движения, во время которого происходит соизмеримость частот, что проявляется достаточно часто, а также устанавливаются особые фазовые соотношения между колебаниями. В поведении сложных колебательных систем происходит солнечной системе. Также это касается и изменения в характеристиках системы климата. Так отклики могут быть основой ритмов различной деятельности и частот в системе климата, что послужит причиной долгопериодных изменений в параметрах системы климата[8].

2. КРУПНОМАСШТАБНЫЕ КОЛЕБАНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

2.1 Североатлантическое колебание

Североатлантическое колебание (САК) – это одна из важнейших характеристик крупномасштабной циркуляции атмосферы в северном полушарии. Масштаб его проявления составляет от нескольких суток до нескольких столетий. Явление выражено во все сезоны года[6].

Сущность североатлантического колебания заключается в перераспределении атмосферных масс между Арктикой и субтропической Атлантикой. САК имеет две фазы, и при переходе из одной фазы в другую происходят большие изменения в переносе влаги и тепла, изменяется поле ветра, количество, интенсивность и траектория штормов[6]. В последние десятилетия это явление изучается как один из значимых источников глобального потепления[6].

Североатлантическое колебание является квазисинхронным явлением. Чтобы его рассчитать, существуют несколько подходов. Один из первых методов для расчёта индекса САК – это разность нормированных аномалий приземного давления между станциями Понта Делгада (Азорские острова) и Акурейри (Исландия), которые характеризуют состояние азорского максимума и исландского минимума[6]. Результаты расчёта представляют обычно в гПа, либо в долях дисперсии.

Другой подход для расчета САК заключается в расчёте на основе разложения полей аномалий геопотенциала $H700$ по эмпирическим ортогональным функциям (ЭОФ), а в дальнейшем по «повернутым» ЭОФ на

основе Varimax-вращения. Индексы публикуются в Бюллетене по диагнозу климата (Climate diagnostic bulletin) Центра прогноза климата США.

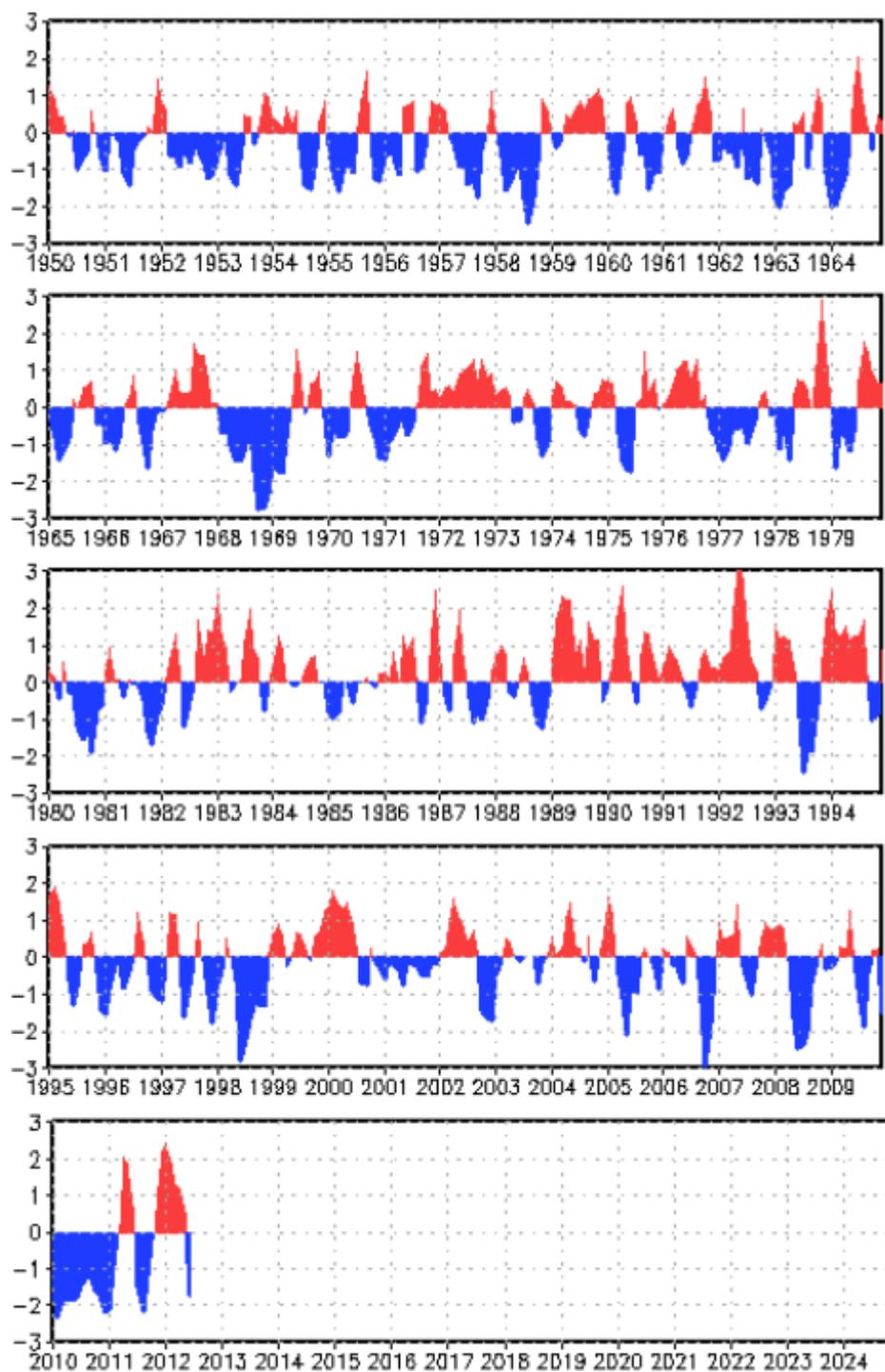


Рисунок 2.1 - Среднемесячные значения индекса САК (1950-2012 гг.)[9].

К причине возникновения САК относят прямую связь системы океан-атмосфера: а именно увеличение поверхностной температуры океана в тропической зоне, которые приводят к усилению Азорского антициклона и углублению Исландской депрессии.

Положительная фаза колебания состояния атмосферы считается при положительном значении индекса североатлантического колебания, а отрицательная – при отрицательном значении.

Во время положительной фазы колебания центры действия атмосферы (исландский минимум и азорский максимум) хорошо развиты и смещены к северу. Между ними увеличены градиенты давления и усилена зональная циркуляция. При отрицательной фазе наблюдается ослабление зонального переноса и усиление меридиональных процессов[6].

Рисунок 2.2 демонстрирует две фазы североатлантического колебания.

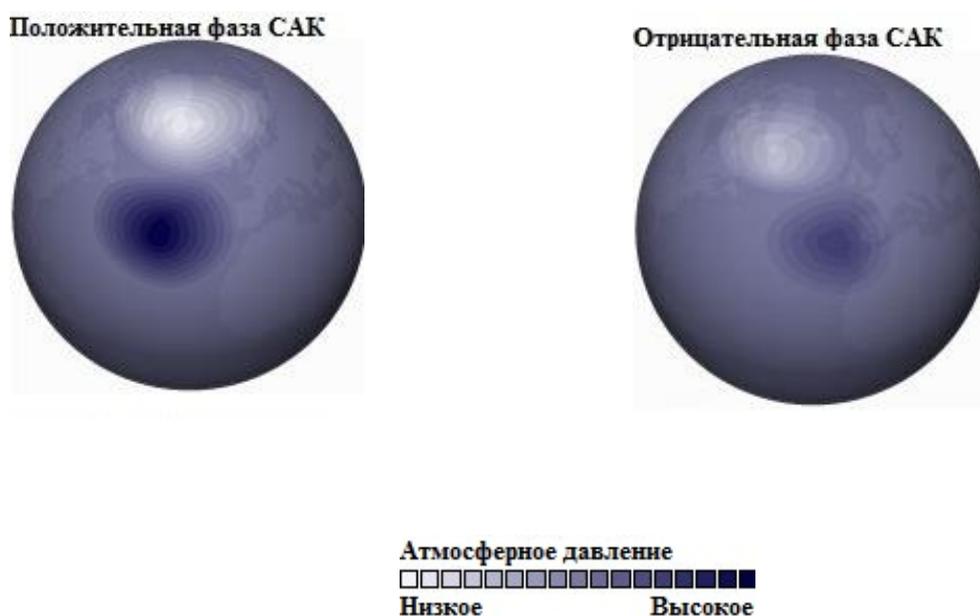


Рисунок 2.2 - Интенсивность атмосферного давления в североатлантических ЦДА при различных фазах САК[6]

Как видно, при положительной фазе, при высоких значениях индекса, происходит усиление субтропического максимума давления и углубление исландского минимума. Это ведет с большим градиентам между ними, усиливаются ветры, несущие влажный и теплый воздуха с атлантического океана в северную Европу. В тоже время в Гренландии и Северной Америке преобладает сухая и холодная погода. В период низких значений индекса САК ослабевают интенсивность атмосферных образований, снижается интенсивность ветров, и направление их смещается в сторону Средиземноморья, где устанавливается тёплая, влажная погода. В северной Европе в этом случае наоборот преобладает сухая и холодная погода.

Положительная фаза САК в атмосфере характеризуется отрицательной аномалией приземного давления и геопотенциала в исландском минимуме и положительной аномалией в азорском максимуме. Наблюдается отрицательная аномалия приземной температуры воздуха в районе п-ов Лабрадор-Гренландия и положительная аномалия в Европе. Происходит усиление зонального типа циркуляции, ветров в тропосфере в зоне 50–60° с.ш.; смещение траекторий циклонов на север на 200–400 км относительно их среднего положения, ослабление процессов блокирования в атмосфере[6].

В отрицательной фазе САК в атмосфере наблюдается положительная аномалия приземного давления и геопотенциала в исландском минимуме и отрицательная аномалия в азорском максимуме. Положительная аномалия приземной температуры воздуха в районе п-ов Лабрадор – Гренландия и отрицательная аномалия в Европе. Происходит усиление меридионального типа циркуляции; ослабление ветров в тропосфере в зоне 50–60° с.ш. Смещение траекторий циклонов на юг, Усиление процессов блокирования в атмосфере[6].

Одного преобладающего масштаба изменчивости индекса североатлантического колебания нет. Изменения в индексе САК могут возникать как течение месяца, сезона, так и в межгодовом масштабе. Это

связано с тем, что североатлантическое колебание возникает из внутренних атмосферных процессов. В них различные по масштабу движения взаимодействуют друг с другом и генерируют случайные (следовательно, непредсказуемые) изменения[6].

Также существуют периоды, когда САК с одним знаком может существовать в течение длительного периода (например, недели, месяца или нескольких зим). Это означает, что по отношению к атмосфере существуют внешние факторы, которые способны поддерживать длительные аномалии циркуляции атмосферы, связанные с явлением североатлантического колебания[6].

2.2 Арктическое колебание

Арктическое колебание (АО) или изменения северной циркуляции — индекс изменения давления на уровне моря к северу от 20° с.ш., который характеризует аномалию давления в Арктике по отношению к давлению в более южных широтах северного полушария с центром измерения на широтах $37-45^{\circ}$ с.ш.[10]. Представляет собой возвратно-поступательное смещение атмосферного давления между Арктикой и средними широтами Северной части Тихого океана и Северной Атлантики[11].

Это один из основных факторов, определяющий характер погоды северного полушария в течение зимнего периода. Изменение индекса на протяжении длительных интервалов времени не имеет строгой периодичности[9]. Характеризуется несезонными аномалиями давления на уровне моря одного знака (низкое приземное давление) в Арктике, уравновешенными аномалиями противоположного знака (высокое давление) с центром около $37-45$ градусов северной широты, и сильными западными ветрами в средних широтах.

Арктическое колебание образуется вследствие большой разницы температур между умеренными средними широтами и чрезвычайно холодными полярными регионами. Возникающие ветры отклоняются на восток благодаря силе Кориолиса.

Арктическое колебание имеет тесную связь с Североатлантическим колебанием (САК), которое более подробно описывает атлантический компонент этой динамики климатической системы. Арктическое колебание оказывает влияние на общие погодные условия всего северного полушария. Он основан на колебаниях в ходе струйного течения, которое иногда проходит равномерно в поясе западного ветра, но иногда начинает колебаться, а затем колеблется далеко на север и юг (волны Россби при западном ветре дрейфуют)[11].

Арктическая осцилляция относится к трем метеорологическим центрам действия. К ним относятся низкое давление в Исландии («Исландский минимум»), давление на Алеутских островах («Алеутский максимум»), высокое давление над Бискайским заливом («Западноевропейский высокий»). Первый - это атлантический компонент полярного вихря, второй - северный компонент северной части Тихого океана, а третий - северо-восточный компонент Азорского возвышения. Все они являются постоянными основными признаками климатической системы[11].

Арктическое колебание (осцилляция) это один из основных климатических индексов, который характеризует несезонные вариации атмосферного давления над уровнем моря севернее 20° с. ш. Выражается в изменении давления в Арктике и противоположных изменениях в районе 37° — 45° с. ш. Индекс АО определяется как первая мода разложения на естественные ортогональные функции аномалий высоты поверхности 1000 гПа.

Для вычисления долгосрочного среднемесячного значения аномалии высоты 1000 гПа от 20° северной широты до Северного полюса выполняется статистический анализ основных компонентов для среднего положения воздушных масс и затем определяется дисперсия, и происходит корреляция. Индекс арктического колебания - это среднее дневное отклонение от этого месячного базового значения[11].

Арктическую осцилляцию делят на две фазы: с высоким индексом (теплая фаза) и низким индексом (холодная фаза)[12].

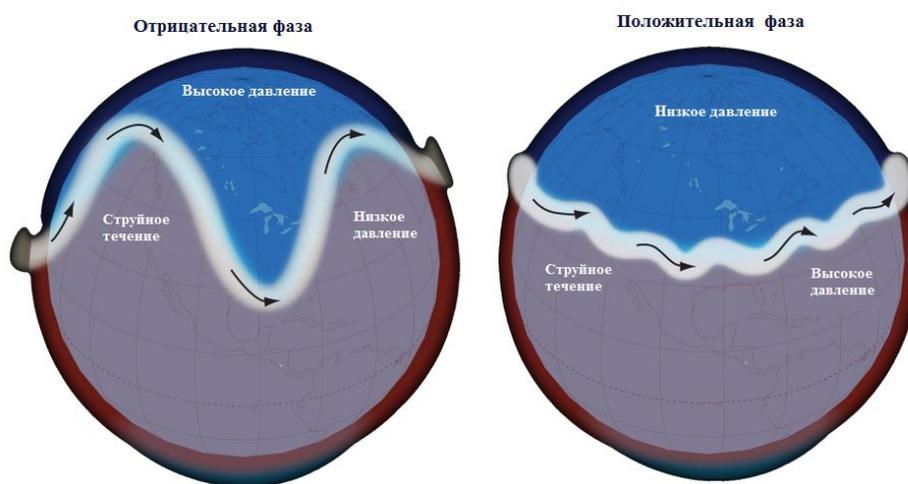


Рисунок 2.3 – Проявление различных фаз Арктического колебания в атмосфере

Во время наступления теплой положительной фазы происходит перенос теплого атлантического воздуха в Северную Европу и Сибирь. Зимой воздух проникает и в полярные регионы, что отрицательно влияет на толщину льда[11]. В Арктику поступают более солёные и теплые воды из Атлантического океана, вследствие чего слои холодной воды, подпертой льдом, уменьшаются. Когда АО сильно положительная, сильный среднеширотный струйный поток направляет атлантические циклоны и штормы на север, в более высокие широты, уменьшая вспышки холодного

воздуха в средних широтах. Это приводит к формированию более мягкой и влажной погоды в Северной Европе и более теплым климатическим условиям в Южной Европе[15]. Положительная фаза АО характеризуется более низким, чем в среднем, давлением воздуха над Арктикой в сочетании с более высоким, чем в среднем, давлением над северной частью Тихого и Атлантического океанов. В этих условиях реактивный поток находится дальше на север, чем в среднем, и штормы могут смещаться к северу от своих обычных путей. Таким образом, в средних широтах Северной Америки, Европы, Сибири и Восточной Азии в положительную фазу АО обычно наблюдается меньше вспышек холодного воздуха, чем обычно[10].

При наступлении отрицательной фазы полярный холодный воздух проникает к югу, что ведет к понижению температуры в Европе (особенно в зимние месяцы). В момент отрицательной фазы арктической осцилляции холодная вода остается в бухтах северных морей, что препятствует таянию морского льда. То есть, когда АО сильно отрицательная, вихрь вокруг Арктики ослабевает[13]. Арктический воздух проникает в средние широты Европы[12], а южные циклоны вызывают штормы в Средиземноморье [13]. Отрицательная фаза АО имеет повышенное давление воздуха над полярным и Арктическим регионом и пониженное давление над северной частью Тихого и Атлантического океанов на 45-й параллели с.ш.[13]. В этих условиях реактивный поток смещается к экватору, поэтому воздушная река, опоясывающая земной шар, находится к югу от своего среднего положения. Следовательно, районы средних широт с большей вероятностью будут испытывать вспышки холодного полярного воздуха зимой, когда АО отрицательный[9].

Несмотря на то, что взаимосвязь между центрами действия атмосферы проявляется в течение всего года, амплитуда колебания максимальна в зимний сезон, когда атмосфера динамически наиболее активна[13]. Разброс месячных

основных показателей АО зимой большой (около 2), в летнее полугодие невелик (около 0,5). Это означает стабильность погодных условий[11].

Арктическое колебание (АО) относится к характеру циркуляции атмосферы в средних и высоких широтах Северного полушария. Наиболее очевидным отражением фазы этого колебания является расположение штормового потока в средних широтах с севера на юг. Таким образом, АО может оказывать сильное влияние на погоду и климат в крупных населенных пунктах Северной Америки, Европы и Азии, особенно зимой.

2.3 Южное колебание

К ярко выраженным природным возмущениям и источникам возмущений как в региональной, так и глобальную системе атмосферной циркуляции, относят феномен Эль-Ниньо, располагающийся в восточном экваториально-тропическом секторе южной части Тихого океана[14].

Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК) – это основной климатический сигнал, который обуславливает межгодовую изменчивость глобальной системы океан-атмосфера[15]. Является наиболее интенсивной модой межгодовой изменчивости в тропической зоне[16].

Понятие Эль-Ниньо - Южное колебание можно разобрать на две части. Термин Эль-Ниньо (с испанского языка - «мальчик, ребенок», здесь конкретно: «ребенок Христос») - означает появление нециклического, необычного; то есть в данном случае изменившегося течения и связанные с этим теплые поверхностные температуры моря. Время появления – чаще около Рождества, отсюда и происходит название[17]. Вторая часть названия, описанное как колебание, относится в метеорологическим условиям, относящимся к данному понятию[17]. В качестве основы для измерения

можно использовать такие показатели, как температуру поверхности моря и давление воздуха.

Его формирование происходит в результате ослабления пассатных ветров и формирования аномалии западного ветра. Происходит резкое потепление верхнего слоя воды [14]. Впоследствии происходит перенос теплых экваториальных водных масс из западной акватории тропической зоны Тихого океана на восток и последующему выравниванию термоклина до берегов Южной Америки. Происходит смещение центров действия атмосферы.

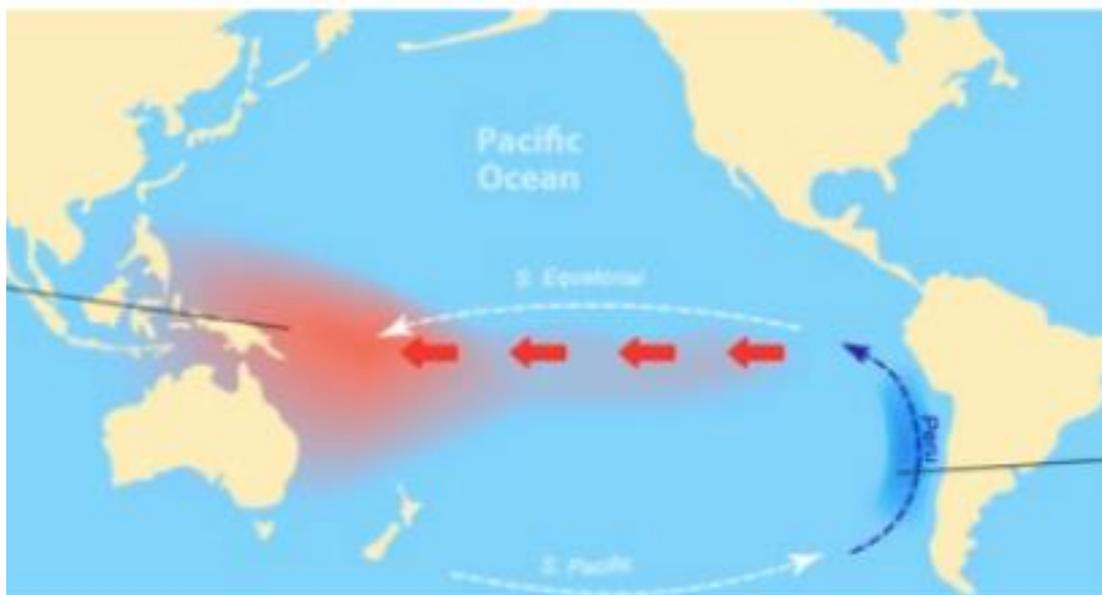


Рисунок 2.4 – нормальное состояние. Экваториальные ветры направляют воздушные массы на восток[18]

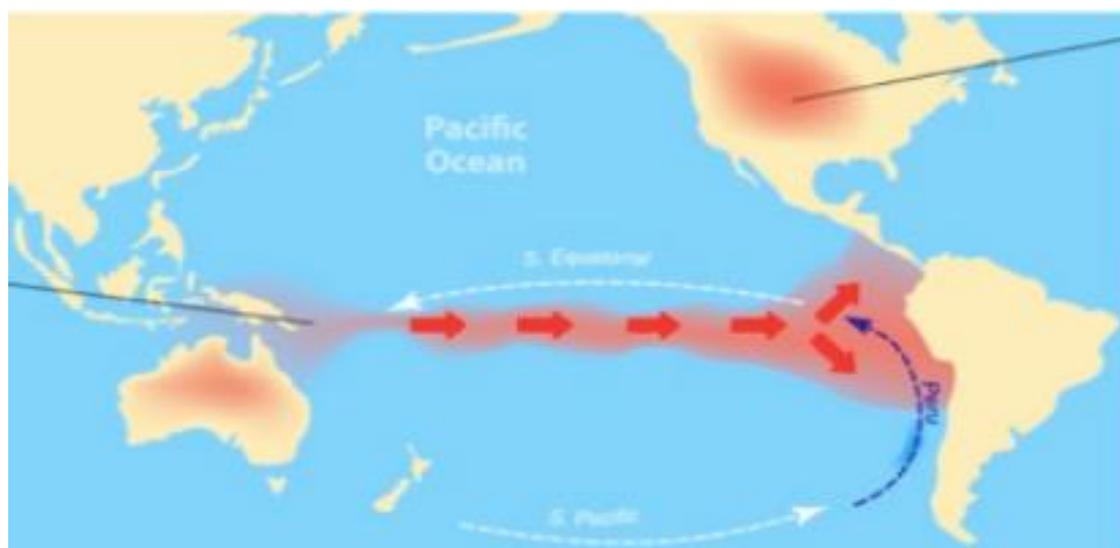
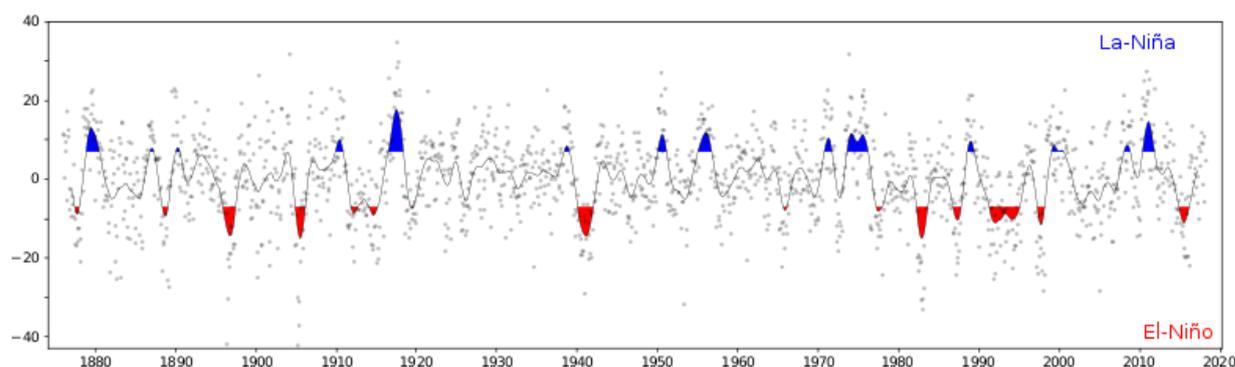


Рисунок 2.5 – состояние при Эль-Ниньо. Западные ветры ослабевают. Теплая вода направляется на восток[18]

Для характеристики Эль-Ниньо – Южное колебание обычно используют индекс Южного колебания. Он представляет нормированную разность приземного давления между о. Таити и портом Дарвин (Австралия). Индекс Южного колебания характеризует количественное изменение давления между устойчивыми областями повышенного и пониженного давления в экваториальной части Тихого океана [15]. С 1985 года, индекс, который характеризовал холодные и теплые эпизоды Эль-Ниньо Южное Колебание, стали рассчитывать, как аномалию температуры поверхности океана в определенных тропических районах Тихого океана. Со временем было выявлено, что проявления холодной и теплой фаз Эль-Ниньо Южного колебания замечены в аномалиях климата и погоды не только над тропической зоной Тихого океана, но и во внетропических широтах. Этому способствуют дальние связи системы океан-атмосфера. [15]. Именно за счет механизма далекодействующих связей это феномен оказывает воздействие на многие районы Земли, и, также, определяет особенности погодных режимов. К основной проблеме Эль-Ниньо относят нерегулярность и непериодичность этого явления[16]. Пространственно-временная структура Эль-Ниньо — Ла-

Нинья в районе юго-восточной части Тихого океана (ЮВТО) близка к структуре изменений земного климата за последние десятилетия. Так как воды Мирового океана считаются одним из основных факторов, который определяет состояние глобальной системы климата, то есть её региональную изменчивость следует рассматривать в качестве приоритетной[16]. Эль-Ниньо Южное колебание описывает сложную взаимосвязанную систему океанских течений и циркуляции атмосферы Земли в экваториальной части Тихого океана. Эль-Ниньо обозначает океанические связи, а Южное колебание или Южное колебание обозначает атмосферные связи[17].

Индекс южного колебания с 1876 г., явления Эль-Ниньо ниже центральной оси[17]



2.4 Индекс южных колебаний (SOI)

Индекс южных колебаний (SOI) – это показатель сильных колебаний давления на уровне моря. Колебания температуры воды в восточной тропической части Тихого океана хорошо коррелируются с этим индексом. Этот индекс имеет две фазы (положительную и отрицательную). И выявлено, что продолжительность эти фаз совпадает температурой воды в восточной тропической части Тихого океана. То есть при положительных значениях индекса наблюдаются вода в данной части океана аномально холодная, и наоборот. Давление для расчёта индекса на уровне моря измеряется между

Таити и Дарвином. Феномены Эль-Ниньо (Ла-Ниньо), во время которых на Дарвине выше нормы и ниже нормы на Таити характеризуют связаны с отрицательной фазой SOI[19].

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В ходе магистерской работы был проведен анализ связи изменений температуры воздуха на арктической территории России с крупномасштабными колебаниями атмосферы. Так как потенциальное изменение климата в Арктике дает России определенные перспективы экономического развития, например, в использовании Северного морского пути, то в связи с этим анализировались данные исключительно холодного времени года, то есть с октября по апрель включительно.

Всего для исследования было отобрано 19 метеостанций, расположение которых представлено на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – расположение метеостанций на Арктической территории России

Кроме того, для анализа использовались данные реанализа NCEP NCAR с шагом 2.5 x 2.5 градуса. и данные индексов NAO, AO, SOI.

В ходе работы были использованы и проанализированы с помощью пакета EXCEL реальные данные 19 метеостанций, которые были взяты с Мирового центра данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации[20].

Расчеты аномалий и трендов производились в MS EXCEL, часть результатов визуализированы в Python, часть с помощью программного пакета Surfer 9.

Так как согласно докладам IPCC современный климат в данный момент изменяется, было интересно посмотреть, как изменилась и изменилась ли температура воздуха на территории русской Арктики за последние 30 лет. В начале работы были рассчитаны новые нормы температуры, характерные для исследуемого периода 1991-2020гг для каждой из 19 метеостанций. Далее, в ходе расчётов были получены средние значения температуры за каждый месяц и год исследуемого периода. Опираясь на полученные значения, для каждой метеостанции были рассчитаны аномалии температуры в период с октября по апрель с 1991 по 2020гг.

Для визуального восприятия, полученные результаты были преобразованы для дальнейшего построения карт аномалий температуры на территории русской Арктики. С помощью программного обеспечения Surfer были получены карты распределения аномалий температуры на исследуемой территории. Аномалии были осреднены и представлены за каждый месяц рассматриваемого периода. Для более подробного рассмотрения период с 1991 по 2020 годы был разбит на 3 десятилетия. Период 10 лет является достаточным, чтобы рассмотреть характер изменчивости.

Перейдем к анализу температурных аномалий в октябре 1991-2020гг.

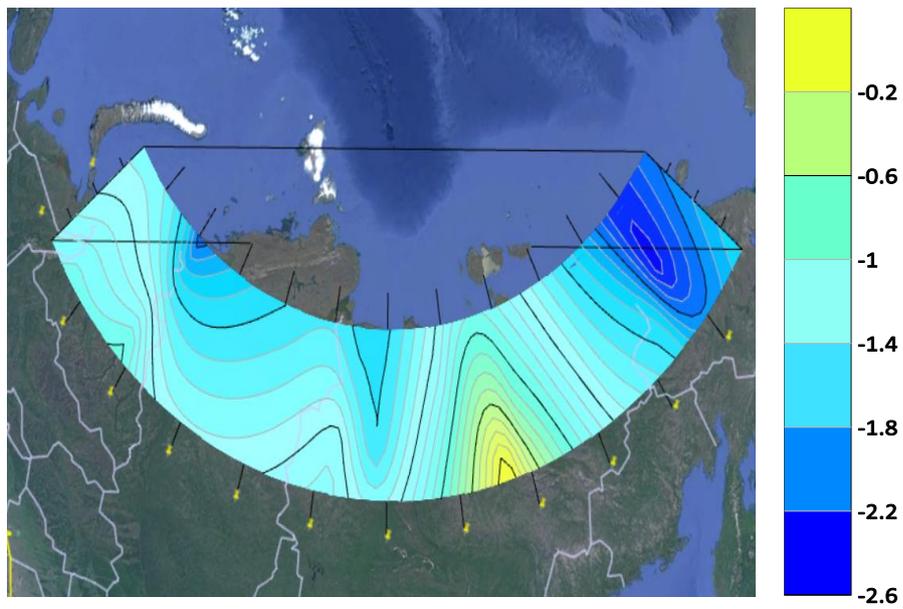


Рисунок 3.2 (а) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в октябре за период 1991-2000гг

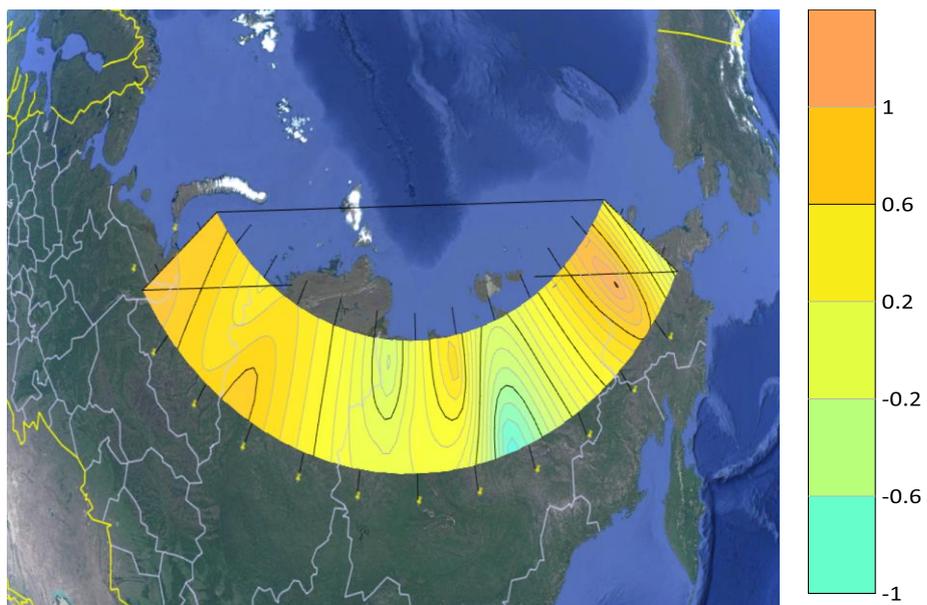


Рисунок 3.2 (б) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в октябре за период 2001-2010гг

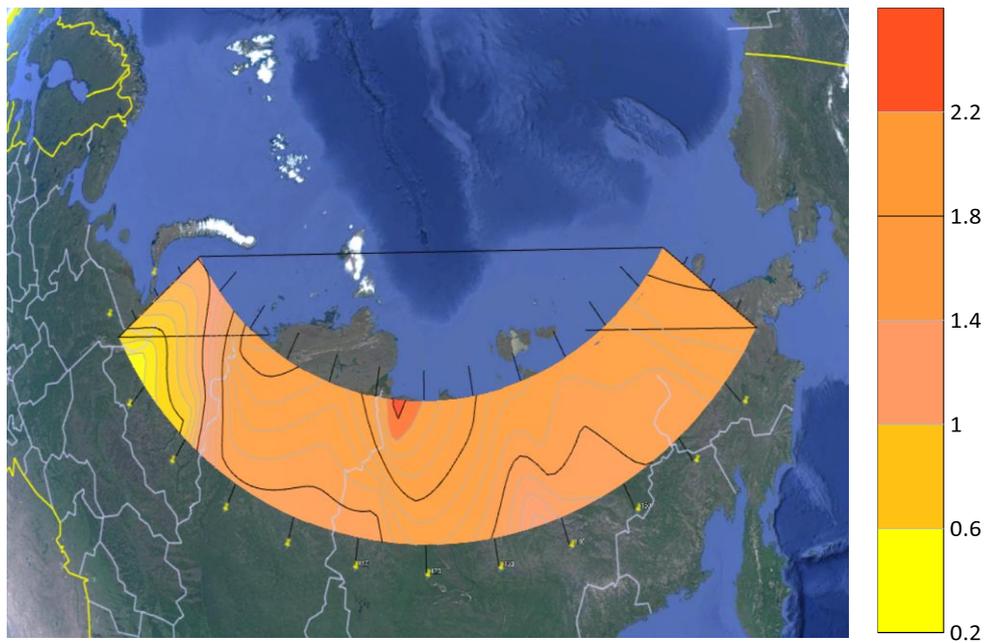


Рисунок 3.2 (в) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в октябре за период 2011-2020гг

Как видно из полученных карт, в течение трех десятилетий рассматриваемого периода наблюдается повышение температуры в октябре для всего исследуемого региона. Наиболее значительные изменения характерны для дальневосточного округа, где в первом десятилетии хорошо прослеживаются наиболее сильные отклонения температуры от нормы на $-2,6^{\circ}\text{C}$. Во втором же десятилетии, в период 2001-2011 гг. на этой же территории выявлены самые сильные отклонения температуры, но уже со знаком плюс. Температура в целом на всей рассматриваемой территории русской Арктики увеличивается в течении всего исследуемого периода.

Обратимся к рисункам 3.3, демонстрирующему аномалии температуры ноября за 30 лет.

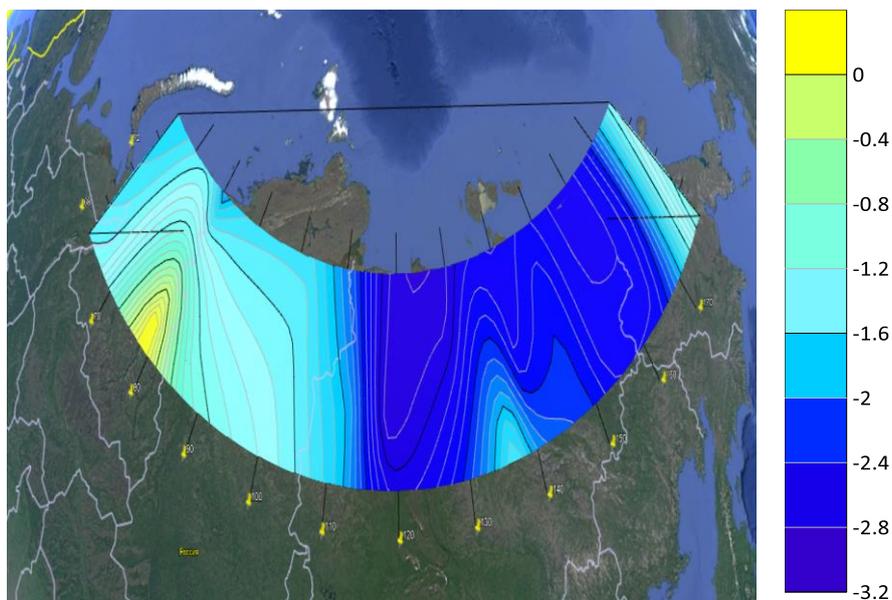


Рисунок 3.3 (а) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в ноябре за период 1991-2000гг

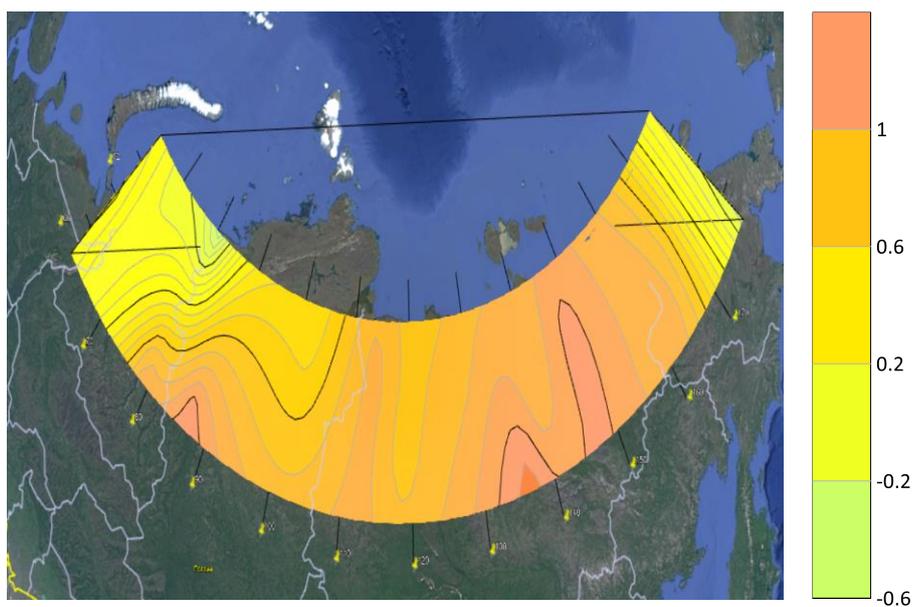


Рисунок 3.3 (б) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в ноябре за период 2001-2010гг

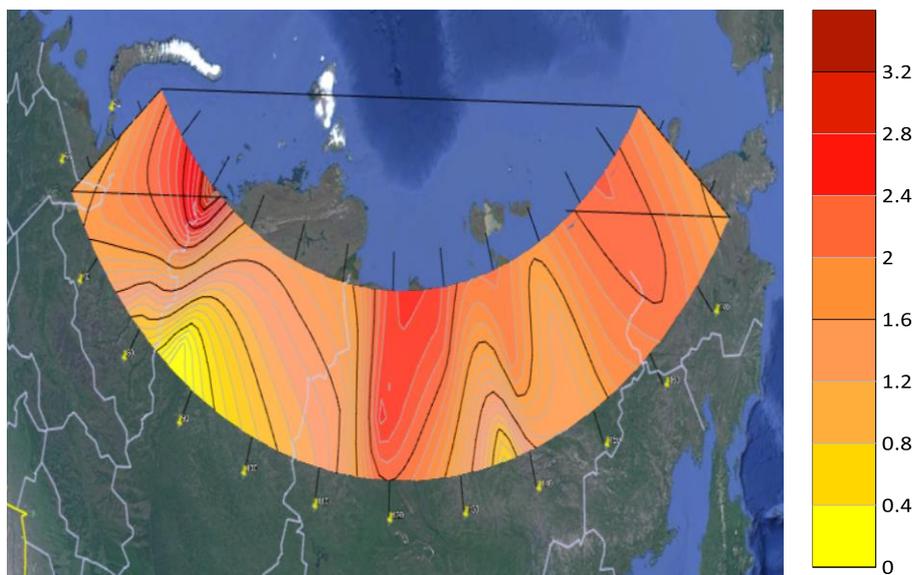


Рисунок 3.3 (в) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в ноябре за период 2011-2020гг

Как видно из полученных карт, в целом, температурные аномалии на всей территории русской Арктики за период 1991-2000 года отрицательны. В первом десятилетии исследуемого периода наибольшие значения аномалий также наблюдаются на территории Дальнего Востока, а также в восточном секторе Арктики. Рассматривая второе десятилетие исследуемого периода, заметим, что территория восточной Сибири и Дальнего Востока демонстрирует наибольшие отклонения температуры, но уже с положительным знаком, относительно всей территории Арктики.

Если обратиться к периоду 2011-2020гг, то вышеупомянутые территории также демонстрируют отклонения температуры в большую сторону. Причем, сравнивая карты аномалий температуры за первое и последнее десятилетие исследуемого периода, можно отчетливо увидеть, что в центральной части Арктики наблюдаются наибольшие отклонения температуры: в период 1991-2000 гг. отклонение от нормы составляло $-3,2^{\circ}\text{C}$, а в период 2011-2020 $3,2^{\circ}\text{C}$. Таким образом амплитуда колебаний в течение 30 лет составила в среднем $6,4^{\circ}\text{C}$.

Перейдем к рассматриванию аномалий температуры в декабре.

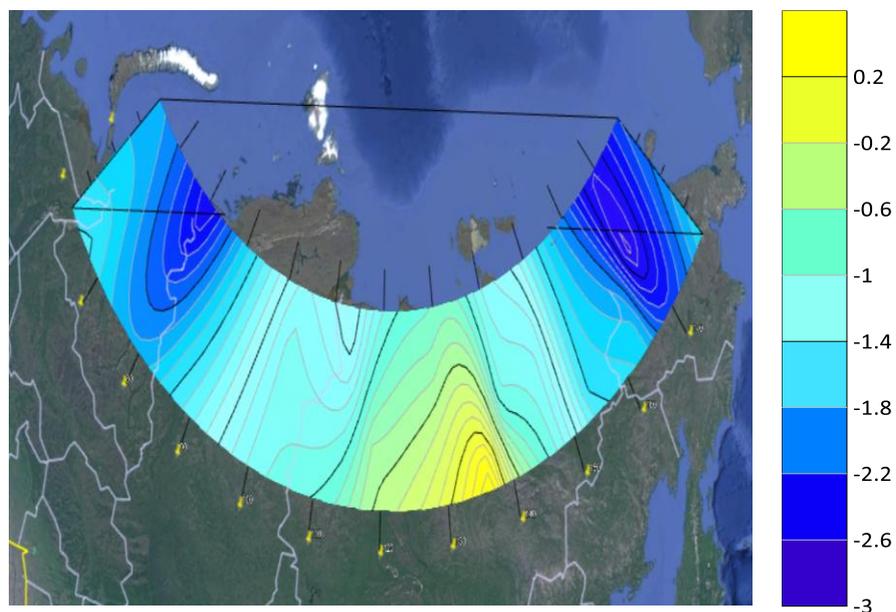


Рисунок 3.4 (а) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в декабре за период 1991-2000гг

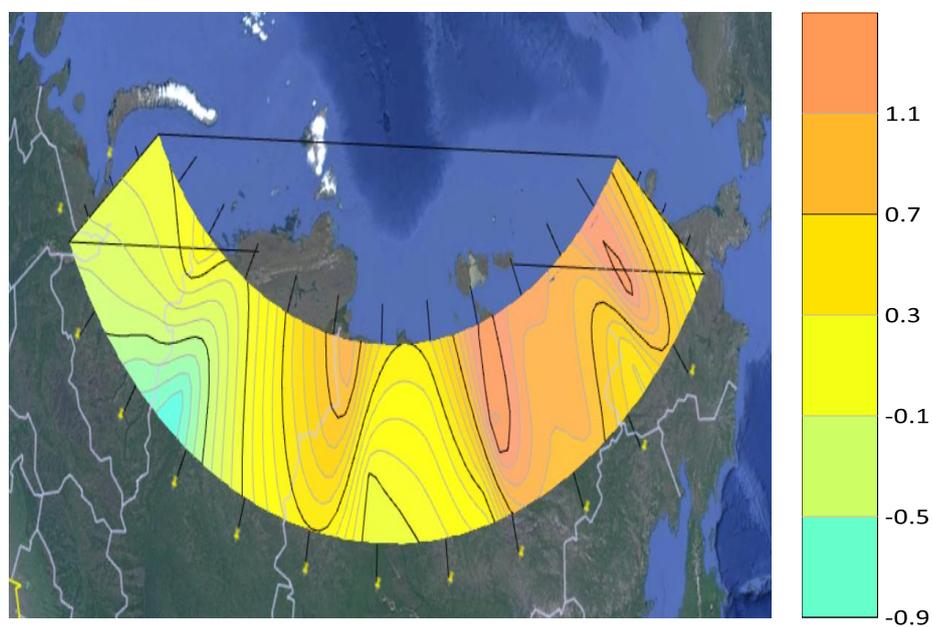


Рисунок 3.4 (б) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в декабре за период 2001-2010гг

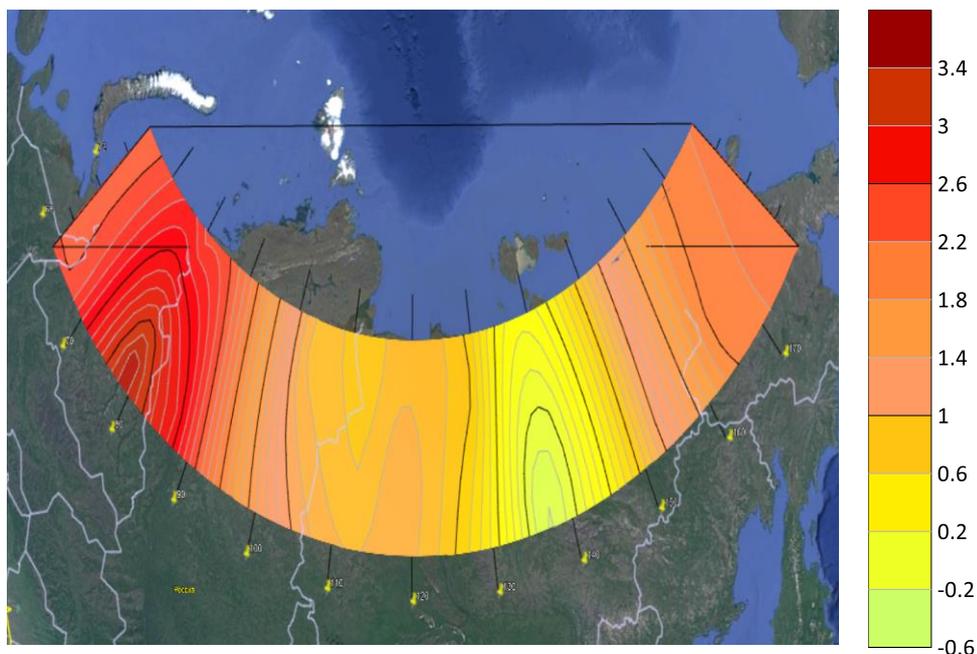


Рисунок 3.4 (в) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в декабре за период 2011-2020гг

На рисунке 3.4 (а) изображена карта, демонстрирующая аномалии температуры в период 1991-2000гг. Отчётливо видно, что наиболее сильные отклонения от нормы характерны для территории западной Сибири и Дальнего Востока. В этих секторах температура на 3°C ниже климатической нормы. Из рисунка 3.4б видно, что в целом наблюдалось повышение температуры воздуха. Переходя к анализу карты, демонстрирующей аномалии температуры в 2011-2020гг, и сравнивая её с картой первого десятилетия, выявлено, что на территории западной Сибири и дальнего востока наблюдаются также наибольшие отклонения температуры от климатической нормы, но уже в положительную сторону.

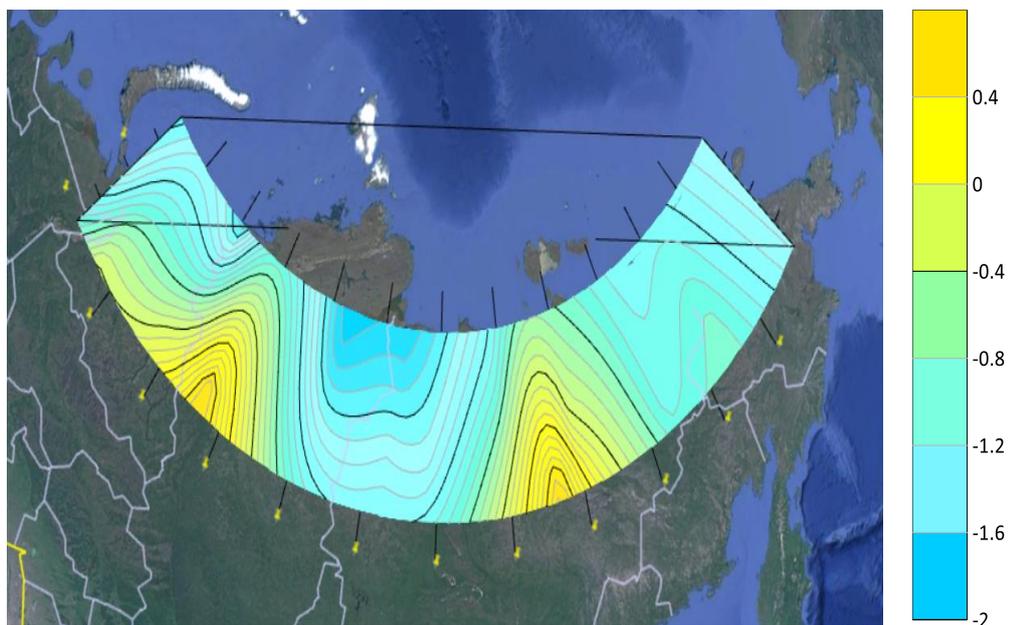


Рисунок 3.5 (а) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в январе за период 1991-2000гг

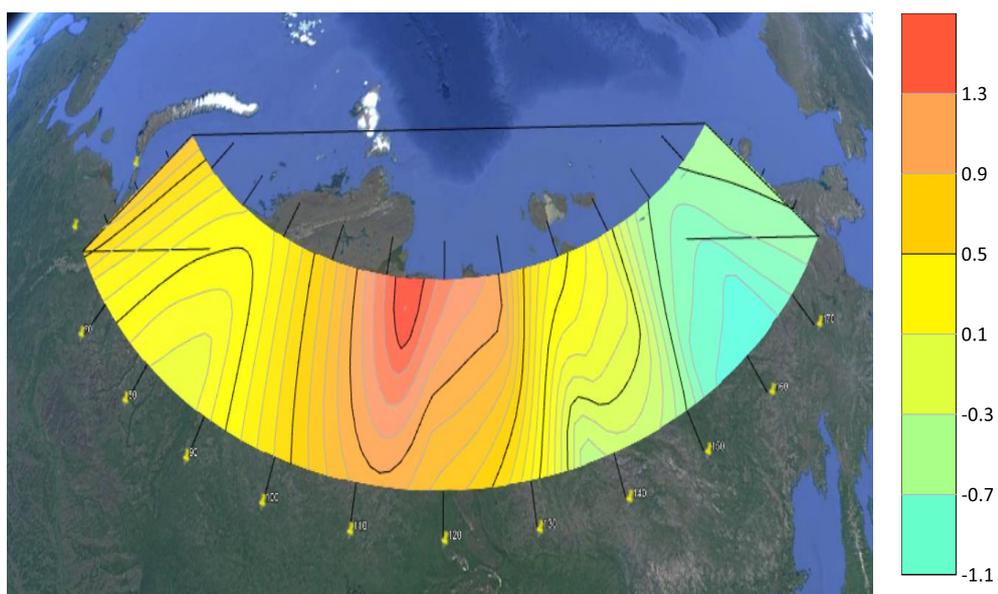


Рисунок 3.5 (б) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в январе за период 2001-2010гг

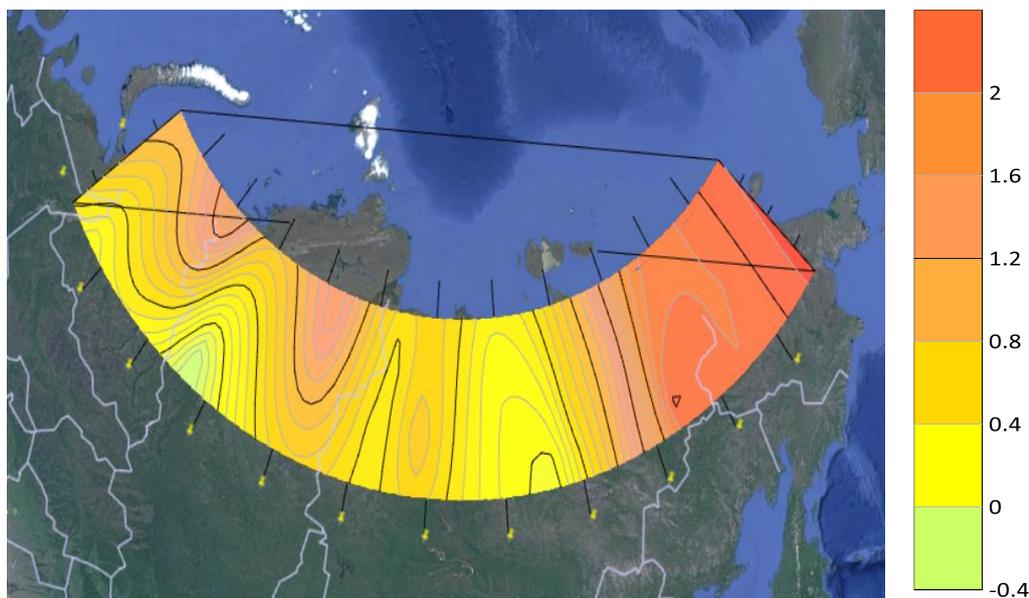


Рисунок 3.5 (в) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в январе за период 2011-2020гг

Анализируя карты аномалий температуры в январе, показанные на рисунке 3.5б, заметно повышение температуры в центральной части Арктики в период 2001-2010 года, относительно первого десятилетия. Амплитуда колебаний в прибрежной области составила около $3,3^{\circ}\text{C}$. Обращаясь к рисунку 3.5в, можно выделить дальневосточный сектор, где наиболее заметно повышение температуры в сравнении с первыми десятилетиями. Южная часть Арктической территории западной Сибири практически не имеет отклонений от нормы в течение всего исследуемого периода 1991-2020гг.

Перейдем к анализу хода аномалий температуры в феврале.

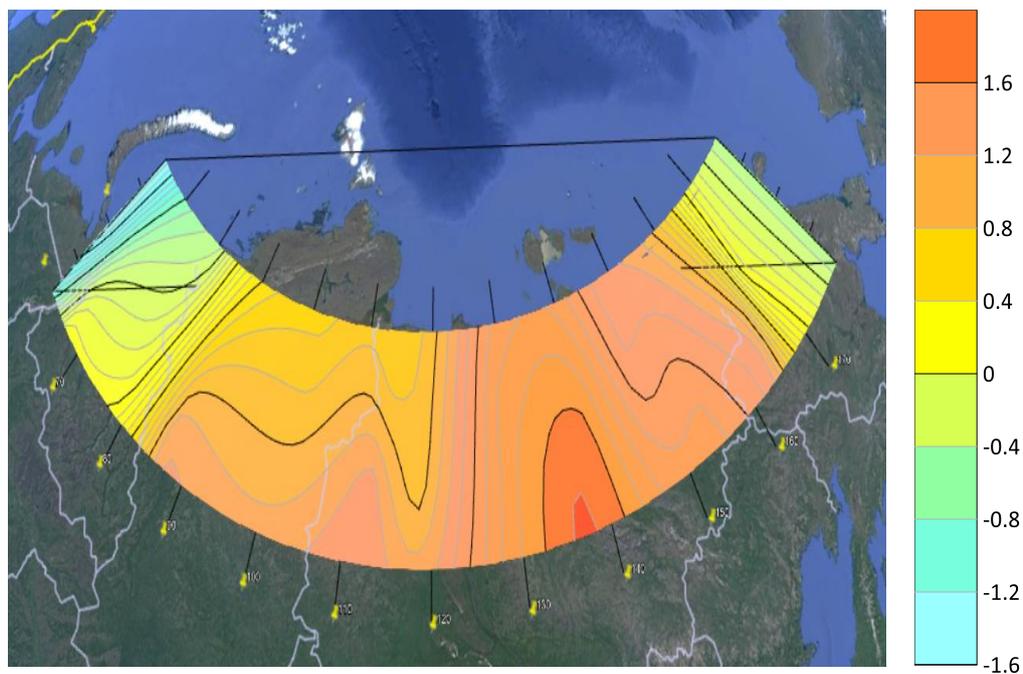


Рисунок 3.6 (а) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в феврале за период 1991-2000гг

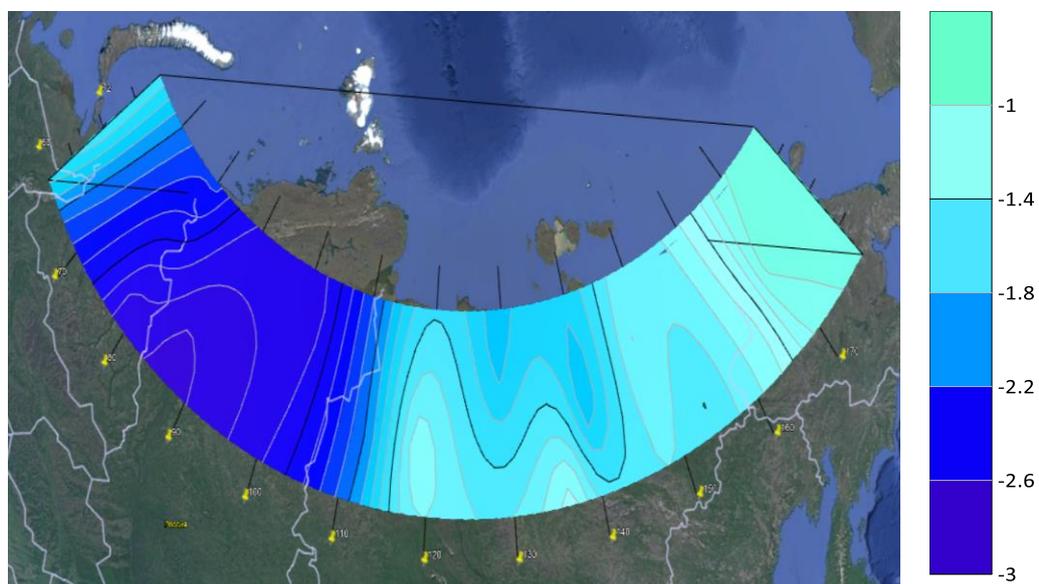


Рисунок 3.6 (б) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в феврале за период 2001-2010гг

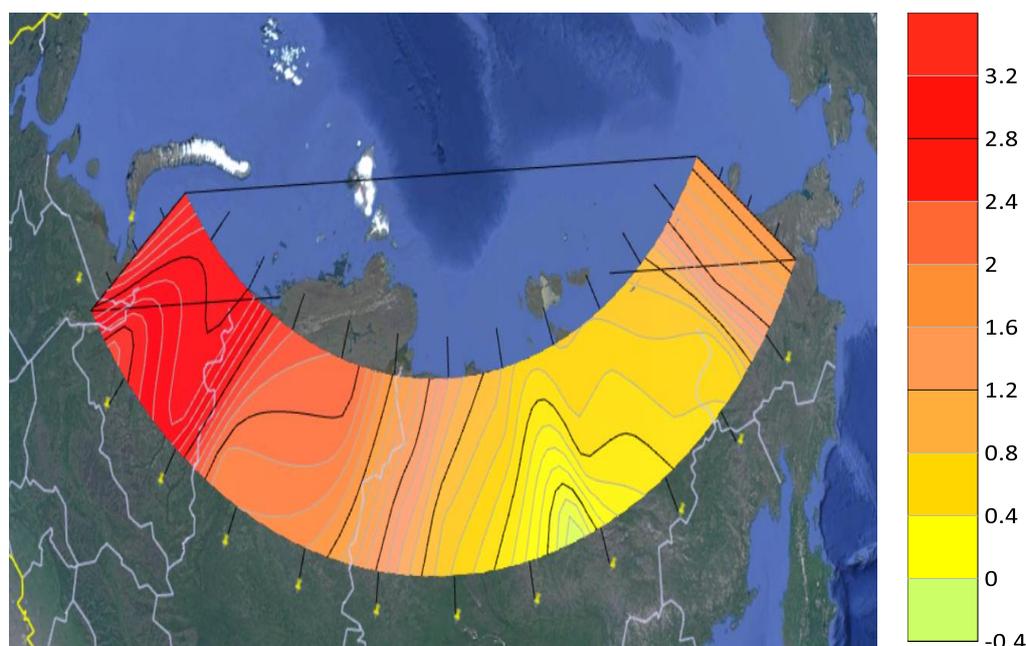


Рисунок 3.6 (в) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в феврале за период 2011-2020гг

В период 1991-2000гг. можно наблюдать положительные аномалии температуры на большей территории русской Арктики. Анализируя рисунок 3.6б, демонстрирующий средние аномалии температуры в период 2001-2010гг., выявлены достаточно сильные отклонения температуры на территории западной и восточной Сибири. Относительно нормы температура там ниже на 3°C. В целом, во втором десятилетии рассматриваемого периода температура ниже нормы на всей арктической территории России. Переходя к рассмотрению периода 2011-2020гг можно выделить область западной Сибири, где аномалии температуры самые значительные и составляют около 3°C. При сравнении второго и третьего десятилетия отмечено, что самые значительные аномалии наблюдались именно на территории западной Сибири.

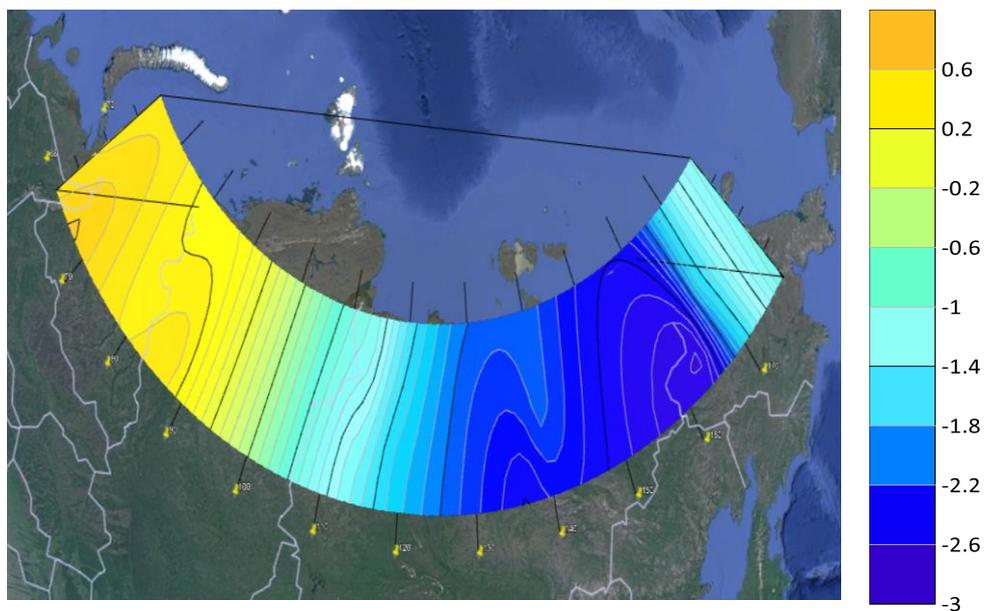


Рисунок 3.7 (а) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в марте за период 1991-2000гг

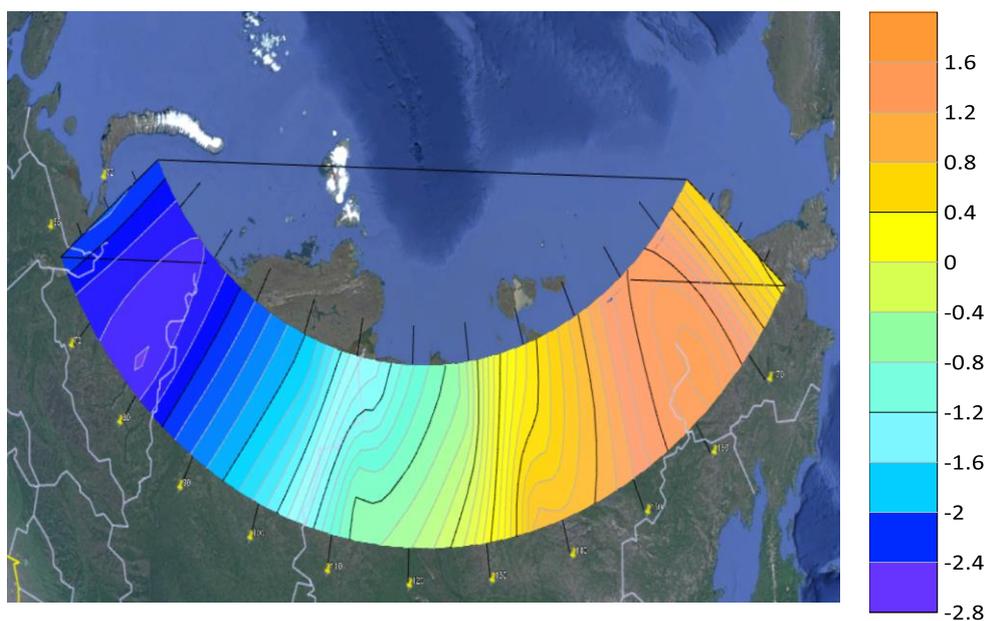


Рисунок 3.7 (б) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в марте за период 2001-2011гг

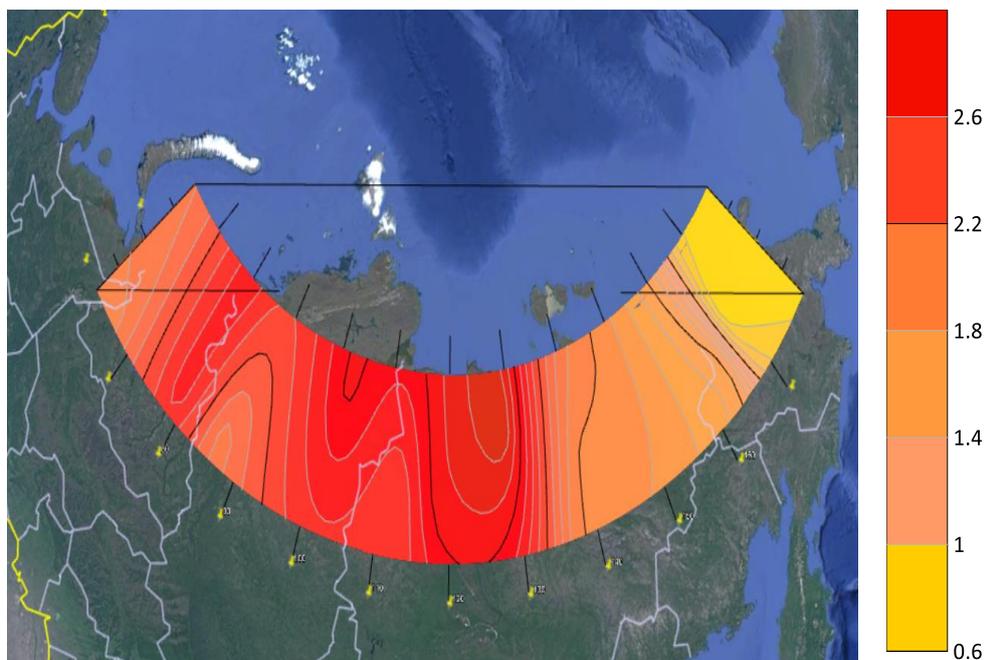


Рисунок 3.7 (в) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в марте за период 2011-2020гг

Рисунки 3.7 (а), 3.7 (б), 3.7 (в) демонстрирует карты аномалий температуры в марте исследуемого периода. Как видно, в период 1991-2000гг. значения аномалий с отрицательным знаком характерны для дальневосточного сектора. В следующее десятилетие наблюдается обратная картина – аномалии в вышеупомянутом регионе соответствуют знаку плюс, в то время как западно-сибирская часть Арктики характеризуется отрицательными аномалиями температуры. Анализируя карту 3.7 (в), демонстрирующую аномалии периода 2011-2020гг. выделена обширная область центральной части Арктики, в которой наблюдаются положительные значения аномалий, варьирующиеся от 1°C до 2.6°C .

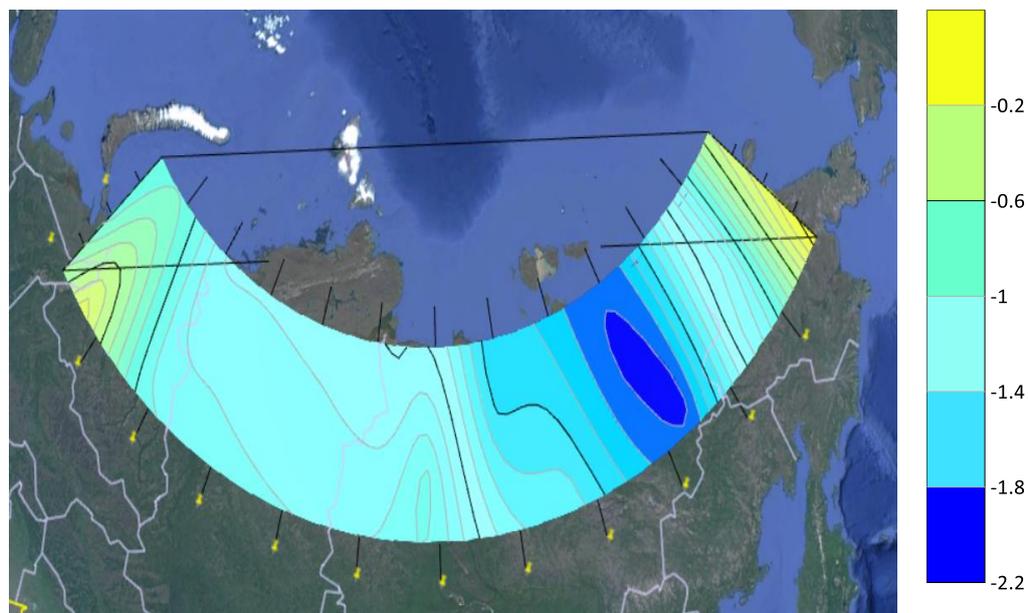


Рисунок 3.8 (а) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в апреле за период 1991-2000гг

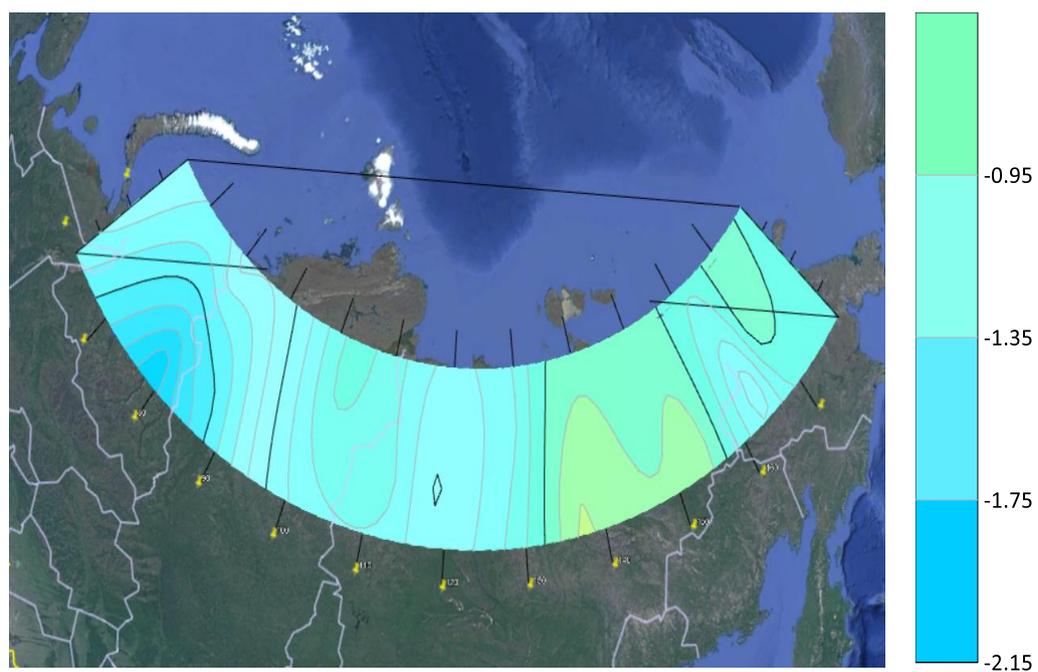


Рисунок 3.8 (б) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в апреле за период 2001-2010гг

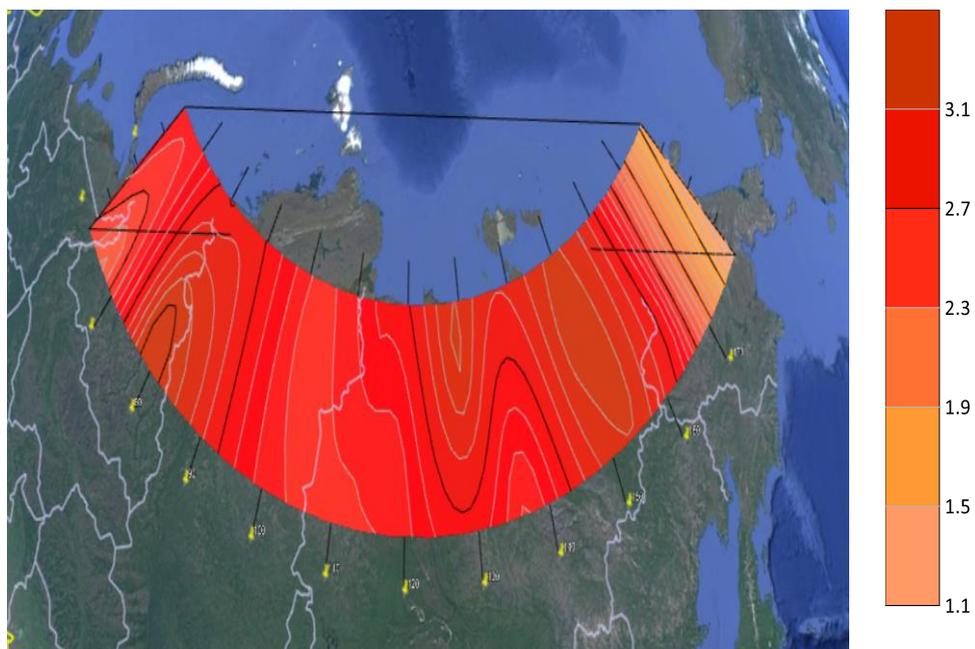


Рисунок 3.8 (в) – Осреднённые аномалии температуры воздуха в апреле за период 2011-2020гг

Из карт на рисунках 3.8 (а), 3.8 (б), 3.8 (в), демонстрирующих осредненные значения аномалий апреля, отмечено, что в первые два десятилетия исследуемого периода 1991-2020гг. температура была ниже климатической нормы и, как видно из рисунков 3.8 (а) и 3.8 (б) – особо не имела колебаний. А вот период 2011-2020 гг. 3.8в демонстрирует значительное превышение температуры на всей территории Арктики. Среднее превышение во всей арктической зоне составило около 2.5-3°C.

Таким образом, отмечено общее повышение температуры от десятилетия к десятилетию во всем исследуемом регионе, особенно сильны эти тенденции в восточном секторе Арктики и на Дальнем Востоке. Для анализа значимости произошедших изменений для каждой метеостанции был построен тренд и оценена его значимость. В качестве меры изменения температуры воздуха на исследуемой территории за период 1991-2020гг мы используем коэффициент линейного тренда, определенный по методу наименьших квадратов и характеризующий среднюю скорость изменений

климатической переменной, соответствующую тренду. К анализу с помощью линейного тренда можно отнести такие недостатки, как чувствительность к выбору начальной и конечной точки. Но линейный тренд можно вполне использовать для анализа общей тенденции изменений. Линейным трендом оценивают изменения климата и прогностические состояния атмосферы в климатических моделях.

Описывается тренд линейным уравнением:

$$Y = ax + b \quad (3.1)$$

где

Y- средние значения температуры с осреднением в 30 лет;

X- временной ряд

Знаком коэффициента a определяется основная тенденция линейного тренда. Рост Y наблюдается при $a > 0$. Убывание Y наблюдается при $a < 0$.

Для оценки значимости тренда использовался критерий Фишера, который объясняет общую дисперсию зависимой переменной. Для оценки статистической значимости тренда использовался 5%-ный уровень значимости. Если имеет место статистически значимая корреляционная связь r между x и Y , уравнение тренда статистически значимо.

Формула вычисления критерия Фишера такова:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} * \frac{f_2}{f_1} \quad (3.2)$$

где

R^2 - квадрат коэффициента корреляции

f_1 - число степеней свободы тренда (число переменных в аппроксимирующей формуле). Для линейного тренда $f_1=1$.

f_2 - число степеней свободы выборки. $f_2 = N-k-1$

N - количество случаев

Для линейного тренда $k = f_1$

Если $F_{расч} > F_{табл}$, то в этом случае тренд можно считать значимым. Значение $F_{табл}$ берется из таблицы при $F(q, f_1, f_2)$. q – уровень значимости, f_1 и f_2 – число степеней свободы. После анализа трендов на значимость визуализированы были только значимые.

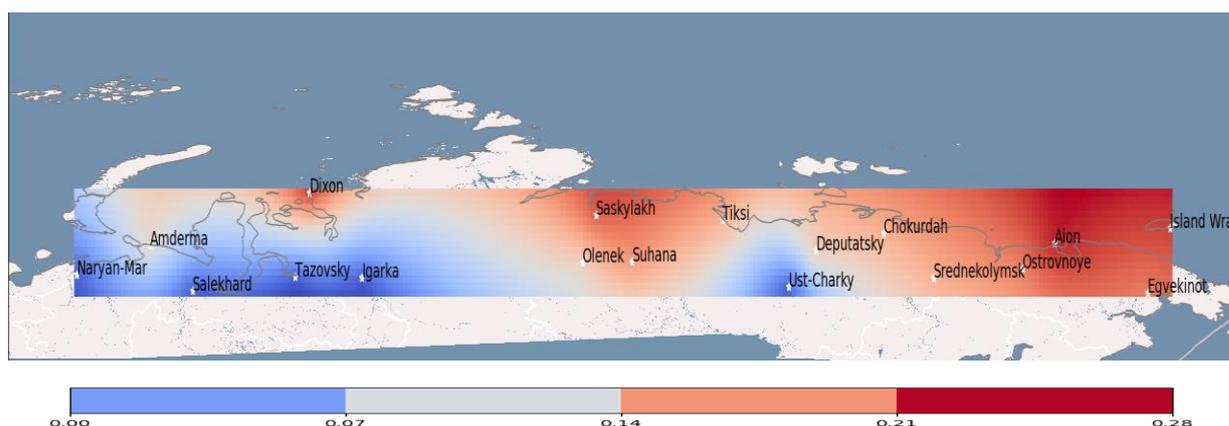


Рисунок 3.9 (а) – коэффициенты линейного тренда в октябре

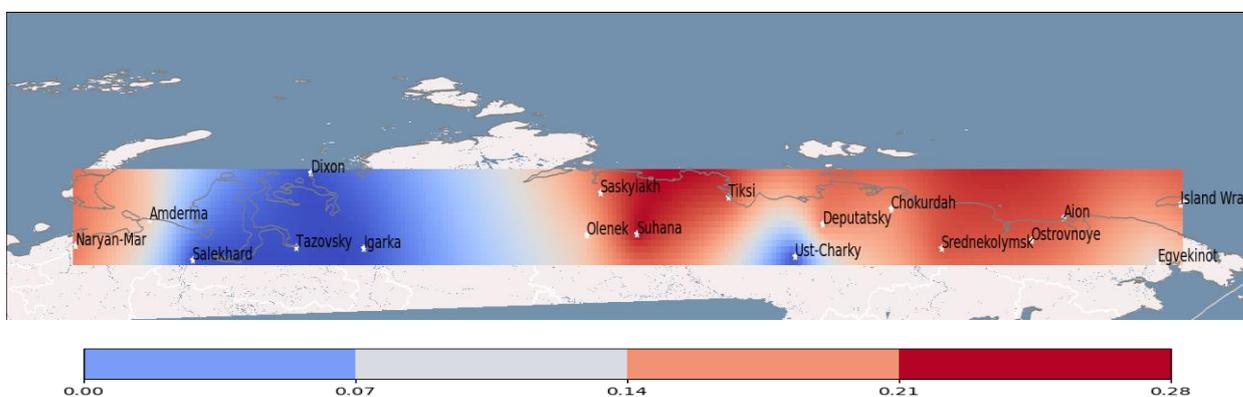


Рисунок 3.9 (б) – коэффициенты линейного тренда в ноябре

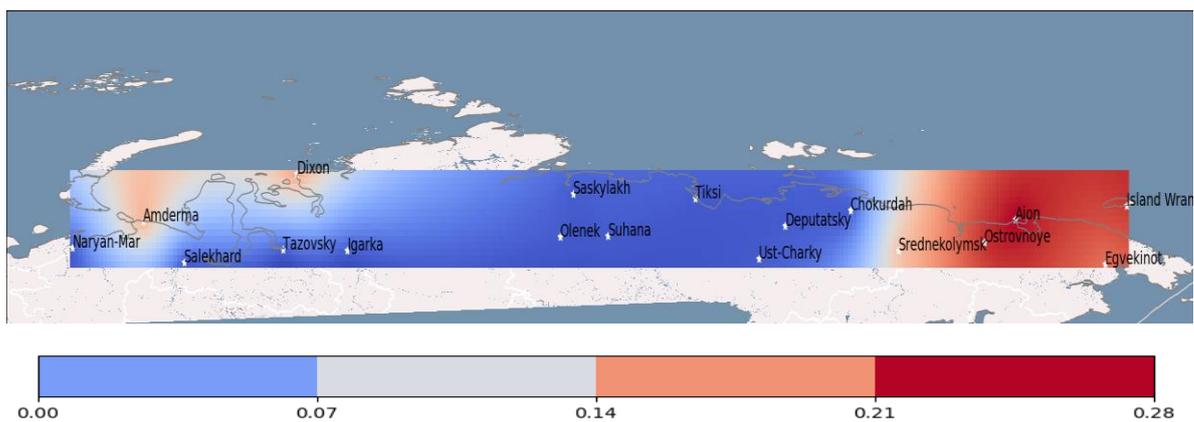


Рисунок 3.9 (в) – коэффициенты линейного тренда в декабре

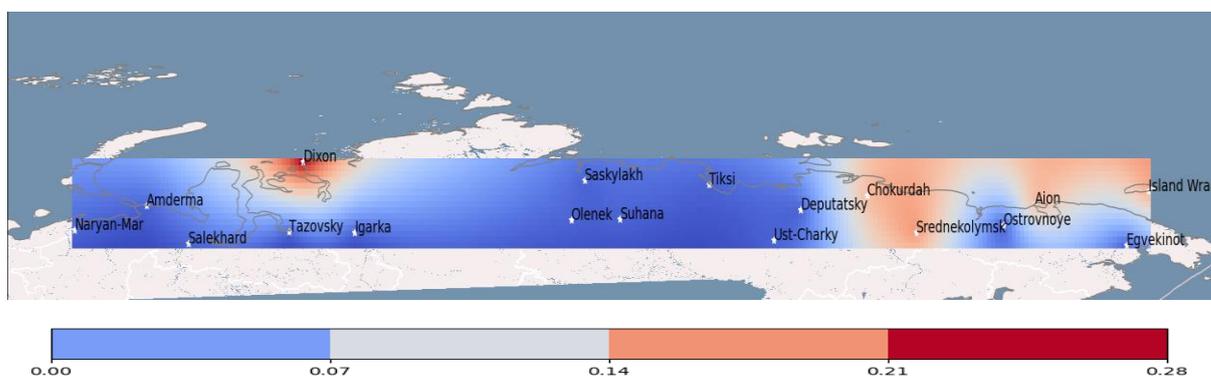


Рисунок 3.9 (г) – коэффициенты линейного тренда в январе

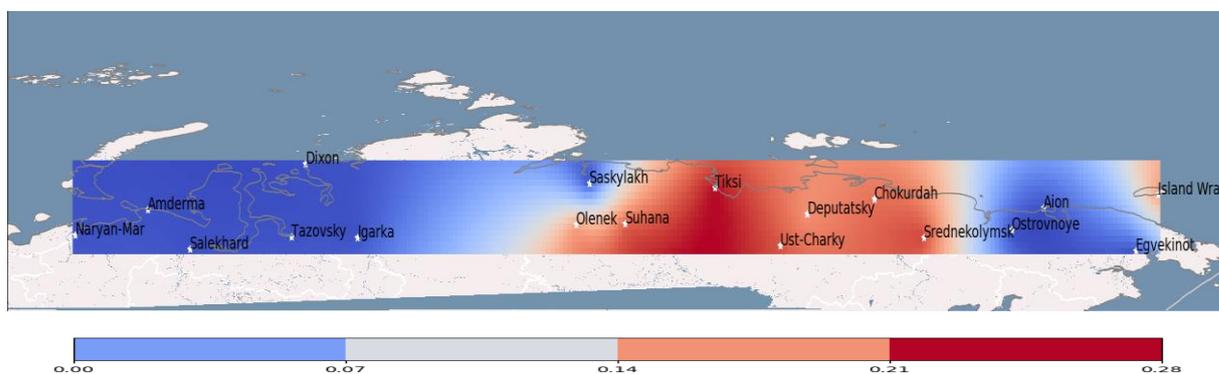


Рисунок 3.9 (д) – коэффициенты линейного тренда в марте

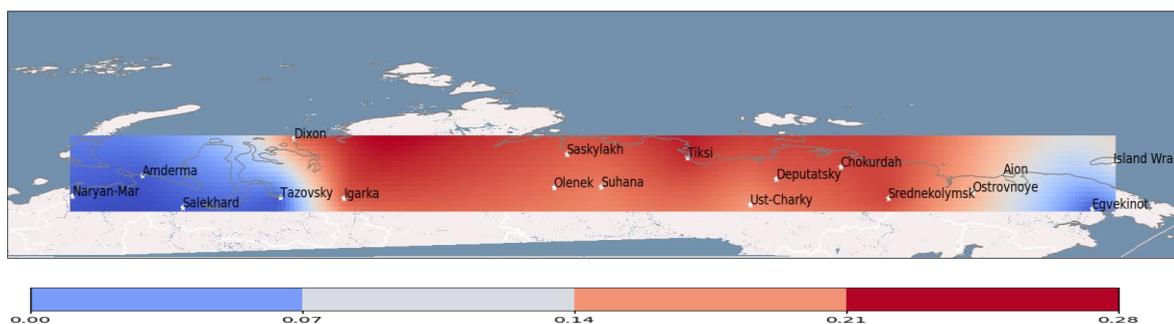


Рисунок 3.9 (е) – коэффициенты линейного тренда в апреле

Из полученных карт можно заключить, что тренд на повышение температуры в большинстве случаев значим на территории Дальнего Востока и Восточной Сибири.

Также отметим, что наиболее сильные изменения хода температуры наблюдается в переходные месяцы года, когда происходит переход от осени к зиме (октябрь – ноябрь) и от зимы к весне (апрель). Значимые тренды в переходные месяцы – это один из интересных выводов. То есть за счет этого и идет тенденция на потепление в целом. Полученные выводы можно объяснить тем, что одной из главных причин, влияющих на это служит перестройка циркуляционных процессов, так как если бы главной причиной изменений был антропогенный фактор, то температура равномерно бы росла во все месяца. Таким образом, можно предположить, что именно изменение атмосферной циркуляции есть первопричина происходящих изменений.

Для анализа причин изменения температуры были рассчитаны корреляционные связи с основными индексами, отражающими циркуляцию в атмосфере. В качестве исходных данных использовался реанализ NSEP NCAR с разрешением $2,5^0 \times 2,5^0$. Безусловно, из-за плохой метеорологической освещенности региона реанализ не очень хорошо отражает температуру в Арктике, но для анализа корреляционных связей, а также аномалий он пригоден. В качестве метода был выбран расчёт коэффициентов ранговой

корреляции Спирмана между выбранными индексами и каждым узлом регулярной сетки второго параметра (приземной температуры воздуха) в выбранный момент времени.

Для каждого рассчитанного в узле сетки коэффициента корреляции также был рассчитан уровень его значимости по «Критерию Стьюдента (t)». Уровень значимости – это максимально допустимая вероятность ошибки первого рода, т.е. отрицания правильной нулевой гипотезы, который используется для отсеивания статистически не значимых коэффициентов корреляции. Области на полученных картах, выделенные жёлтым цветом, означают превышение в них уровня значимости на 80%. В таких районах коэффициенты корреляции статистически значимы, и при анализе полученных результатов их надо принимать во внимание. Синим цветом показаны отрицательные коэффициенты, близкие к 0 – зеленым, а положительные – красным[21].

На рисунках ниже представлена корреляционная связь между приземной температурой и индексом североатлантического колебания в каждом месяце исследуемого периода.

В таблице 3.1 представлены географические координаты точек сетки, использующихся для расчета индексов.

Индекс	Южная зона	Северная зона	Формула
Северо-Атлантическое колебание (САК)	АЗОРСКИЙ МАКСИМУМ 20 - 30 °з.д. 35-40 °с.ш.	ИСЛАНДСКИЙ МИНИМУМ 10 - 30 °з.д. 64 - 66 °с.ш.	Разность между значениями параметра в южной и северной зонах
Арктическая колебание/осцилляция (АО)	37-45 °с.ш	70-80 °с.ш	Разность между значениями параметра в южной и северной зонах
Южное колебание/осцилляция (ЮО)	147,5-152,5°з.д. 15-20 °ю.ш.	130–135°в.д. 10-15 °ю.ш.	Разности между значениями параметра на Таити и в Дарвине

Таблица 3.1 - Географические координаты точек сетки, использующихся для расчета индексов[21]

РАНГОВАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ СПИРМАНА ДЛЯ СРЕДНЕСЯЧНЫХ СЕВЕРНОАТЛАНТИЧЕСКОЕ КОЛЕБАНИЕ ПО SLP (ОКТЯБРЬ) И Т2М (ОКТЯБРЬ)

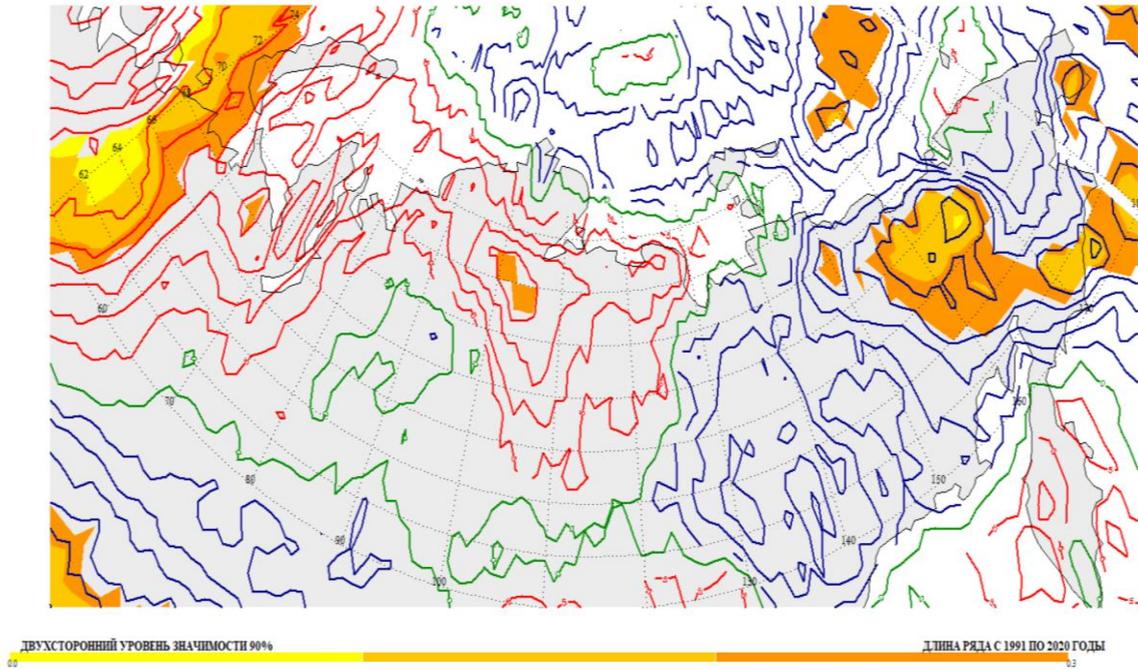


Рисунок 3.10 (а) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом NAO в октябре

РАНГОВАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ СПИРМАНА ДЛЯ СРЕДНЕСЯЧНЫХ СЕВЕРНОАТЛАНТИЧЕСКОЕ КОЛЕБАНИЕ ПО SLP (НОЯБРЬ) И Т2М (НОЯБРЬ)

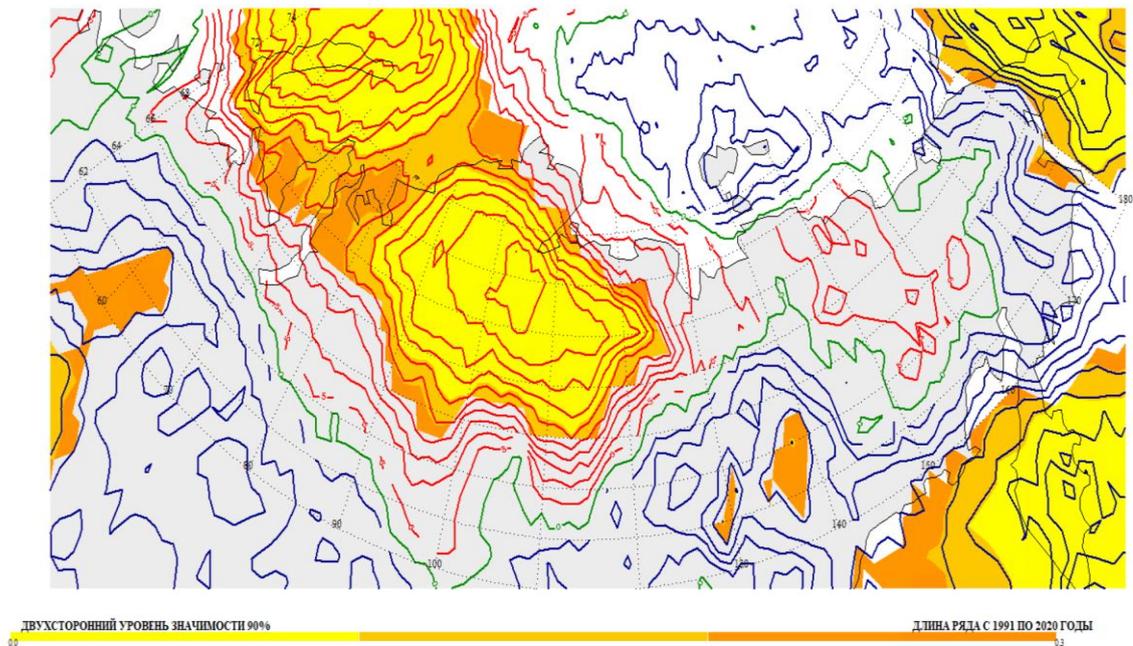


Рисунок 3.10 (б)- Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом NAO в ноябре

Анализируя карты на рисунках 3.10 (а) и 3.10 (б), демонстрирующих корреляцию температуры с североатлантическим колебанием в октябре и ноябре заметим, что связь есть, но очень слабая. В октябре положительная связь характерна для небольшой части западно-сибирского сектора, а отрицательная связь прослеживается в районе дальнего востока. В ноябре небольшая положительная связь распространяется на прибрежную территорию Арктики в западной Сибири, а также на территории и восточной Сибири. Высокие значения индекса Североатлантического колебания приводят к формированию положительных аномалий температуры в результате усиления зонального типа циркуляции атмосферы. В этом случае теплые воздушные массы Атлантики направлены на Европу, а также и в более удаленные районы на восток вплоть до Сибири, что влечет за собой теплую погоду.

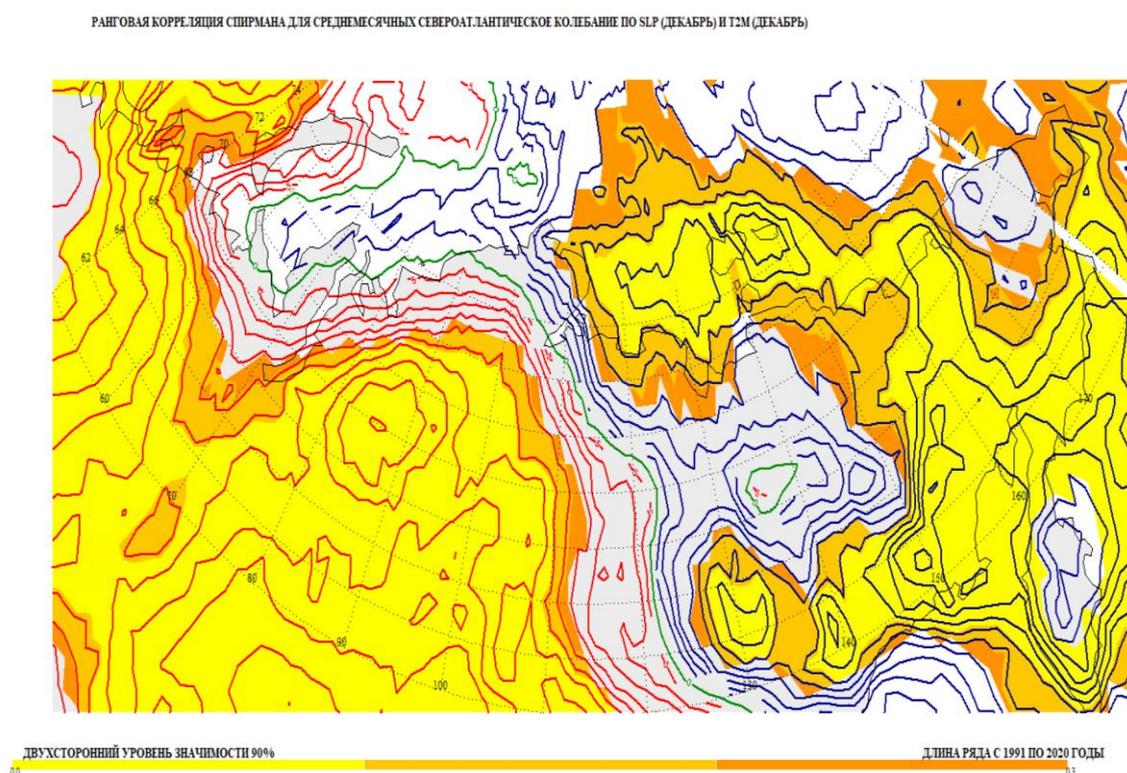


Рисунок 3.10 (в) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом NAO в декабре

РАНГОВАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ СПИРМАНА ДЛЯ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ СЕВЕРОАТЛАНТИЧЕСКОЕ КОЛЕБАНИЕ ПО SLP (ЯНВАРЬ) И Т2М (ЯНВАРЬ)

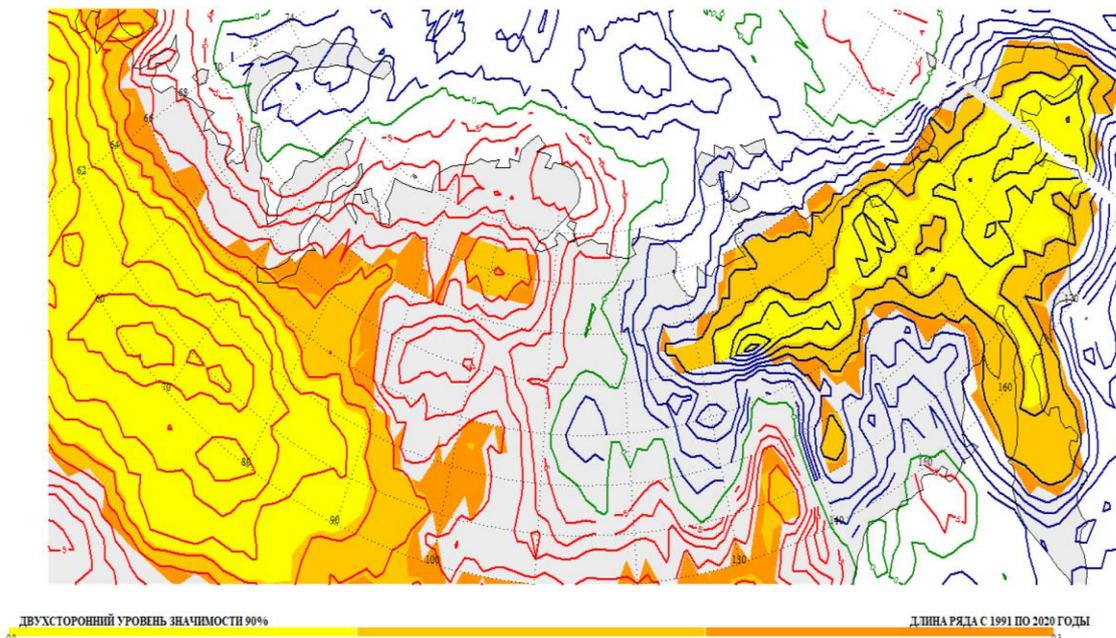


Рисунок 3.10 (г) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом NAO в январе

РАНГОВАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ СПИРМАНА ДЛЯ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ СЕВЕРОАТЛАНТИЧЕСКОЕ КОЛЕБАНИЕ ПО SLP (ФЕВРАЛЬ) И Т2М (ФЕВРАЛЬ)

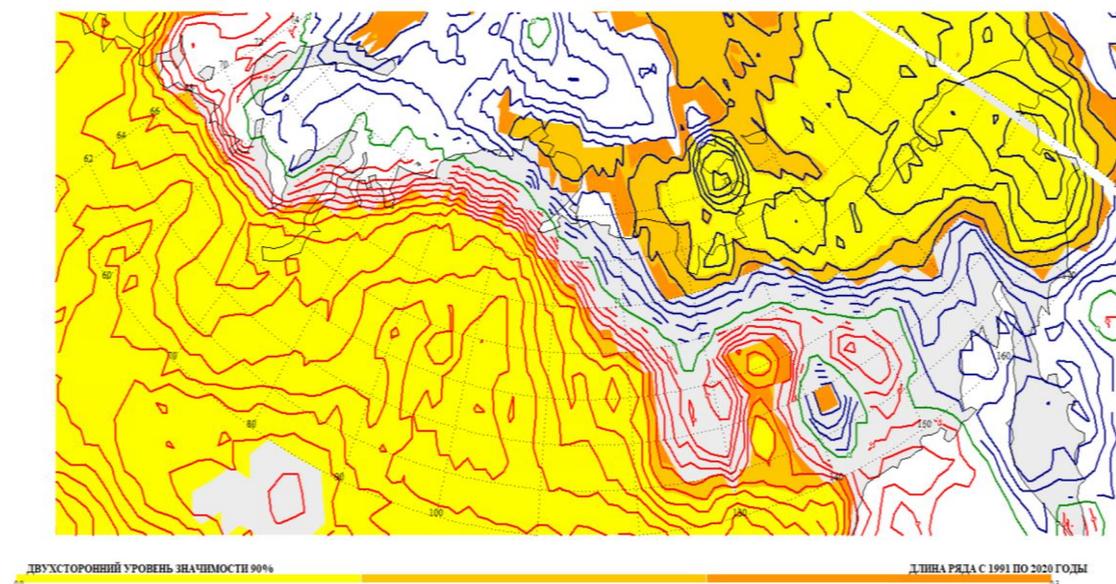


Рисунок 3.10 (д) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом NAO в феврале

Из рисунков 3.10, показывающих корреляции в зимние месяцы, выявлено, что температура воздуха в этот период достаточно хорошо коррелирует с индексом североатлантического колебания. В дальневосточном секторе Арктики, а также в небольших областях восточной Сибири, наблюдаются отрицательные значения коэффициента корреляции. Положительные корреляции хорошо прослеживаются на территории западной Сибири, и, также, на части восточной Сибири.

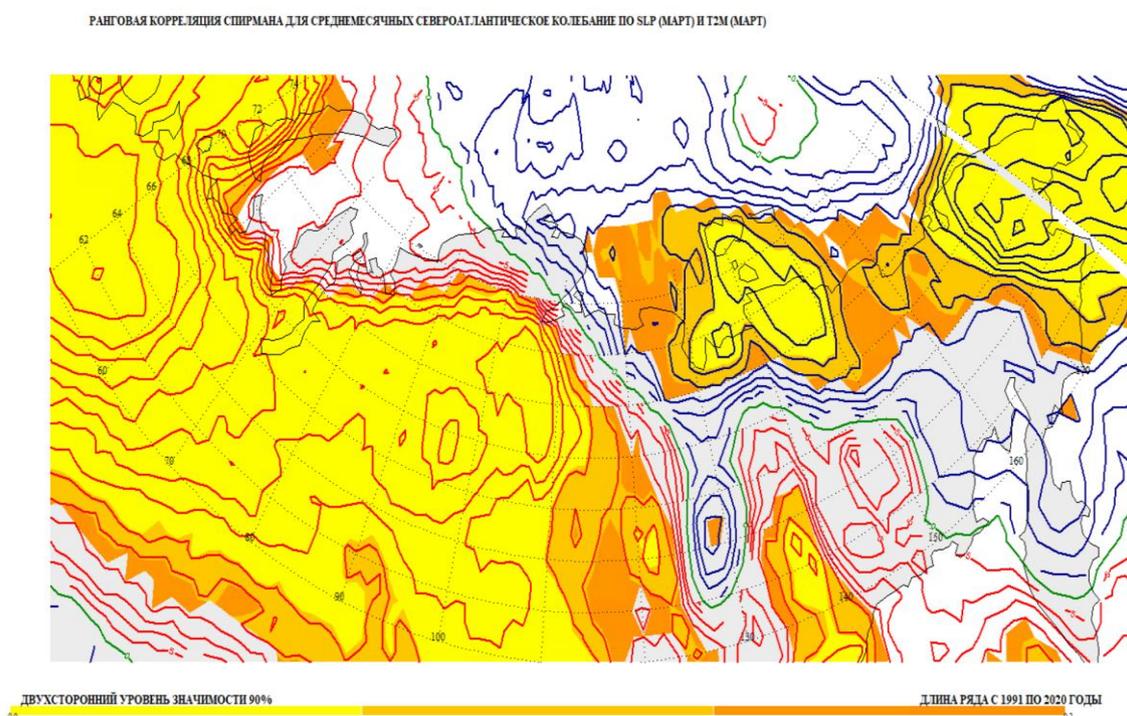


Рисунок 3.10 (е) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом NAO в марте

Анализируя месяц март можно заключить, что корреляция с индексом САК, на территории арктической зоны России, аналогична зимнему периоду. Можно отметить, что обратная связь стала усиливаться в северных прибрежных районах восточной Сибири.

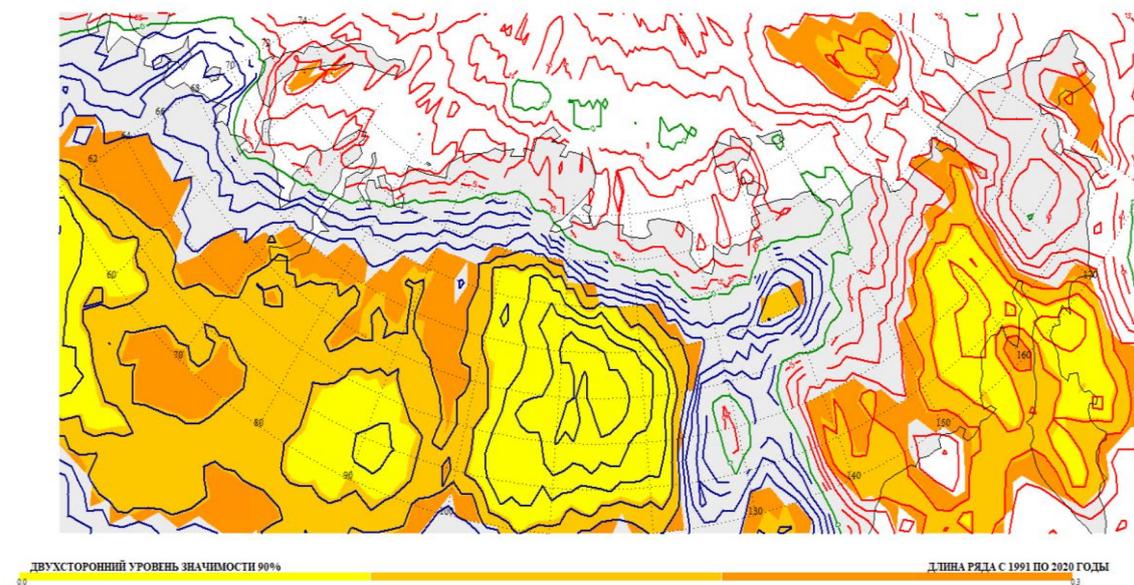


Рисунок 3.10 (ж) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом NAO в апреле

При анализе карты корреляций индекса североатлантического колебания с температурой воздуха в апреле, установлено, что на территории западной Сибири, восточной Сибири наблюдается обратная связь, в то время как территория дальнего востока, а также всех северных прибрежных районов русской Арктики демонстрирует прямую положительную связь. Сопоставляя полученный результат с рисунком 3.9 (е), демонстрирующим общую тенденцию к повышению температуры воздуха в апреле, можно заключить связь с потеплением в дальневосточном секторе Арктики и североатлантическим колебанием. В целом, из полученных карт видно, что наиболее сильная корреляционная связь наблюдается в период с декабря по апрель.

Перейдем к анализу карт, демонстрирующих связь температуры воздуха в исследуемом районе с индексом арктического колебания.

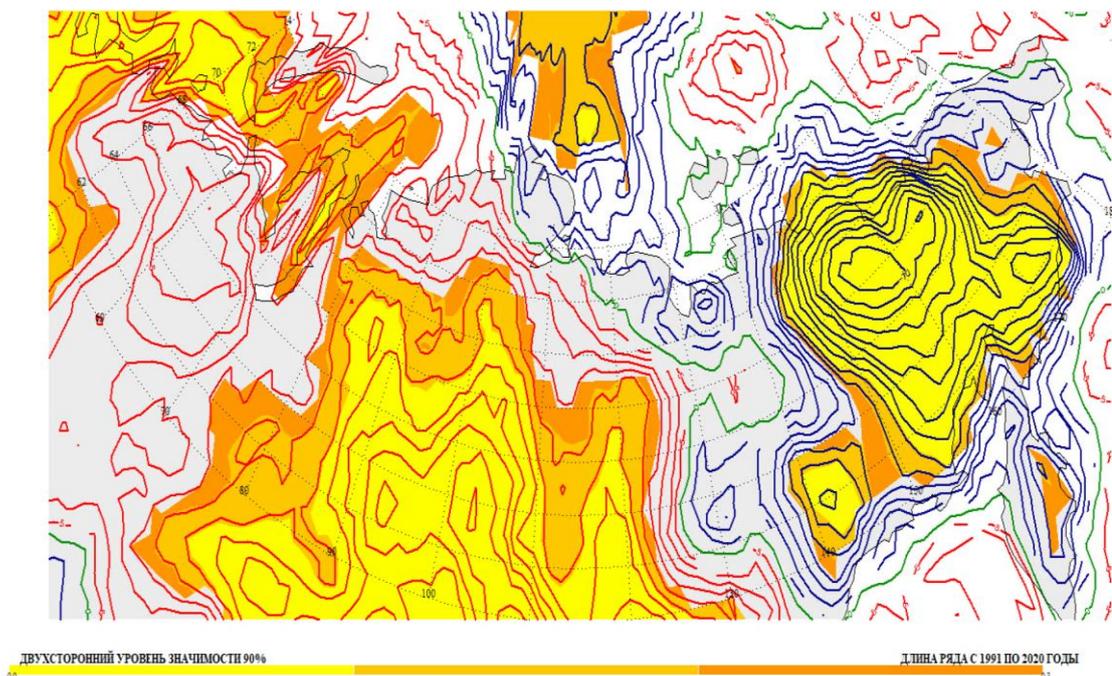


Рисунок 3.11 (а) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом АО в октябре

На рисунке 3.11 (а) демонстрирующем связь с индексом в октябре, заметно преобладание обратной связи во всем дальневосточном регионе. Также обратная связь прослеживается и на севере восточной Сибири. Карта демонстрирует положительную связь в западно-сибирском секторе Арктики и юге восточной Сибири.

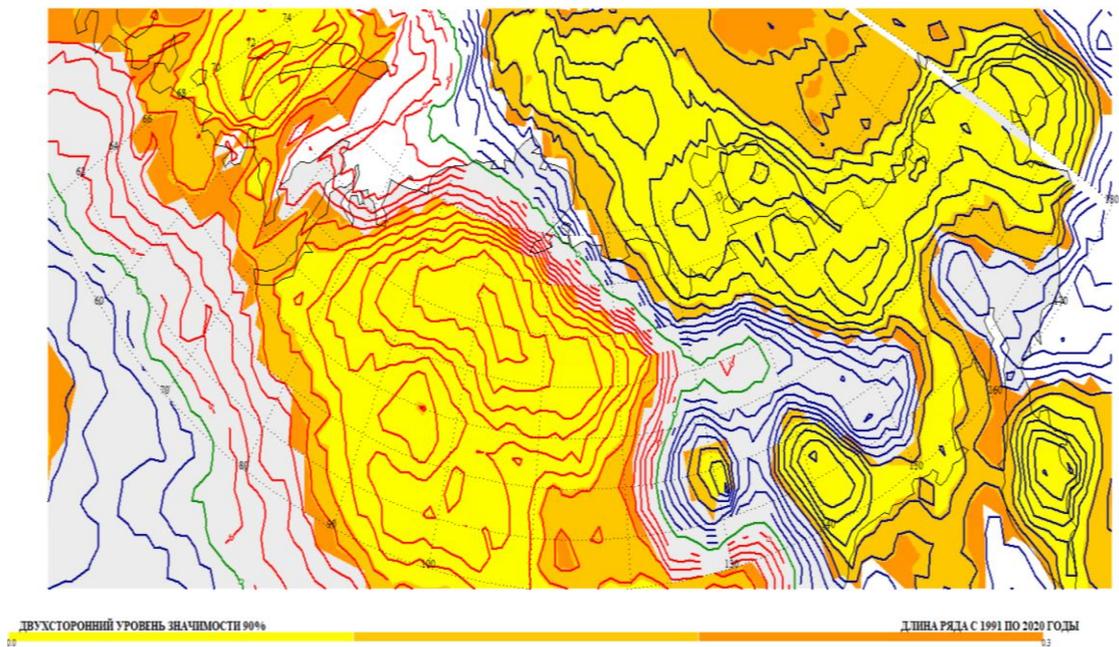


Рисунок 3.11 (б) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом АО в ноябре

Обращаясь к рисунку 3.11 (б), можно сказать, что в ноябре обратная корреляционная связь усиливается на территории Дальнего Востока, переходя на север восточной Сибири. Положительная связь прослеживается на всей территории восточной Сибири, и на севере Западной Сибири. Так же заметна обратная корреляция на юге Западной Сибири.

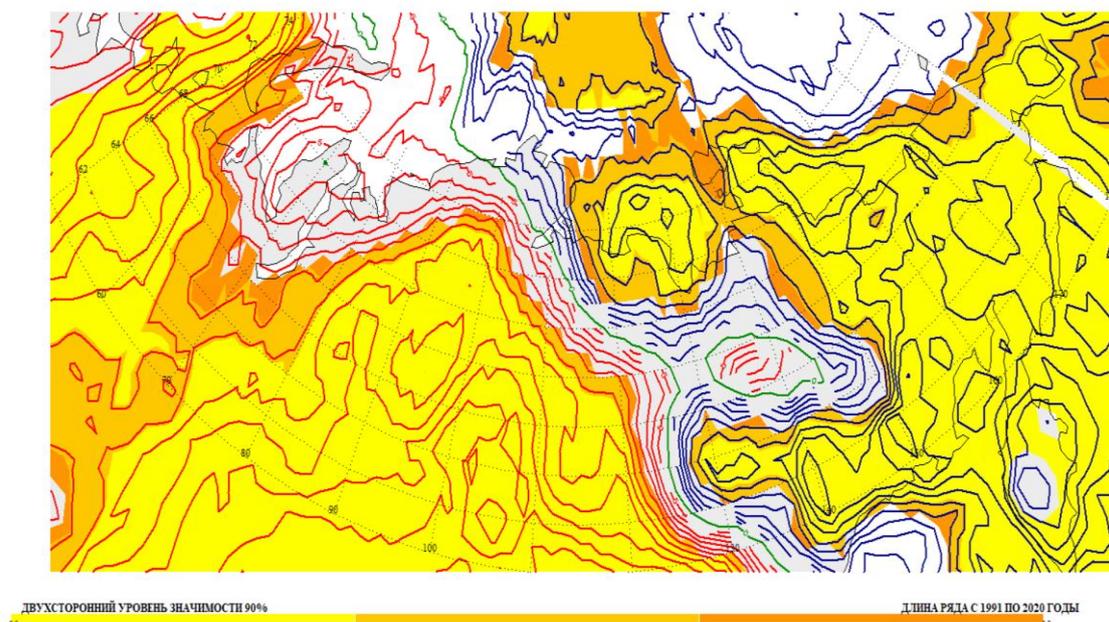


Рисунок 3.11 (в) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом АО в декабре

Усиление обратной связи между индексом арктического колебания и температурой воздуха хорошо продемонстрировано на рисунке 3.11 (в). Отрицательная корреляция видна как на всей территории дальнего востока, так и в небольшой области на севере восточной Сибири. Вся западная Сибирь и основная часть восточной Сибири хорошо коррелирует с арктическим колебанием. На этих территориях прослеживается сильная положительная связь, за исключением северных приморских районов.

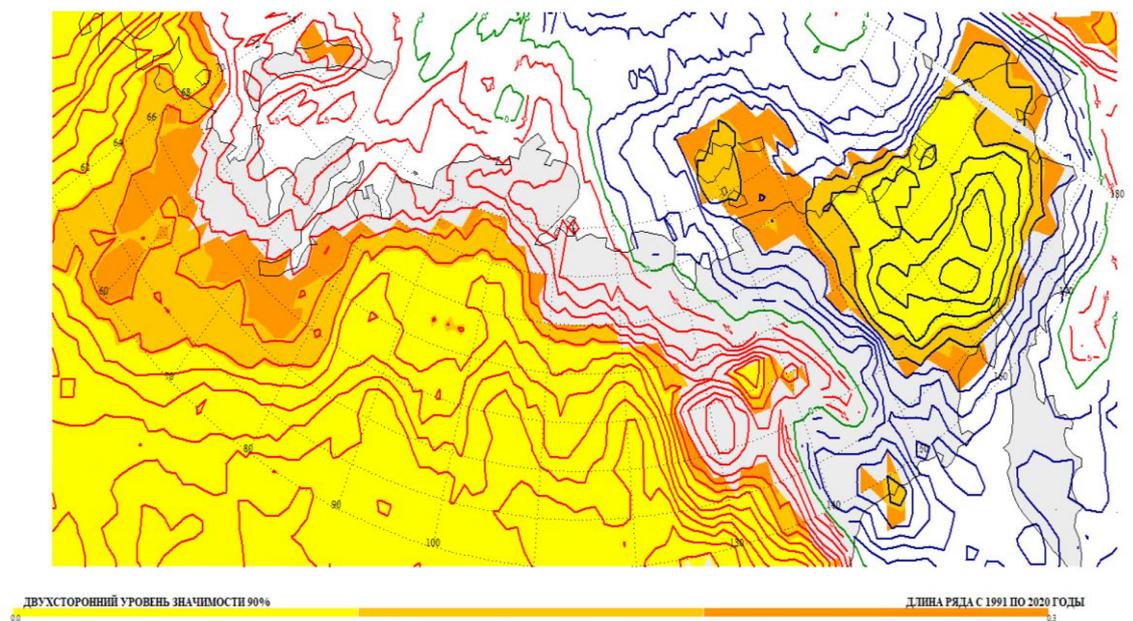


Рисунок 3.11 (г) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом АО в январе

На рисунке 3.11 (г), демонстрирующем корреляцию с арктическим колебанием в январе, положительная связь в обоих сибирских секторах достаточно хорошо прослеживается. На севере Сибири прямая связь присутствует, но очень слабая. Из анализа данной карты выявлено, что прямая корреляция с арктическим колебанием показана и на территории дальнего востока, где в начале зимы обратная связь охватывала все районы.

РАНГОВАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ СПИРМАНА ДЛЯ СРЕДНЕСЕЧНЫХ АРКТИЧЕСКОЕ КОЛЕБАНИЕ ПО SLP (ФЕВРАЛЬ) И T2M (ФЕВРАЛЬ)

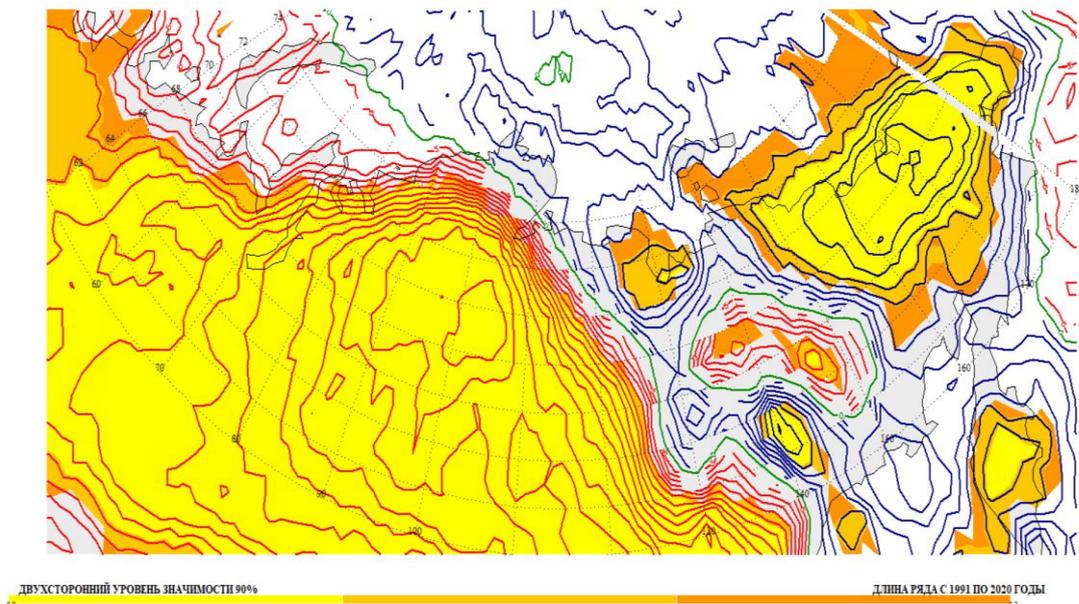


Рисунок 3.11 (д) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом АО в феврале

РАНГОВАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ СПИРМАНА ДЛЯ СРЕДНЕСЕЧНЫХ АРКТИЧЕСКОЕ КОЛЕБАНИЕ ПО SLP (МАРТ) И T2M (МАРТ)

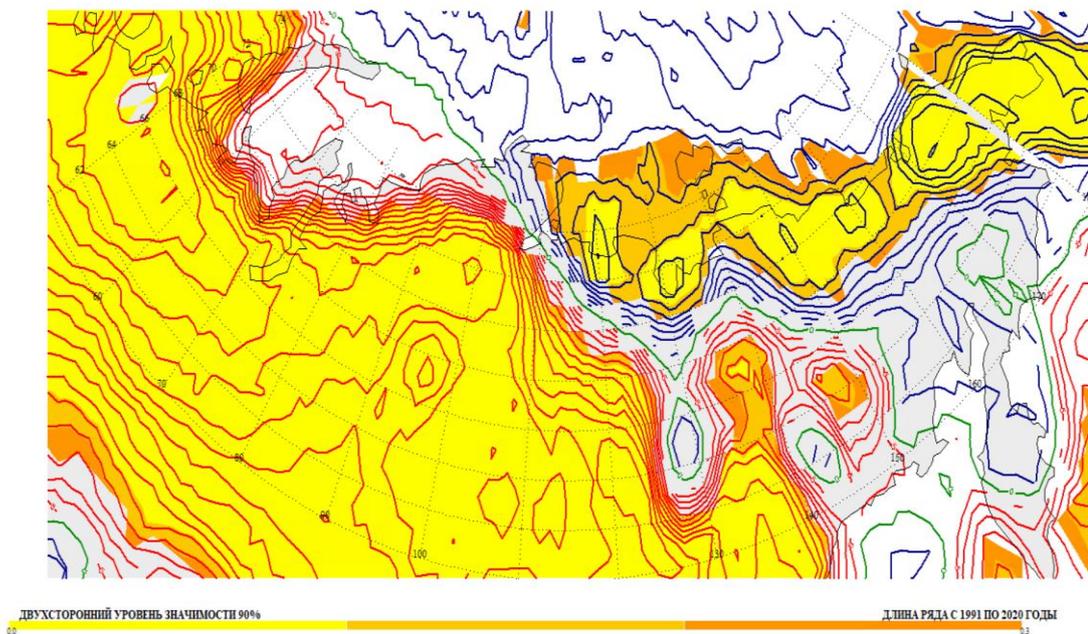


Рисунок 3.11 (е) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом АО в марте

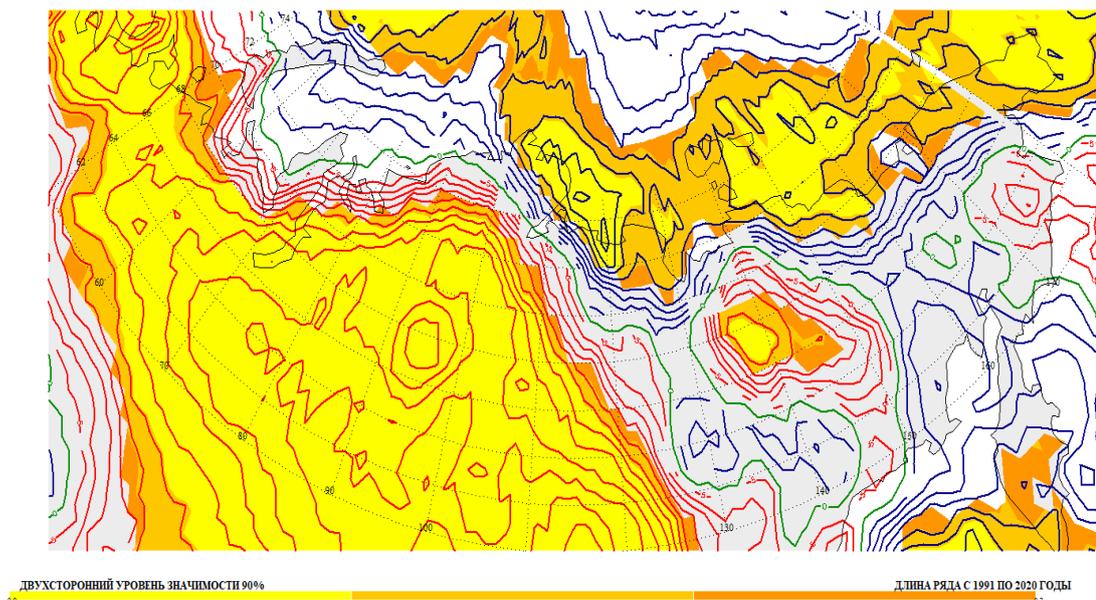


Рисунок 3.11 (ж) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом АО в апреле

Исходя из полученных результатов корреляции температуры воздуха с арктическим колебанием в феврале, марте и апреле значимая положительная корреляция хорошо прослеживается в западносибирском и восточносибирском секторах Арктики. Отрицательная связь значима в дальневосточном секторе в феврале. В марте и апреле можно проследить, что сильная отрицательная корреляция с температурой воздуха наблюдается на всей северной части дальнего востока, а также на севере восточной Сибири. В апреле положительные связи заметны прослеживаются на дальневосточной территории. Из полученных карт можно заключить, что в целом арктическое колебание хорошо коррелирует с температурой воздуха во все месяцы исследуемого периода.

Перейдем к анализу связи изменения температуры воздуха в Арктической зоне и индексом Южного колебания. В ходе работы значения были также прокоррелированы для всех месяцев исследуемого периода.

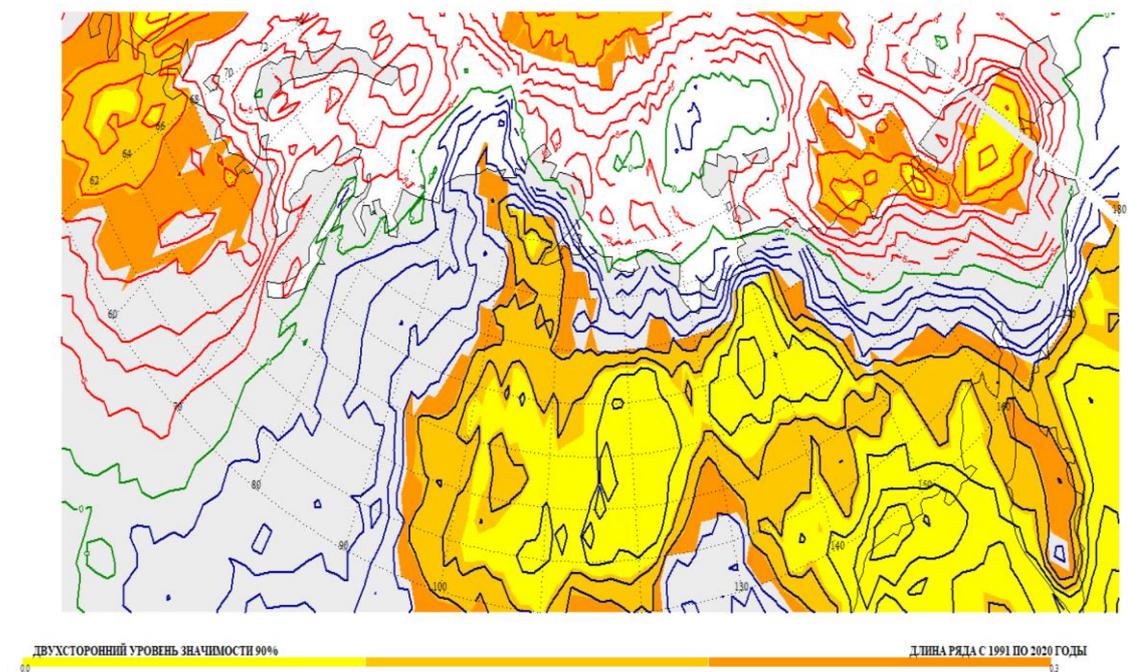


Рисунок 3.12а - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом SOI в октябре

На рисунке 3.12 (а) выявлена достаточно сильная обратная связь с индексом на юге дальневосточного сектора и в восточной Сибири. Прямая корреляция наблюдается на территории дальнего востока, а также на небольшой территории западной Сибири.

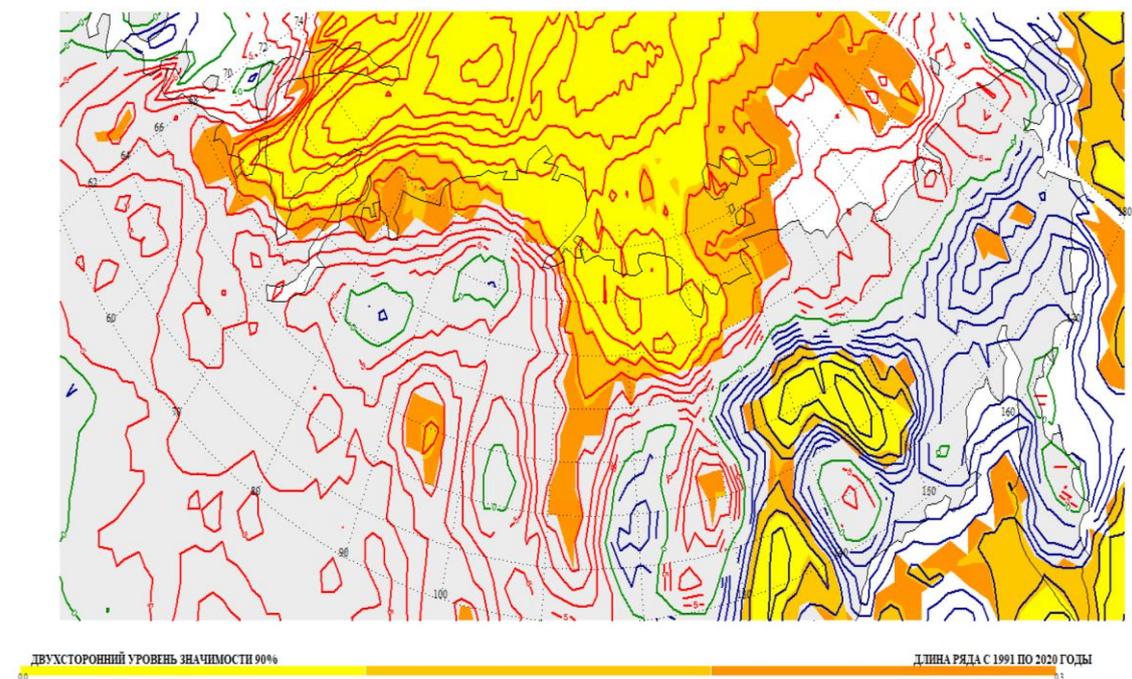


Рисунок 12б - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом SOI в ноябре

Переходя к анализу рисунка 3.12 (б), в ноябре можно заметить ослабление отрицательной корреляции в дальневосточном секторе. Значительная прямая связь с южным колебанием наблюдается на севере дальнего востока, а также северных районах Сибири. Анализируя полученные данные по значимым трендам на повышение температуры в октябре и ноябре, в рассмотренных районах прямая связь с арктическим колебанием может служить причиной общего потепления и изменения температуры в большую сторону.

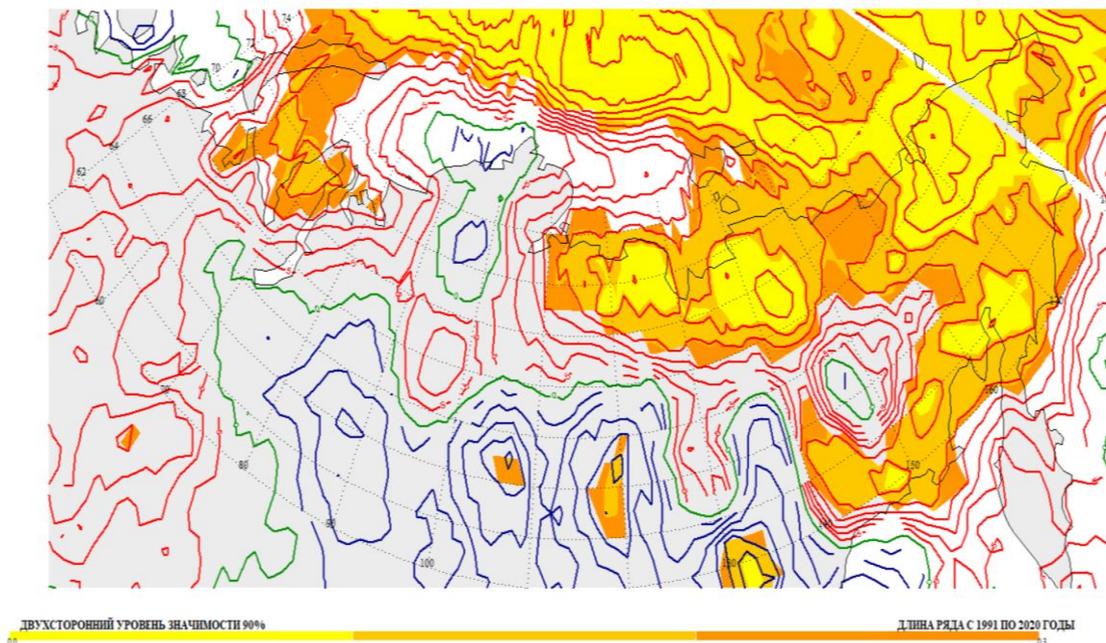


Рисунок 3.12в - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом SOI в декабре

При анализе рисунка 3.12 (в), была учтена область дальнего востока и северных районов Сибири. По полученной карте установлены значительные прямые связи на этих территориях. Из рисунка 3.9 (в), демонстрирующего районы, где наблюдается общий тренд на повышение температуры в декабре, можно заключить, что именно на территории дальнего востока в декабре тренд значим, что также подтверждает причастность южного колебания к изменения температуры в Арктическом регионе.

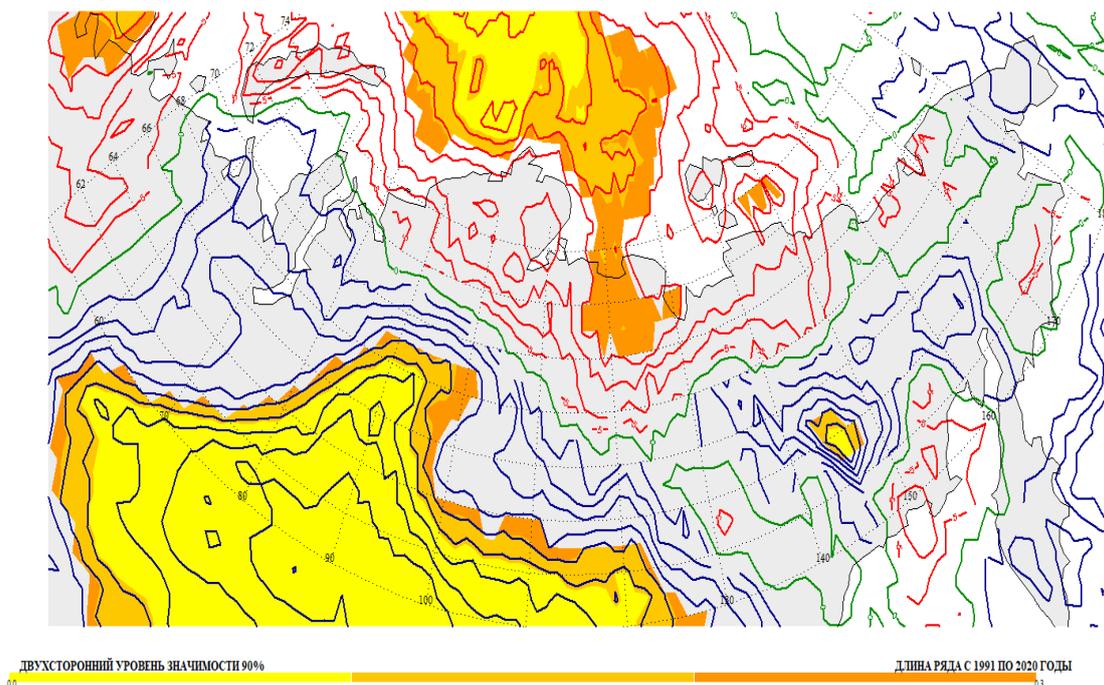


Рисунок 3.12 (г) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом SOI в январе

Рассматривая рисунок 3.12 (г), можно сделать вывод, что положительные связи наблюдаются лишь на севере восточной Сибири. Отрицательная корреляция хорошо прослеживается в южных районах как западной, так и восточной Сибири. Отклик отрицательной корреляции виден на юге Дальневосточного округа.

РАНГОВАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ СПИРМАНА ДЛЯ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ ЮЖНОЕ КОЛЕБАНИЕ ПО SLP (ФЕВРАЛЬ) И T2M (ФЕВРАЛЬ)

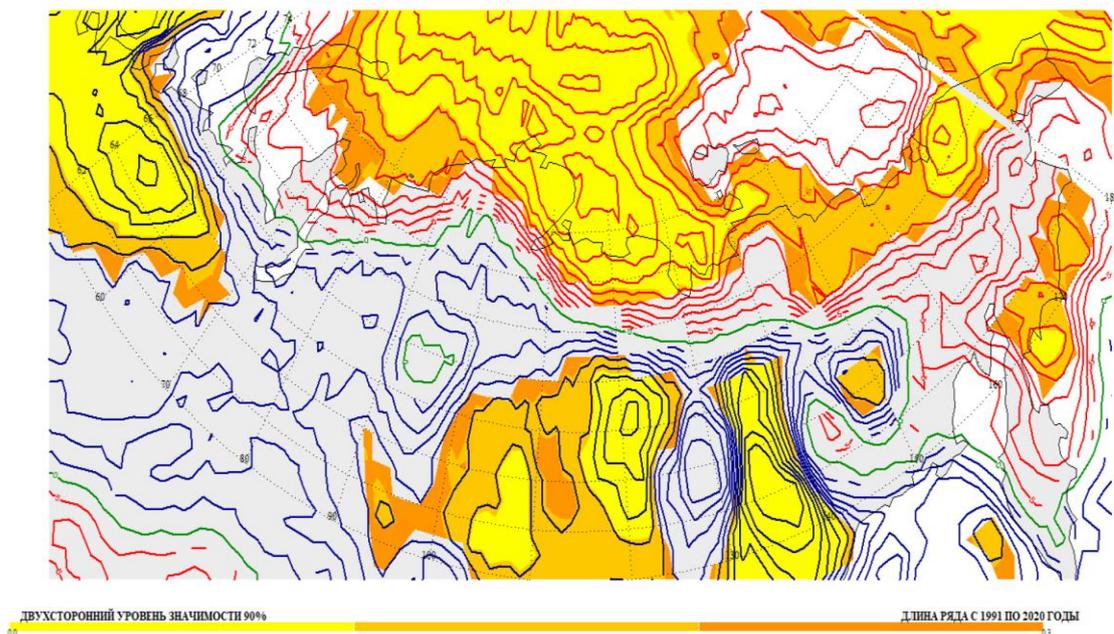


Рисунок 3.12 (д) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом SOI в феврале

РАНГОВАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ СПИРМАНА ДЛЯ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ ЮЖНОЕ КОЛЕБАНИЕ ПО SLP (МАРТ) И T2M (МАРТ)

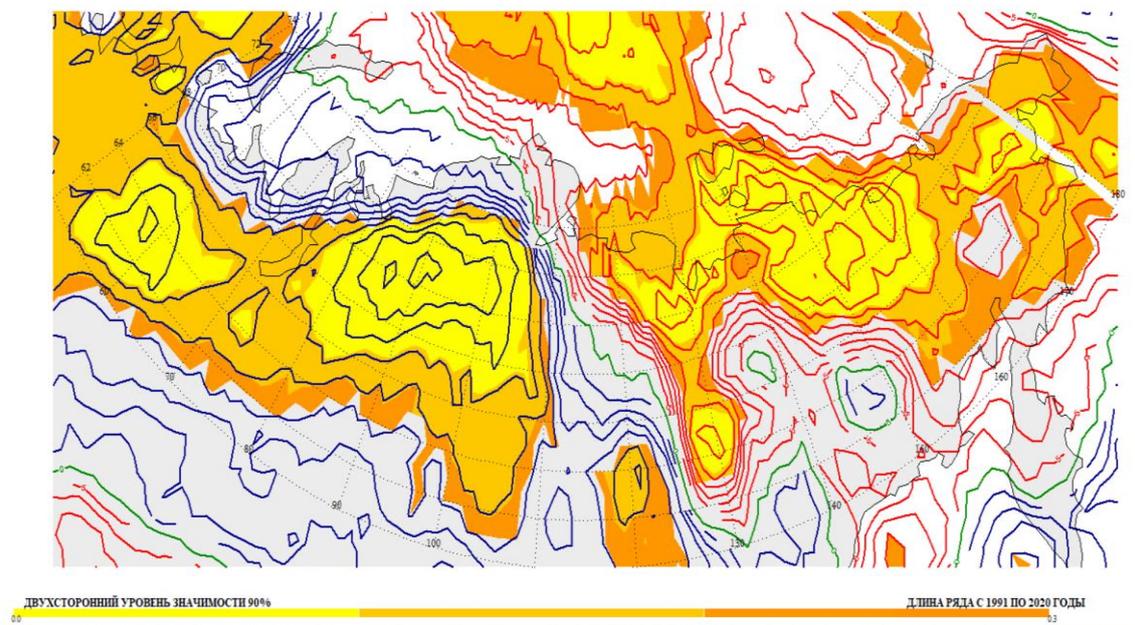


Рисунок 3.12 (е) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом SOI в марте

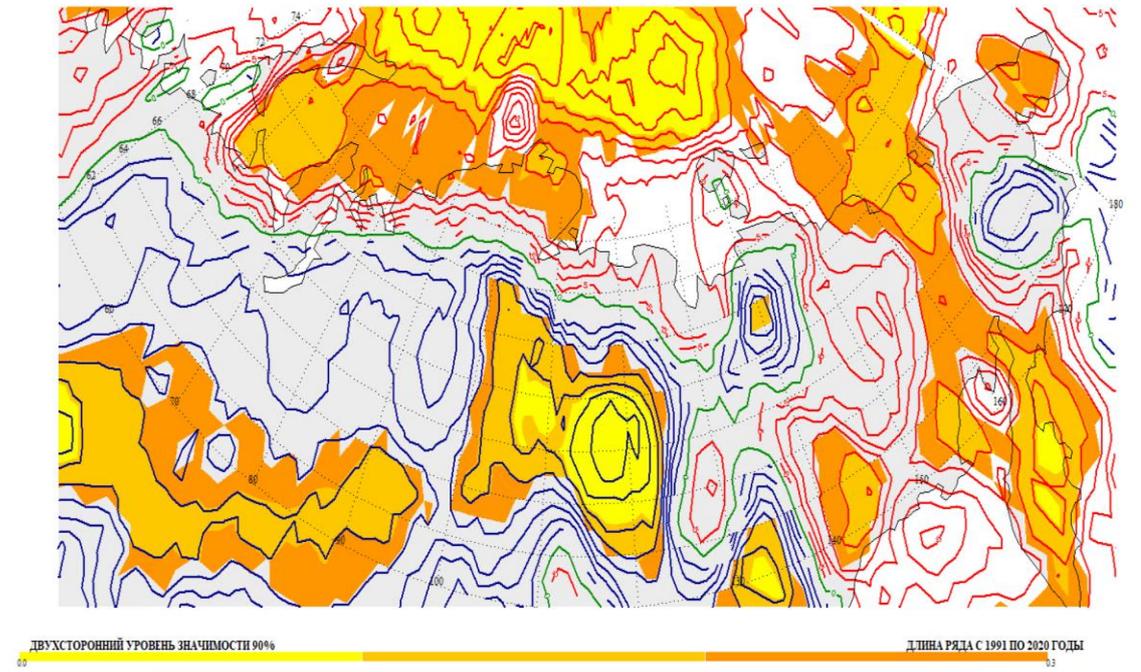


Рисунок 3.12 (ж) - Корреляция колебаний приземной температуры воздуха с индексом SOI в апреле

При анализе рисунков 3.12 (д), 3.12 (е), 3.12 (ж) установлено, что положительные корреляционные связи между индексом южного колебания и температурой воздуха в Арктическом регионе России, наблюдаются на территориях дальневосточного округа и севере восточной Сибири. При обращении к рисункам 3.9д, 3.9е демонстрирующим значимые тренды на повышение температуры в данные месяцы, можно заключить, что южное колебание имеет прямую связь с повышением температуры. Отрицательная корреляция с температурой воздуха прослеживается над Западной Сибирью, рисунок 3.12 (е) хорошо демонстрирует отрицательную связь на всей территории западной Сибири.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом в ходе работы были выполнены поставленные задачи. Изучены физико-географические характеристики Арктической зоны на территории Российской Федерации. Была изучена природа и климатические условия Арктической зоны. Рассмотрены факторы потепления в высоких широтах, установлена важность проводимых исследований в Арктических регионах.

В ходе работы были изучены основные индексы крупномасштабной циркуляции – индекс Североатлантического колебания, индекс Арктического колебания и индекс Южного колебания. Изучены механизмы их действия и влияние на климат Земли.

В практической части работы был проведен анализ изменений температуры воздуха на арктической территории России с крупномасштабными колебаниями атмосферы. Реальные данные с 19 метеостанций были взяты с Мирового центра данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации. Данные были проанализированы и рассчитаны среднемесячные значения в течение 30 лет в период с 1991-2020 гг. Для визуализации полученные результаты были визуализированы с помощью программ.

Из рисунков, построенных по полученным в ходе расчёта значениям аномалий было установлено, что в течение 30 лет в каждом исследуемом месяце аномалии температуры отклоняются от нормы в большую сторону. В большинстве случаев отклонение температуры воздуха выше 0° наблюдается начиная с периода 2001-2010 гг. В период 2011-2020гг температура отклоняется от нормы на 2° выше 0 в среднем. По этим данным можно заключить, что в целом наблюдается повышение температуры на территории Русской Арктики.

В ходе работы были рассчитаны коэффициенты линейного тренда. Из рисунков, демонстрирующих карты распределения коэффициентов линейного тренда было установлено, что наибольшие сильные изменения температуры в исследованный период наблюдались на территории Восточной Сибири и дальневосточном секторе. Также был сделан вывод, что в переходные сезоны наблюдаются наиболее сильные изменения температуры.

Одной из поставленных целей было рассчитать коэффициенты корреляции между индексами колебаний и аномалий и оценить их значимость. В ходе работы, были прокоррелированы значения индекса Североатлантического колебания, индекса Арктического колебания и индекса Южного колебания с рассчитанными значениями среднемесячной температуры в исследуемый период. Выявлено, что корреляция температуры воздуха как положительная так и отрицательная хорошо прослеживается с каждым индексом.

Индекс NAO хорошо коррелирует с температурой в зимние месяцы. Отрицательные связи в большинстве случаев наблюдаются в дальневосточном секторе и на территориях восточной Сибири. Положительная корреляция чаще всего присутствует на территории западной и восточной Сибири. Индекс Арктического колебания достаточно хорошо коррелирует с температурой на протяжении всех исследуемых месяцев. Отрицательная корреляция хорошо видна на территории дальневосточного сектора Арктики. Положительные связи индекса арктического колебания с температурой выявлены на большей территории сибирского сектора Арктики. Индекс Южного колебания хорошо прослеживается в течение всех исследуемых месяцев на севере Русской Арктики. Положительные связи наблюдаются в дальневосточном секторе и на севере восточной Сибири. Отрицательная связь прослеживается в западно-сибирском регионе арктической зоны.

Список литературы

1. <https://touristam.com/arkticheskie-pustyni-rossii.html>
2. <https://neftegaz.ru/tech-library/geografiya/668885-arkticheskaya-zona-rossiyskoj-federatsii-azrf/>
3. <http://polaruni.ru/polyarnye-rayony-i-led/arktika/?print>
4. https://spravochnick.ru/geografiya/prirodno-klimaticheskie_usloviya/klimaticheskie_usloviya_arktiki/
5. Алексеев Г.В. Арктическое измерение глобального потепления // Арктический и антарктический институт Росгидромета. – 2014. 13 с. [электронный ресурс]
6. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. – Москва: Триада, 2013. – 144 с. [электронный ресурс]
7. Шерстюков Б. Г. Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата // Арктика и север. – Архангельск.: ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В.Ломоносова» – 2016. - №24 – 39 - 67 с. [электронный ресурс]
8. Чижова Ю.Н. Влияние арктических воздушных масс на климатические условия периода снегонакопления в центре ЕТР // Арктика и Антарктика. – 2021. - №1 – 3 с. [электронный ресурс]
9. https://ru.wikipedia.org/wiki/Арктическая_осцилляция
10. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-arctic-oscillation>
11. https://deru.abcdef.wiki/wiki/Arktische_Oszillation
12. <http://test.oceanographers.ru/?p=286>
13. <https://www.geo-magellan.online/post/тихий-океан>
14. Осипов А.М., Гущина Д.Ю. ЭЛЬ-НИНЬО 2015-2016 ГГ.: Эволюция, механизмы, сопутствующие удаленные аномалии. – Москва.: МГУ. - 2018. – 54 - 81 с. [электронный ресурс]

- 15.Панин Г.Н., Дианский Н.А., Соломонова И.В., Гусев А.В., Выручалкина Т.Ю. Оценка климатических изменений в Арктике в XXI столетии на основе комбинированного прогностического сценария // Арктика: экология и экономика. – 2017. №2 (26). – 35 - 52 с. [электронный ресурс]
- 16.Лубков А.С., Воскресенская Е.Н, Марчукова О.В. Прогнозирование индекса южного колебания // Вестник СПбГУ «Науки о Земле». – 2017. – Т. 6. №4 – 370 - 387 с. [электронный ресурс]
- 17.Бендик А.Б., Яковлев В.Н. О сближении подходов к пониманию феномена Эль-Ниньо — Ла-Нинья // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. – 2010. - №1 – 57 - 64 с. [электронный ресурс]
- 18.https://deru.abcdef.wiki/wiki/El_Ni%C3%B1oSouthern_Oscillation
- 19.Никитина Е. Н. Изменение климата в Арктике: адаптация в ответ на новые вызовы // Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право. – 2019. – Т. 12. – №. 5. С.182 [электронный ресурс]
- 20.<http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index0.xhtml>
- 21.Цепелев В.Ю. Руководство по работе с программой долгосрочного прогноза погоды «AFRICA 12.0