



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: «Долгопериодная изменчивость индексов колебаний атмосферы»

Исполнитель _____ Никифорова Анастасия Владимировна

Руководитель _____ кандидат физико-математических наук

Топтунова Ольга Николаевна

«К защите допускаю»

заведующий кафедрой _____

кандидат физико-математических наук, доцент

Анискина Ольга Георгиевна

« 31 » мая 2023 г.

Санкт-Петербург

2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	2
Глава 1. Центры действия атмосферы.....	4
1.1 Азорский максимум и Исландский минимум.....	5
1.2 Гавайский максимум и Алеутский минимум.....	7
Глава 2. Атмосфера как колебательная система. Индексы крупномасштабной циркуляции.....	8
2.1 Эль-Ниньо Южное колебание.....	8
2.2. Северо-Тихоокеанское колебание.....	10
2.3. Арктическое колебание.....	12
2.4. Индекс течения Гольфстрим.....	14
2.5. Северо-Атлантическое колебание.....	15
2.5 Понятие об атмосферной циркуляции.....	18
Глава 3. Исходные данные	21
3.1 Исходные данные и метод исследования	21
Глава 4. Результаты расчётов.....	24
4.1 Динамика изменения положения центров действия атмосферы.....	24
4.1.1. Среднегодовые значения.....	24
4.1.2. Вейвлет-анализ основных характеристик ЦДА	32
4.1.3. Годовой ход.....	40
Заключение.....	46
Список использованных источников.....	49

Введение

Причину климатических изменений многие исследователи ищут в изменении параметров центров действия атмосферы. Исследование изменения климата Земли, в ее отдельных регионах стало на данный момент одним из самых главных приоритетов гидрометеорологической науки. На фоне многочисленных публикаций и волнений граждан по поводу «глобального потепления климата» вследствие «парникового эффекта» в последнее время формируется и направление, в котором придается огромное значение естественных причин изменения климата или, по крайней мере, влиянию антропогенных факторов через естественные. Так, например, изучаются закономерности и причины динамики квазистационарных барических центров действия атмосферы и индексов интенсивности циркуляции атмосферы, так как они являются ключевыми элементами крупномасштабного взаимодействия, оказывающими значительное влияние на погоду и климат в целом. Большая часть колебаний климата в разных регионах Земли определяется как раз выраженностью центров действия атмосферы и интенсивностью зональных и меридиональных переносов в атмосфере непосредственно с ними связанных.

В середине 1990-х гг. были выделены пять основных колебаний, представляющих собой довольно резкие смены одной фазы на другую: 1) североатлантическое (NAO), 2) арктическое (AO), 3) тихоокеанское (NPO), 4) Эль-Ниньо — Южное колебание (ENSO), 5) антарктическая полярная волна.

Эти колебания принято рассматривать как главные факторы, играющие основную роль, а соответственно и оказывающие влияние на погоду и климат.

Кроме того, ЦДА могут быть предикторами в долгосрочном прогнозировании. Как известно, в ДПП есть два принципиально разных подхода: метод подбора годов-аналогов и метод ансамблевого

моделирования. Часто результат таких прогнозов разнится и, чтобы выбрать наиболее вероятный сценарий для прогноза, прогнозисты опираются на фактические, архивные и прогностические характеристики ЦДА. Вышесказанным определяется *актуальность* работы.

Целью работы является исследование многолетних характеристик индексов колебаний атмосферы и характеристик ЦДА.

Исходные данные для работы:

- Характеристики центров действия атмосферы (Дикинис А.В, Куликова Л.А.) (с 1991 по 2016 гг.)

Данные по широте, долготе и давления в центре были взяты из архива «Характеристик центров действия атмосферы». Данные об индексах были взяты из Центра прогноза климата национальной администрации по океану и атмосфере (National Oceanic and Atmospheric Administration's -NOAA).

Объектом исследования являются центры действия атмосферы, *Предметом* – исследования изменчивости их характеристик.

Основными задачами работы являются:

- пополнение данных актуальными данными из данных реанализа ERA5
- определение динамики изменения географического положения центров действия атмосферы.
- исследование динамики изменения давления в центрах действия атмосферы.

Глава 1. Центры действия атмосферы.

Центры действия - это обширные и почти стационарные области низкого (депрессии) или высокого давления (антициклоны), которые контролируют движение атмосферных возмущений на большой территории. [2]

Существование циркуляции атмосферы обусловлено, в основном, распределением атмосферного давления, вызванным соответственно разным поступлением солнечной радиации в различных широтах, различными многообразными физическими свойствами земной поверхности (суши, моря и льда), и отклоняющим влиянием вращения Земли на воздушные потоки.

Французский метеоролог Леон Тейссерен де Борт первым в 1881 году применил этот термин к максимумам и минимумам давления на дневных графиках. Основными центрами действия в Северном полушарии являются Исландский минимум, Алеутский минимум, Азорский максимум, Тихоокеанский максимум, Сибирский максимум (зимой) и Азиатский минимум (летом). [3]

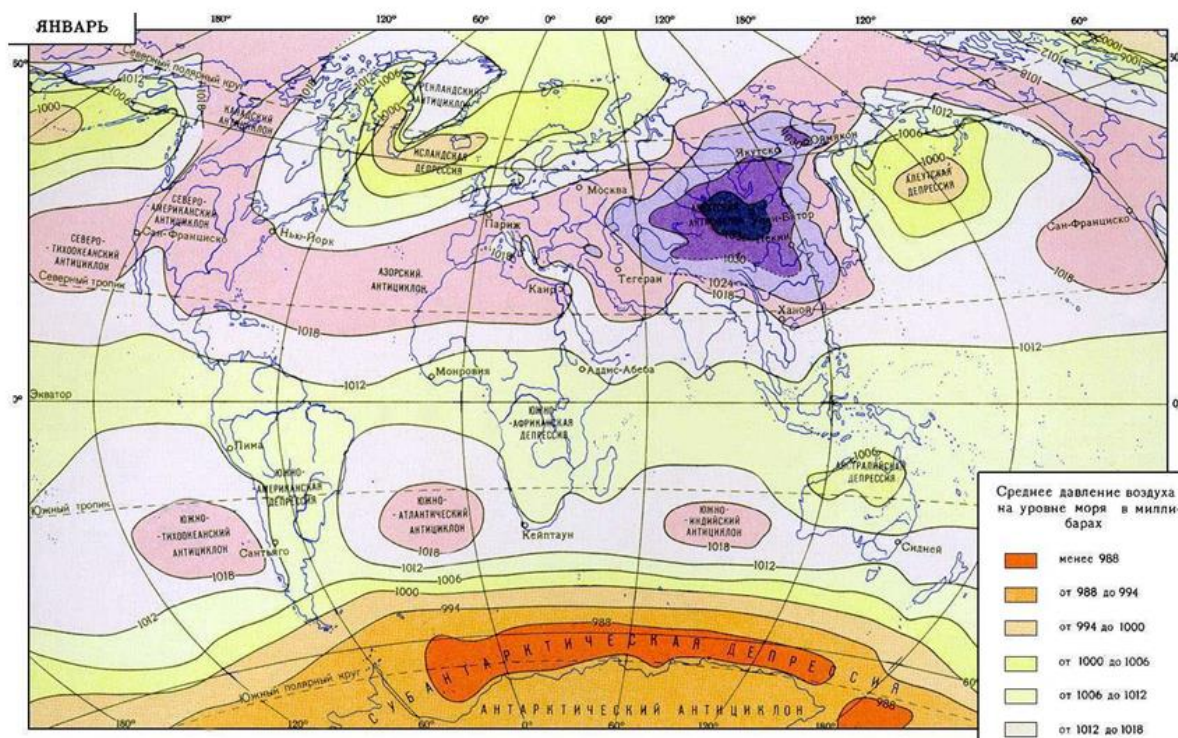


Рисунок 1.1 - Климатическое поле приземного давления (зимний сезон)

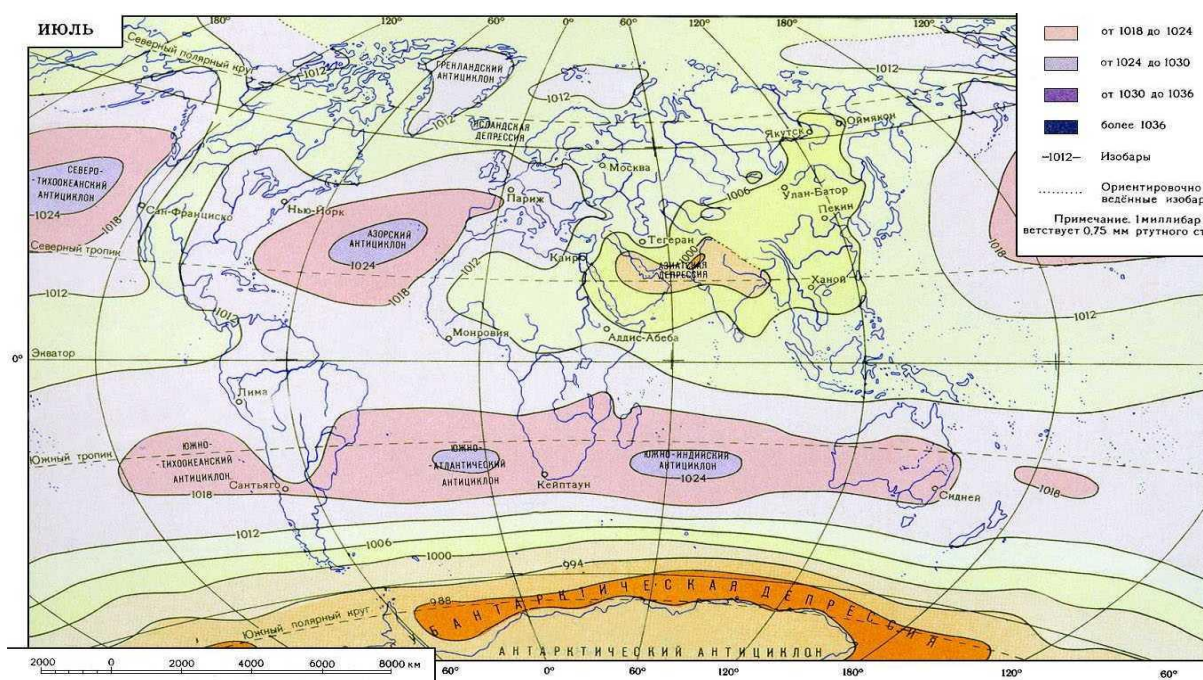


Рисунок 1.2 - Климатическое поле приземного давления (летний сезон)

Область действия каждого из центров действия атмосферы составляет приблизительно 120° по долготе. Кстати с этим размером связано деление на естественные синоптические районы в долгосрочных прогнозах.

1.1 Азорский максимум и Исландский минимум

Азорский максимум — это обширная область высокого атмосферного давления, не постоянно возникающего в абсолютно любые месяцы года, на определенной части субтропического пояса с центром вблизи Азорских островов Атлантического океана, из-за чего ЦДА и получил свое название.

Исландский минимум или Исландская депрессия — это масштабная область пониженного давления над северной частью Атлантического океана, между Европой и Гренландией, с центром в районе о. Исландия, откуда и вытекает название. Положением этих двух центров действия атмосферы определяется Северо-Атлантическое колебание (САК или NAO), которое во многом определяет погоду в Северной Америке, Европе и Гренландии.

Главной причиной возникновения Северо-Атлантического колебания является прямая связь системы океан-атмосфера: повышение температуры поверхности океана в тропической зоне ведет к усилению Азорского антициклона и углублению Исландской депрессии.

Благодаря этому колебанию происходит перераспределение воздушных масс между Арктикой и субтропической Атлантикой. По своей сути САК можно охарактеризовать как изменение разности атмосферного давления на уровне моря между Азорским максимумом и Исландским минимумом. Так, следствием увеличения разницы давления между АМ и ИМ является усиление зонального переноса, а следствием уменьшения этой разницы – усиление меридионального переноса. Есть несколько методов расчета САК: его рассчитывают как просто разность давлений между фиксированными точками, хорошо характеризующими ЦДА (их выбор может быть различен в зависимости от метода), либо представляют эту величину в долях дисперсии. Кроме того, иногда берут мигрирующие точки, связанные непосредственно с ЦДА. Иногда САК рассматривают как первую компоненту разложения всех этих индексов по ЕОФ.

В целом в период, когда показатели индекса САК достаточно высоки, наблюдается усиление субтропического максимума давления и углубление исландского минимума, что соответственно, ведёт к большим градиентам между этими атмосферными образованиями, достаточно резкому усилению ветров, несущих с атлантического океана тёплый и влажный воздух в северную Европу, когда к примеру в Канаде и Гренландии преобладает очень сухая и достаточно холодная погода.

В промежутки времени с невысокими значениями индекса, интенсивность атмосферных образований, в свою очередь, ослабевает, сила ветров снижается, и происходит изменения их направления, они смещаются в сторону Средиземноморья, где после погода наблюдается тёплая и влажная. В северной Европе в данной ситуации более частой является сухая и холодная погода.

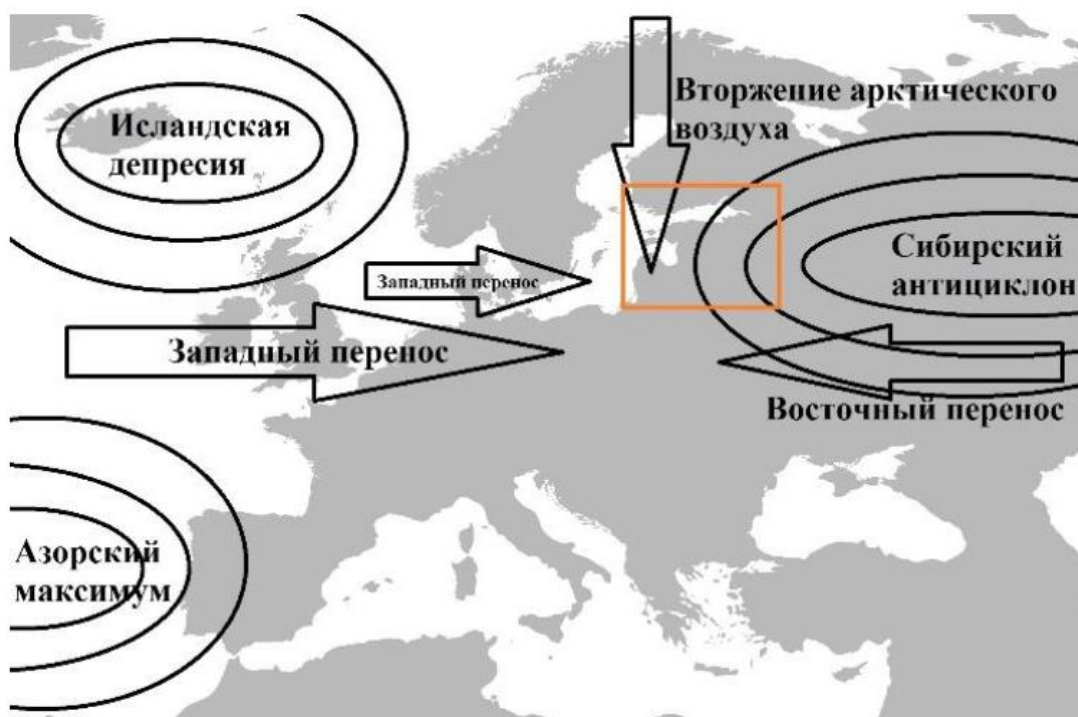


Рисунок 1.3 - Географическое положение центров действия атмосферы и доминирующие направление воздушных масс

1.2 Гавайский максимум и Алеутский минимум

Гавайский максимум — субтропический антициклон около Гавайских островов. Также Гавайский максимум имеет второе название, широко используемое в литературе — гонолульский максимум. Второе название вытекает из факта о том, что среднее годовое положение расположено вблизи центра гавайских островов —Гонолулу.

Алеутский минимум — область низкого атмосферного давления рядом с Алеутскими островами Тихого океана, проявляющаяся по большей части зимой. Он служит причиной образования достаточно мощных циклонов с очень сильными снегопадами и ветрами на Аляске, Камчатке, Курильских островах. Снижение атмосферного давления, в свою очередь, связано с теплым Аляскинским течением, когда увеличивается его контраст с охлаждающимися островами и холодными водами у западной окраины Алеутских островов.

Глава 2. Атмосфера, как колебательная система. Индексы крупномасштабной циркуляции.

2.1 Эль-Ниньо Южное Колебание

Замечаемыми проявлениями колебаний системы атмосфера - океан - Земля значится Южное колебание, Эль-Ниньо и Ла-Нинья а также передвижения географических полюсов Земли.

Всего в северном полушарии выделяется 14 центров действия атмосферы, которые объединены в пять основных систем дальних связей (или телеконнекций). [5]

Эль-Ниньо - это частный случай Южного колебания, естественного климатического явления, которое происходит в тропическом районе Тихого океана. Оно характеризуется периодическим сдвигом атмосферного давления между восточной и западной частями Тихого океана, что оказывает влияние на климат и погодные условия во многих частях мира. Эль-Ниньо проявляется в виде временного увеличения температуры поверхности океана в восточной части Тихого океана, что приводит к изменению нормальных течений океана и пассатных ветров, обычно дующих с востока на запад. Это в свою очередь ведет к изменению атмосферного давления и погодных условий во многих частях мира. Когда в Южном полушарии происходит Эль-Ниньо, это может привести к усилению циклональной активности, частым ливням и наводнениям в Австралии и Индонезии, а также засухам и наводнениям в южной части Южной Америки.

Эль-Ниньо – Южное колебание - это непостоянные, периодические изменения температуры поверхности моря в тропической части восточной части Тихого океана и ветра, оказывающие существенное влияние на погоду и климат внушительной части субтропиков и тропиков. Фазу повышения температуры мы называем - Эль-Ниньо, а фаза похолодания - Ла-Нинья . Южное колебание - это есть составляющая атмосферы, в сумме с

колебанием температуры моря: Эль - Ниньо сопровождается достаточно повышенным давлением у поверхности в тропической западной части Тихого и Ла - Нинья с поверхностным пониженным давлением воздуха там. Оба периода протекают по несколько месяцев каждый и по проведенным наблюдениям, можно сказать о том, что происходят они каждые несколько лет с разной интенсивностью в разный период.

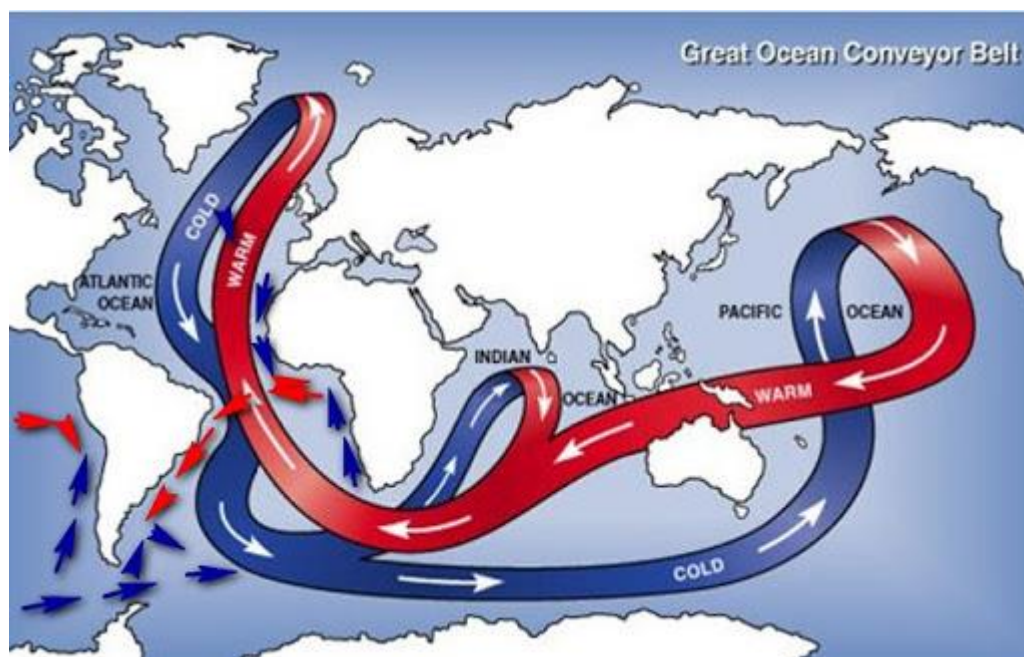


Рисунок 2.1 – Эль-Ниньо и структура океанических течений

Эти две фазы напрямую связаны с циркуляцией Уокера, открытой Гилбертом Уокером в начале двадцатого века, по-другому именуемая ячейкой Уокера. Циркуляция Уокера характеризуется интенсивностью градиента давления, возникающего из области высокого давления над восточной частью Тихого океана и системы низкого давления над Индонезией. Ослабление или обращение циркуляции Уокера понижает или вовсе устраняет подъем холодной глубоководной морской воды, таким образом, создавая Эль-Ниньо, как бы вынуждая поверхность океана повышать температуру и достигать значения выше среднего.

ЭНЮК является региональным следствием нарушения общей атмосферной циркуляции между полюсами и экватором. Его возникновение смещает области выпадения осадков на восток в Тихом океане и

препятствует подъему холодных вод вдоль побережья Южной Америки. ЭНЮК является одной из аномалий циркуляции, которые могут отклонять тропические циклоны от их обычных путей, смещать области осадков и засух, а также локально изменять уровень моря в результате изменения среднего давления. Слишком сильные колебания этого климатического режима вызывают феноменальные погодные условия (такие как наводнения и засухи) практически по всему земному шару. Большой ущерб от последствий ЭНЮК на себе испытывают развивающиеся страны, зависящие от сельского хозяйства и рыболовства, то есть с преобладанием натурального хозяйства, особенно страны, выходящие к Тихому океану. По мере удаления от Тихоокеанского бассейна связь между этими эффектами становится более слабой.

В целом, Южное колебание и Эль-Ниньо являются важными частями глобального климата и погодных условий, влияющих на многие аспекты жизни человечества. Их последствия могут быть непредсказуемыми и варьируются от года к году, что создает серьезные трудности для климатологов и метеорологов.

2.1 Тихоокеанское колебание

Тихоокеанско-североамериканское колебание (PNA) характеризуется четырьмя основными центрами действия, расположенными в районе Гавайских островов, на севере Тихого океана, на территории Канады (провинция Альберта) и другой на крайнем юго-востоке США вблизи Мексиканского залива [4]

Тихоокеанско-североамериканское колебание (PNA) является климатологическим термином, предназначенным для крупномасштабной модели погоды с двумя режимами, обозначаемыми как положительная и отрицательная фаза, и связывает характер атмосферной циркуляции над северной частью Тихого океана с режимом над североамериканским

континентом. На территории Северной Евразии влияние данного колебания проявляется лишь в полях температуры на Чукотке зимой, в меньшей степени - весной. При этом, в случае положительной (отрицательной) фазы индекса отмечаются отрицательные (положительные) аномалии температуры воздуха. Так, положительная фаза PNA характеризуется увеличением атмосферного давления в районе Гавайских островов (Гавайский максимум) и над межгорным регионом Северной Америки, а также уменьшением атмосферного давления к центру, расположенному к югу от Алеутских островов (Алеутский минимум) и над юго-востоком Соединенных Штатов [5].

Тихоокеанское колебание, как правило, не существенно влияет на изменчивость температуры поверхности над Северной Америкой в течение всего летнего сезона. Сопутствующие аномалии осадков включают в себя итоговые значения выше среднего в заливе «Аляска», простирающиеся до тихоокеанского побережья северо-запада США, и итоговые значения ниже среднего на среднем западе США [6].

Отрицательная фаза PNA является абсолютно противоположной положительной [6].

Хотя схема PNA является естественной внутренней модой изменчивости климата, на нее также достаточно сильно влияет такое колебание как Эль-Ниньо - Южное (ENSO). Положительная фаза PNA, в свою очередь, связана с увеличением температуры поверхностного слоя воды в экваториальной части Тихого океана (Эль-Ниньо), а отрицательная фаза - с понижением температуры (Ла-Нинья) [7].

Так же Тихоокеанско – североамериканское колебание зачастую связывают с волнами Россби. Положительную фазу связывают с меридиональным верхним воздушным потоком, а отрицательную - зональным верхним воздушным потоком.

2.2 Арктическое колебание

Арктическое колебание – это такое погодное явление, которое отображает действие атмосферной циркуляции в полярных и средних широтах. Его обозначают с помощью специализированного индекса, который может быть и отрицательным, и положительным. При отрицательной фазе холодный воздух уходит в средние широты Европы, а южные циклоны при этом будут вызывать сильные штормы в Средиземноморском бассейне.

Арктическое колебание (АО) характеризует, в отличие от других индексов, не региональные, а глобальные особенности циркуляции атмосферы. Индекс АО переменяется во времени без чёткой периодичности и 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. Арктическая осцилляция связана с северным околополярным вихрем в стратосферу [8].

Данный индекс очень известен и популярен в использовании, его рассчитывают практически повсеместно в северном полушарии для изучения взаимодействия масс между средними и высокими широтами.

Северо-Атлантическое колебание является низкочастотной модой Арктического колебания [9].

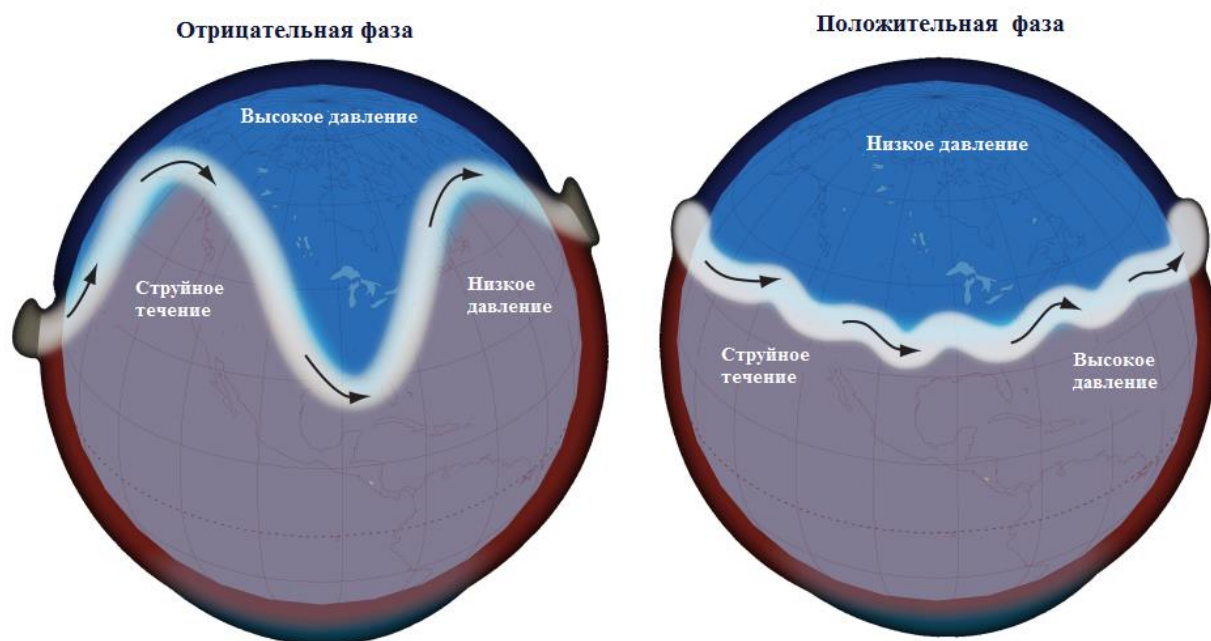


Рисунок 2.2. – Проявление различных фаз Арктического колебания в атмосфере

Как мы можем заметить Арктическое колебание похоже на кольцевую схему аномалий у уровня моря с центром в полюсах (рис. 2.1.).

По результатам многих исследований Арктическое колебание влияет на погоду на территории достаточно удаленной от Арктики, следующим образом: когда индекс Арктического колебания положительный, то в полярной области наблюдается низкое атмосферное давление на уровне моря. Это помогает струйному потоку в средних широтах сильно и равномерно дуть с запада на восток, тем самым удерживая холодный арктический воздух в заполярном регионе. Когда индекс АО отрицателен, в полярной области наблюдается высокое давление, более слабые зональные ветры и большее движение холодного полярного воздуха в средних широтах.

[10]

2.3. Индекс течения Гольфстрим

Теплое течение Гольфстрим является одной из важнейших составляющих циркуляции в Северной Атлантике и оказывает важнейшее влияние на климат Западной и Северной Европы. Любые изменения в положении, а также интенсивности этого течения могут иметь достаточно серьезные последствия для Европы. Изменения океанической циркуляции неразрывно связаны с изменениями в поле температуры и солёности в океане. По некоторым исследованиям с 1990-х годов в Северном и Норвежском море было обнаружено рекордное повышение температуры и солёности воды. Одновременно с вышесказанным увеличивается приток холодной и пресной воды в районе Гренландии и Исландии. Опреснение вод происходит по причине обильных осадков, потеплению климата, что в свою очередь приводит к усилению таяния льда и снега. Такое явление как опреснение ведёт к изменениям в соотношении пресных и холодных вод с солёными. Солёные водные массы оттесняются и проходят в Норвежское море южнее Исландии. Постоянное отслеживание положения течения Гольфстрим имеет очень важное значение не только для изучения и прогноза климатических изменений в океане и атмосфере Северной Атлантики и составлении закономерностей, вытекающих из данного процесса, но и для экономики различных стран, и, прежде всего, для рыболовной отрасли и сельского хозяйства.

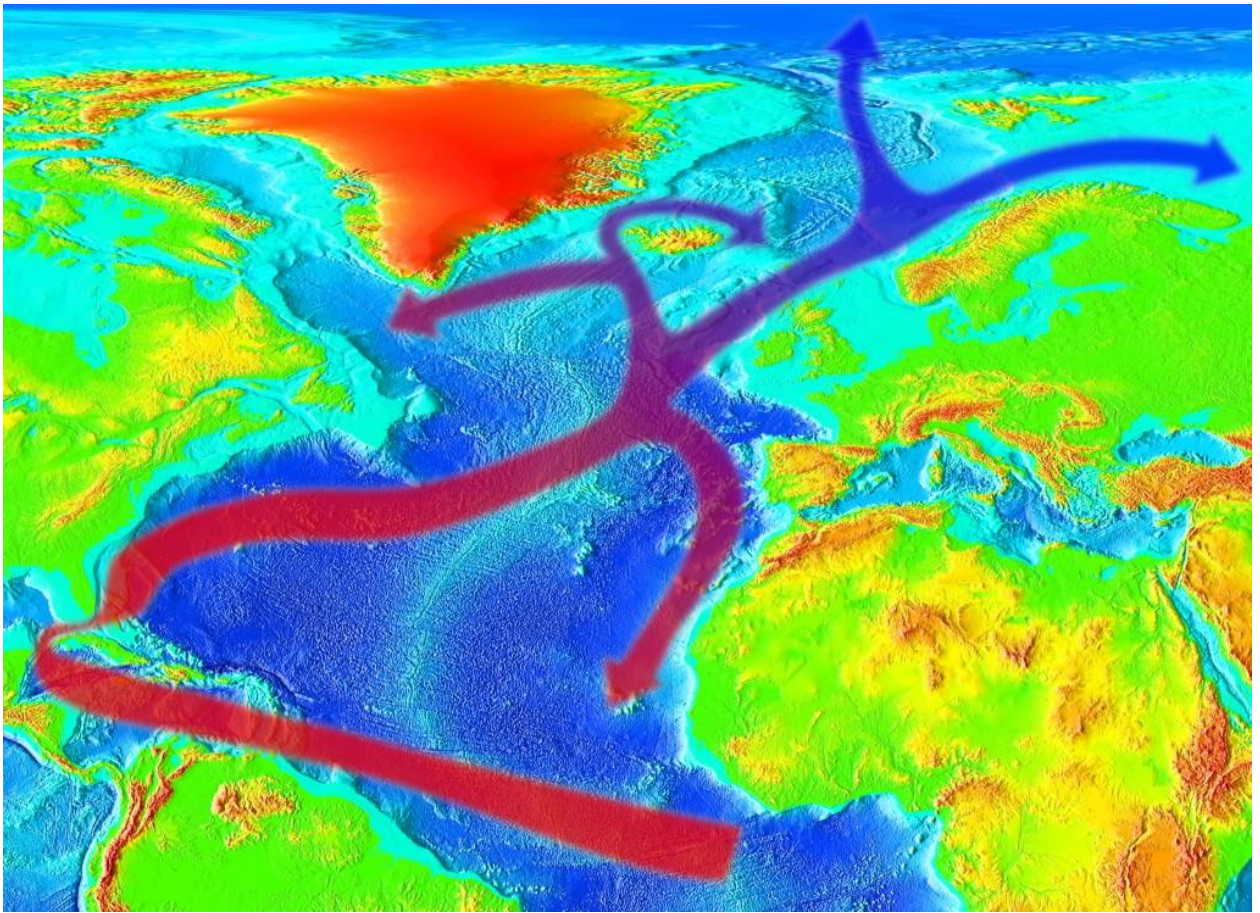


Рисунок 2.3 - Схема течения Гольфстрим

2.4 Северо-Атлантическое колебание

Северо-Атлантическое колебание может наблюдаться в атмосфере и океане. САК океане характеризуется периодом изменения 20-30 лет и влияет на климатические условия в Северной Америке, Европе, Африке и регионах Северной Атлантики. В период положительной фазы САК в зоне течения Гольфстрима и других течений Северной Атлантики повышается температура поверхности океана, улучшается погода в Северной Америке и Европе, и увеличивается количество осадков. В этот период происходит смещение субполярного гидрологического фронта на север, возрастает градиент температуры воды в зоне фронта. В период отрицательной фазы САК наблюдается положительная аномалия температуры поверхности океана в Лабрадорском, Северо-Атлантическом и Канарском течениях, а

также отрицательная аномалия в Гольфстриме. Субполярный гидрологический фронт смещается на юг, а градиенты температуры воды в зоне фронта сглаживаются. Это приводит к снижению количества осадков и ухудшению погодных условий в Северной Америке и Европе.

Северо-Атлантическое колебание в атмосфере также делится на две фазы - положительную и отрицательную. В положительной фазе исландский минимум и азорский максимум находятся на севере и хорошо развиты, градиенты давления между ними высоки, что определяет интенсивный зональный перенос над средними широтами северного полушария в основном зональная. В отрицательной фазе происходит ослабление зонального переноса и усиление меридиональных процессов. Изменчивость полей, связанных с САК, наиболее выражена в холодное время года, и зимние значения считаются наиболее показательными. В периоды с высокими значениями индекса наблюдается усиление субтропического максимума давления и углубление исландского минимума, что приводит к большим градиентам между этими атмосферными образованиями и усилению ветров, переносящих тёплый и влажный воздух в северную Европу из Атлантики, в то время как в Северной Америке и Гренландии преобладает сухая и холодная погода. Присущие температурные аномалии для разного индекса САК приведены на рисунке 2.4

NAO TEMPERATURE PATTERNS

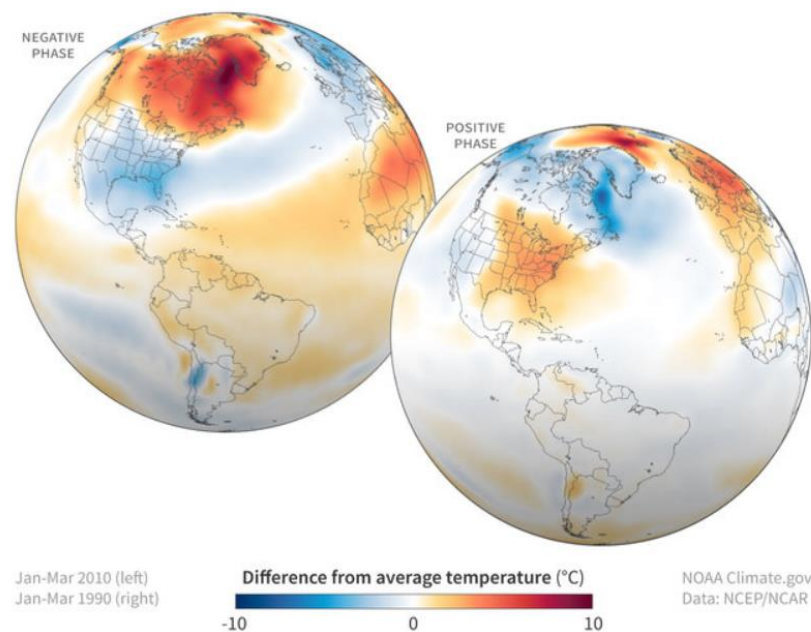


Рисунок 2.4 – Температурные аномалии во время положительной и отрицательной фазы Северо-Атлантического колебания.

2.5 Понятие об атмосферной циркуляции.

Общей циркуляцией атмосферы называют совокупность основных воздушных течений. В первую очередь ОЦА определяется притоком солнечной радиации. Интенсивность же солнечной энергии на поверхности Земли зависит от широты, времени года и времени суток. В зоне экватора солнечный свет падает под прямым углом, что приводит к высоким температурам воздуха. В полярных областях солнечный свет падает под углом, что приводит к невысокой интенсивности солнечной энергии и низким температурам воздуха. В результате данного различия в температуре, атмосферный воздух начинает двигаться от экватора к полюсам в верхнем слое атмосферы, а в нижнем слое возвращается обратно от полюсов к экватору. Этот процесс называется циркуляцией. Общая циркуляция атмосферы обеспечивает распределение тепла и влаги, необходимых для растительного и животного мира. Кроме того, циркуляция атмосферы также определяет погодные условия и климат, а также направление и скорость движения воздушных масс.

На общую циркуляцию атмосферы влияют многие вещи. Так, например, внешние астрономические и геофизические факторы (поток солнечной энергии, скорость вращения Земли вокруг своей оси), так и внутренние геофизические факторы, которые определяют характер энергетического взаимодействия между звеньями системы, так и антропогенное влияние человека и многое другое. К ним же относятся и рельеф подстилающей поверхности. Общая циркуляция атмосферы – это

В атмосфере существуют ячейки циркуляции, изображенные на рисунке

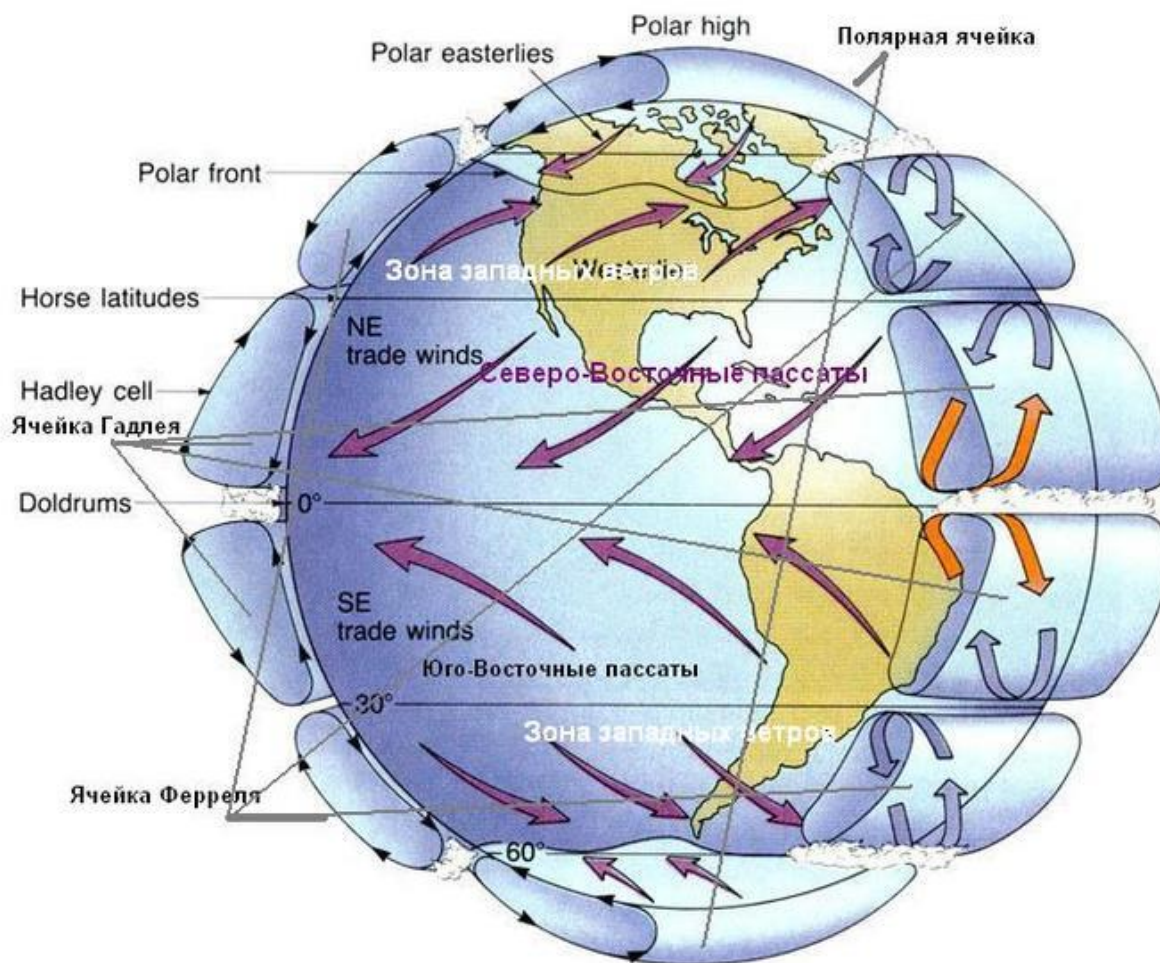


Рисунок 2.5 - Ячейки циркуляции атмосферы

В результате неравномерного нагрева поверхности Земли и ее вращения выделяется три ячейки циркуляции: ячейка Ферреля, ячейка Хадли и полярная ячейка. Ячейка Хадли (или ячейка Гадлея) - это ячейка циркуляции, которая возникает на экваторе и простирается до 30-35 градусов северной и южной широты. В ней воздух поднимается и охлаждается из-за конвекции, затем движется по направлению к полюсам, где опускается и вытесняет северные и южные воздушные массы ближе к поверхности Земли. Ячейка Ферреля или обратная циркуляционная ячейка - это ячейка циркуляции, которая действует в области от 30-35 градусов до 60 градусов северной и южной широты. Полярная ячейка возникает на 60 градусах широты и распространяется до полюсов. Воздух в этой ячейке опускается, а затем движется обратно к 60 градусам широты, создавая приполюсное высокое

давление. Каждая из этих ячеек циркуляции играет важную роль в определении климата в различных регионах мира. Например, ячейка Хадли влияет на традиционное сезонное изменение дождей на экваторе, тогда как ячейки Феррела и полюсная влияют на распределение температур и погодных условий в умеренных и субарктических регионах. [15]

Глава 3. Исходные данные

В данной главе описываются основные изменения в динамике положения центров действия Северо-Атлантического колебания и Тихоокеанского с учетом изменения давления между ними за период 1861-2021гг., (1861-2016)

3.1 Исходные данные и методы исследования

В данной работе исследовались изменения положения центров и давление в них Исландского минимума, Алеутского минимума, Гавайского максимума и Азорского максимума.

Источником данных послужил архив базы данных «Характеристики центров действия атмосферы», созданный Дикинисом А.В и Куликовой Л.А. Изначально данные выбирались на сетке градусов по данным среднемесячного давления [14].

Принцип отбора представлен на рисунке.

```
• MONTHLY GRID -- Date: 2004-01-00 31+0000 Grids in Average: 62
• Format: NCAR Sea-Level Pressure Level: 1013.0mb Parameter: Sea-Level Pressure Source: 28 Pole: 1022.8mb
• i = the data point was interpolated from surrounding data

• \LON 0E 5E 10E 15E 20E 25E 30E 35E 40E 45E 50E 55E 60E 65E 70E 75E 80E 85E
• LAT +-----+
• 85N| 1018.2 1017.9 1017.6 1017.4 1017.2 1017.0 1016.9 1016.9 1016.9 1017.0 1017.1 1017.3 1017.6 1017.9 1018.3 1018.7 1019.2 1019.6
• 80N| 1011.6 1010.6 1010.4 1010.8 1011.3 1011.6 1011.8 1011.8 1011.8 1011.9 1011.8 1011.9 1012.0 1012.3 1012.7 1013.2 1013.9 1014.7
• 75N| 1004.4 1003.9 1004.2 1005.0 1005.8 1006.3 1007.0 1007.8 1008.4 1008.4 1008.3 1008.6 1009.2 1009.4 1009.5 1009.8 1010.5 1011.7
• 70N| 998.0 998.3 999.4 1001.1 1003.2 1004.9 1005.9 1006.1 1006.4 1007.2 1008.2 1009.3 1010.3 1010.9 1011.0 1011.0 1011.6 1013.4
• 65N| 996.5 997.9 1000.5 1005.6 1008.1 1009.1 1010.7 1011.2 1011.8 1013.3 1014.5 1016.0 1016.8 1016.8 1016.8 1016.9 1017.2 1018.0
• 60N| 998.2 1001.9 1006.6 1008.1 1009.4 1011.6 1012.5 1013.8 1015.2 1017.4 1019.8 1021.9 1022.6 1022.8 1023.9 1024.2 1024.7 1025.4
• 55N| 1003.5 1004.3 1006.8 1008.5 1009.9 1010.7 1011.4 1013.1 1015.7 1019.3 1022.1 1024.8 1026.1 1027.0 1028.0 1028.4 1029.0 1030.5
• 50N| 1010.7 1011.1 1011.7 1012.0 1011.9 1011.9 1011.3 1012.2 1014.7 1018.2 1020.7 1024.0 1025.5 1026.0 1028.9 1029.6 1030.6 1031.4
• 45N| 1017.0 1014.7 1012.4 1012.5 1013.5 1011.9 1010.2 1009.8 1012.5 1015.4 1017.9 1020.5 1022.3 1023.3 1025.1 1026.9 1026.0 1031.0
• 40N| 1018.0 1015.6 1012.4 1011.4 1010.0 1009.9 1011.7 1013.1 1016.3 1017.7 1015.4 1017.0 1018.9 1019.5 1020.5 1023.3 1029.2 1030.1
• 35N| 1020.6 1018.9 1016.5 1013.5 1011.0 1009.8 1010.5 1012.7 1014.5 1017.6 1018.0 1016.1 1016.5 1019.5 1019.7 1020.5 1022.6 1024.8
• 30N| 1019.5 1018.7 1018.1 1016.7 1015.5 1014.7 1014.1 1013.7 1014.3 1015.3 1015.8 1016.0 1015.7 1016.5 1015.8 1015.3 1018.0 1024.3
• 25N| 1017.7 1017.8 1017.8 1017.5 1016.8 1016.3 1015.3 1013.4 1013.0 1014.0 1014.7 1014.8 1015.0 1014.8 1014.3 1014.4 1015.7 1015.1
• 20N| 1015.6 1015.5 1016.1 1014.7 1015.0 1014.8 1013.5 1011.5 1010.9 1012.6 1013.3 1014.2 1014.7 1014.2 1012.9 1012.7 1013.6 1014.0
• 15N| 1012.9 1012.4 1013.2 1012.4 1010.6 1012.5 1010.9 1008.0 1010.0 1013.0 1013.3 1013.5 1013.3 1012.7 1011.7 1011.5 1012.5 1012.7
```

Рисунок 3.1 (а) - Пример начальных данных при отборе в архив «Характеристики центров действия атмосферы», созданный Дикинисом А.В и Куликовой Л.А

•	LON	180E	185E	190E	195E	200E	205E	210E	215E	220E	225E	230E	235E	240E	245E	250E	255E
•	45N	995.9	994.5	996.7	999.0	1000.5	1002.0	1003.0	1004.9	1006.8	1009.2	1012.5	1016.3	1021.2	1022.4	1019.9	1019.8
	40N	998.2	997.1	997.4	998.6	1000.3	1002.5	1004.9	1007.6	1010.2	1013.5	1016.8	1019.1	1021.5	1024.2	1024.0	1017.9
•	35N	1003.9	1003.0	1002.8	1003.2	1004.3	1006.5	1009.0	1012.0	1015.1	1017.9	1020.0	1020.7	1019.3	1017.9	1019.8	1017.8
•	30N	1010.0	1009.2	1009.0	1009.2	1010.0	1011.2	1013.2	1015.7	1018.0	1019.9	1021.0	1021.0	1019.4	1017.1	1016.4	1017.1
•	25N	1013.5	1013.1	1012.8	1012.7	1012.9	1013.7	1015.2	1016.8	1018.1	1019.3	1020.0	1019.9	1018.8	1017.1	1015.3	1017.3
•	20N	1013.8	1013.6	1013.4	1013.3	1013.4	1013.9	1014.7	1015.5	1016.2	1016.9	1017.2	1017.3	1016.9	1016.0	1015.1	1014.3
•	15N	1012.1	1012.0	1011.9	1011.9	1012.0	1012.2	1012.5	1012.9	1013.3	1013.6	1013.7	1013.7	1013.3	1013.1	1013.2	1013.1

Рисунок 3.2 (б) - Пример отбора данных для архива «Характеристики центров действия атмосферы», созданный Дикинисом А.В и Куликовой Л.А

Так как ряд», созданный Дикинисом А.В и Куликовой Л.А., оканчивался 2016 годом данные были восполнены по данным реанализа ERA5 по алгоритму, изложенному авторами. Реанализ ERA5 на сегодняшний день является одним из лучших для приземных данных. Интерполяция данных в узлы сетки размером $5^0 \times 5^0$ производилась с помощью CDO.

```
cdo -b 64 -remapbil,grid.txt /az_sh/azp12sh.nc /az_sh/Iazp12sh.nc
```

```
gridtype = lonlat
gridsize = 16380
xname    = lon
xlongname = longitude
xunits   = degrees_east
yname    = lat
ylongname = latitude
yunits   = degrees_north
xsize    = 180
ysize    = 91
xfirst   = 0
xinc     = 5.0
yfirst   = -90
yinc     = 5.0
```

Рисунок 3.3 – сетка, на которую проводилась интерполяция

По данным расчётов были построены графики, для изучения климатической изменчивости весь рассматриваемый период был разбит на 30-летние отрезки времени.

Глава 4 Результаты расчетов

4.1 Динамика изменения положения центров действия атмосферы.

4.1.1 Среднегодовые значения

Алеутский минимум

На рисунке 4.3 представлен годовой ход давления, рассчитанный по данным с 1899 по 2020 года. Как видно, наибольшую глубину Алеутский циклон имеет с декабря по февраль (около 995 гПа), максимальное летом (июнь-август, около 1007 гПа).

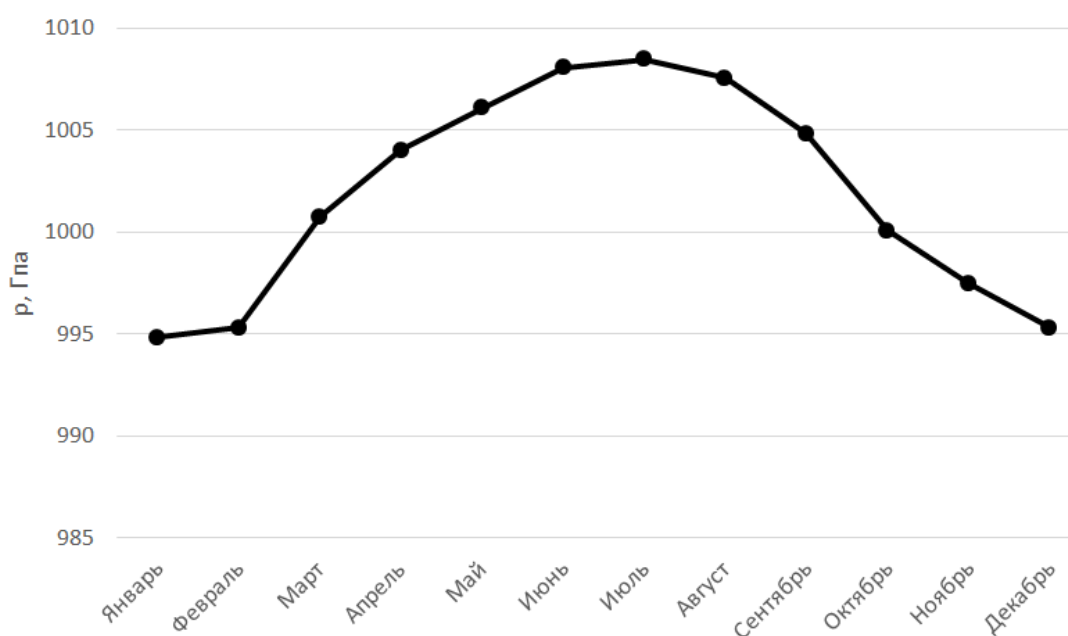


Рисунок 4.1 – Годовой ход давления в Алеутском минимуме

В среднем Алеутский циклон может опускаться до 54° с.ш. в феврале, а свое крайнее северное положение он занимает в июле-августе, около $61,5^{\circ}$ с.ш.

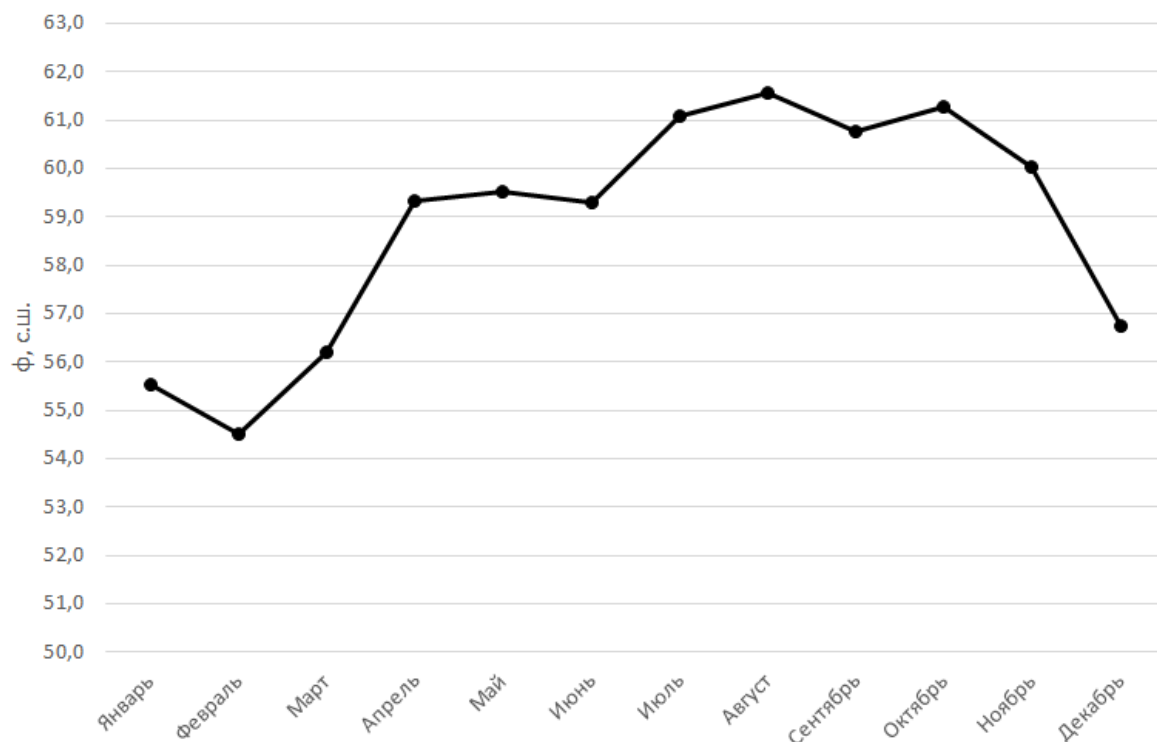


Рисунок 4.2 – Годовой ход широты в Алеутском минимуме

Изменения по долготе имеют гораздо большую амплитуду в среднегодовом ходе. В среднем алеутская депрессия переходит через 180 меридиан в положительные восточные долготы в летнее время, с июня по август, в остальное же время находится в западных долготах.

Стоит отметить, что как было сказано выше в летние месяцы алеутский минимум слабо выражен, в случае широт и долгот интересно смотреть именно зимние месяцы.

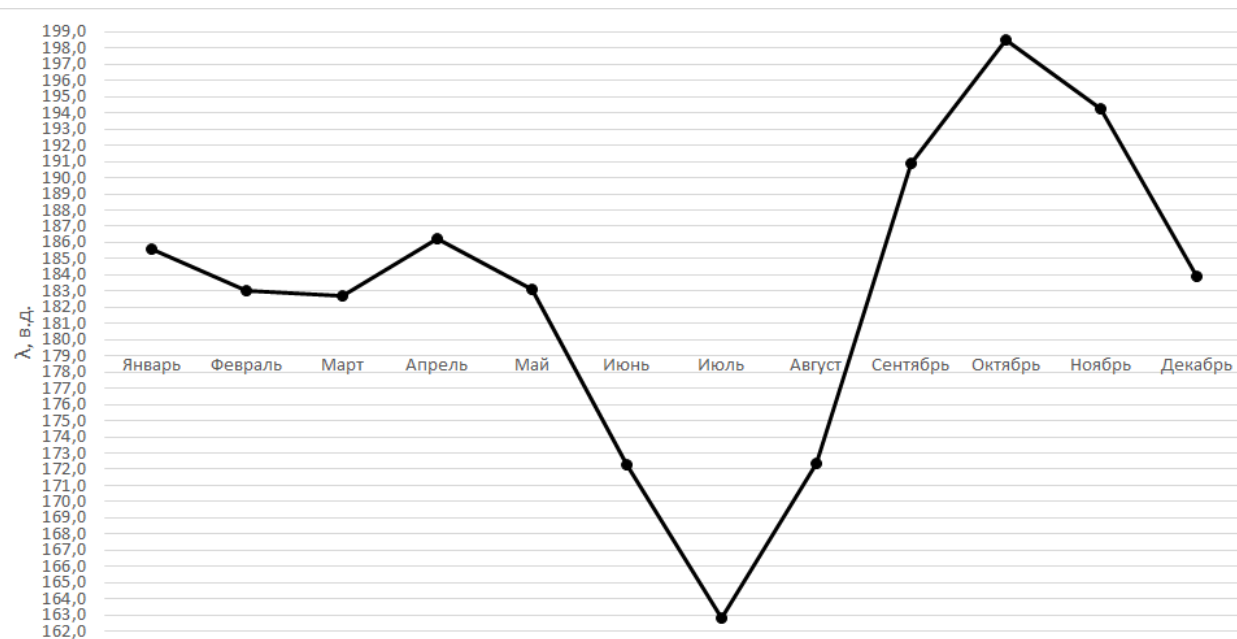


Рисунок 4.3 – Годовой ход глуботы в Алеутском минимуме

Исландский минимум

В Исландском минимуме наблюдаются схожие тенденции.

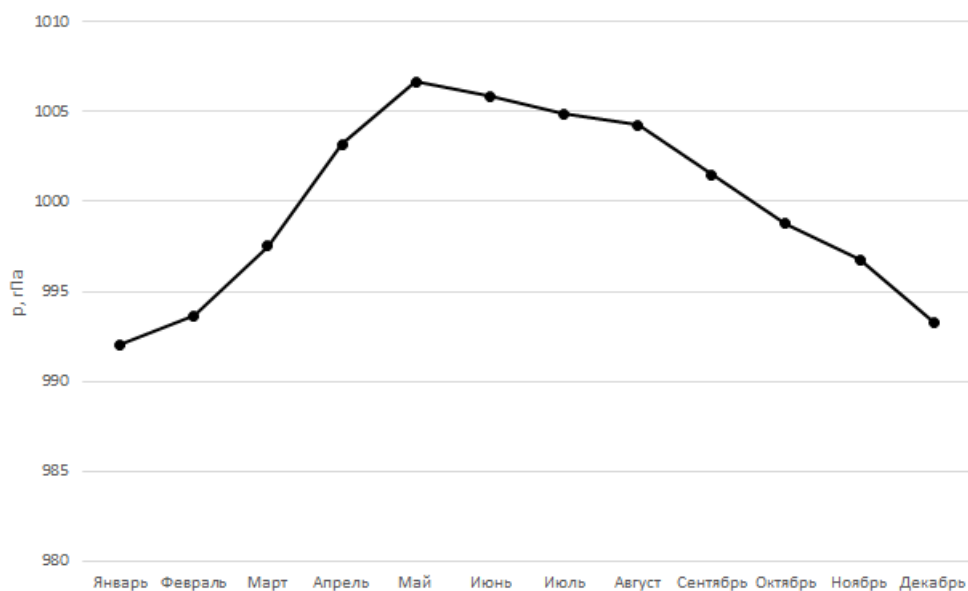


Рисунок 4.4 – Годовой ход давления в Исландском минимуме

Разница здесь в том, что давление здесь еще ниже, чем в алеутском минимуме.

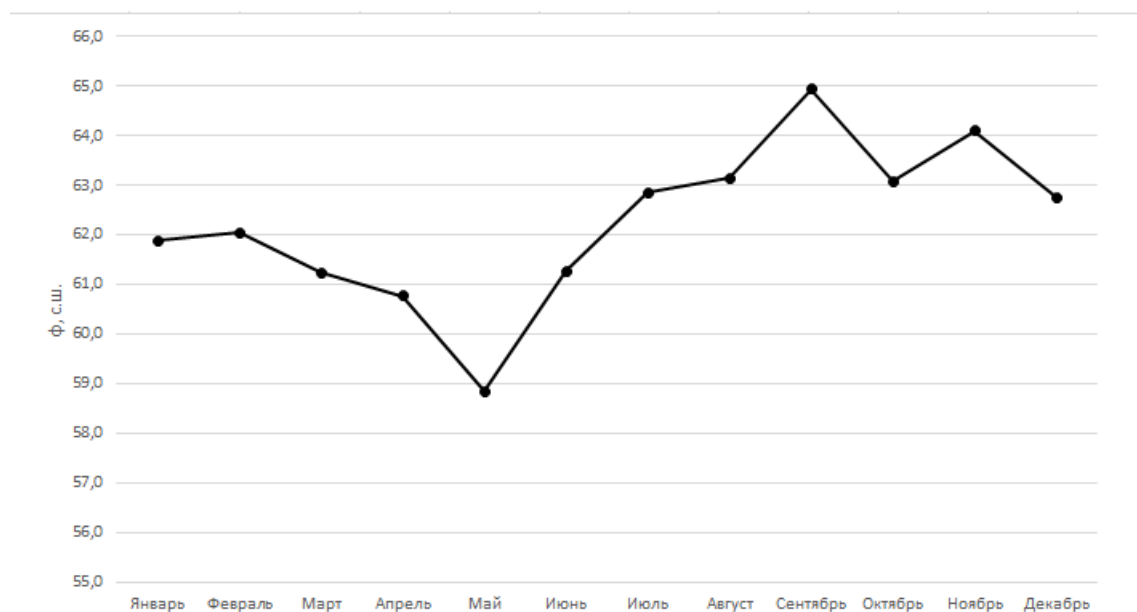


Рисунок 4.5 – Годовой ход широты в Исландском минимуме

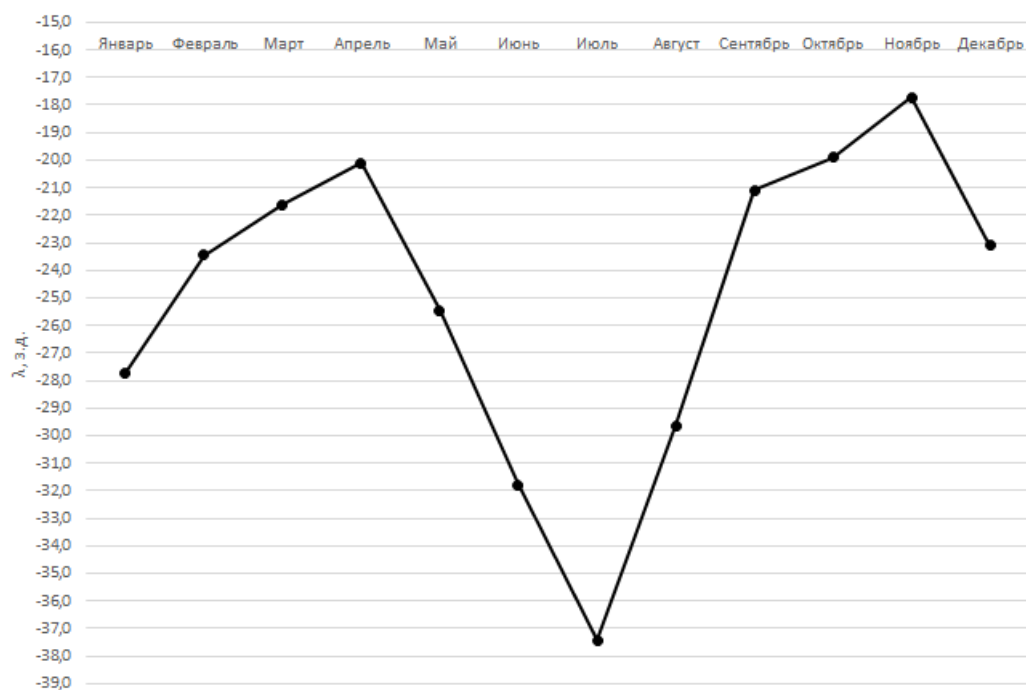


Рисунок 4.6 – Годовой ход долготы в Исландском минимуме

Азорский максимум

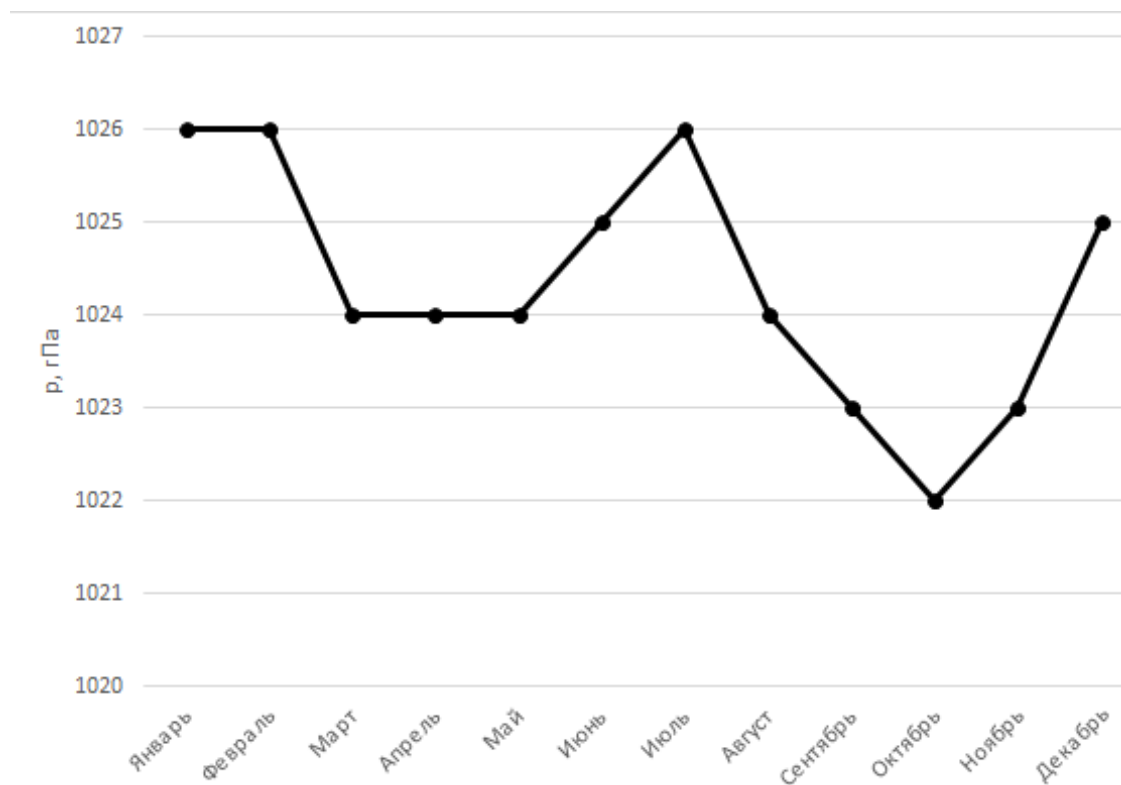


Рисунок 4.7 – Годовой ход давления в Азорском антициклоне

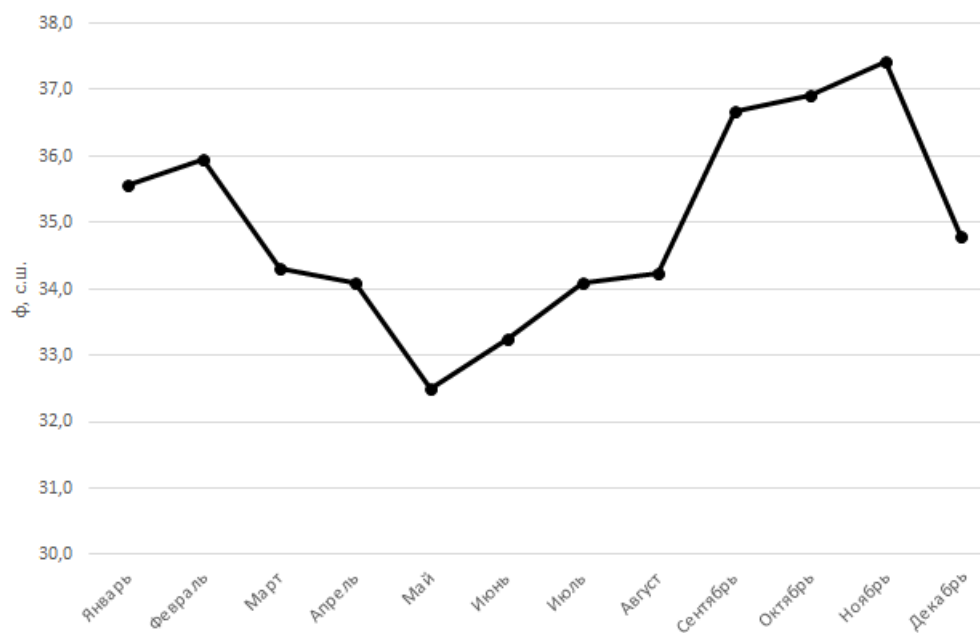


Рисунок 4.8 – Годовой ход давления в Азорском антициклоне

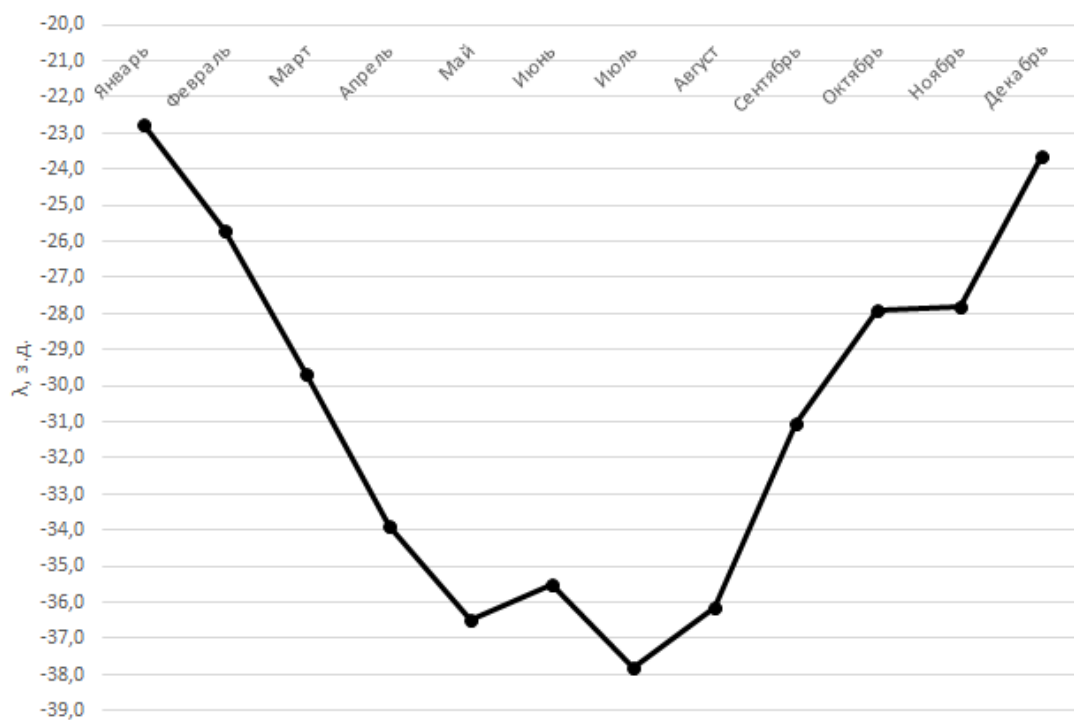


Рисунок 4.9 – Годовой ход долготы в Азорском антициклоне

Гавайский максимум

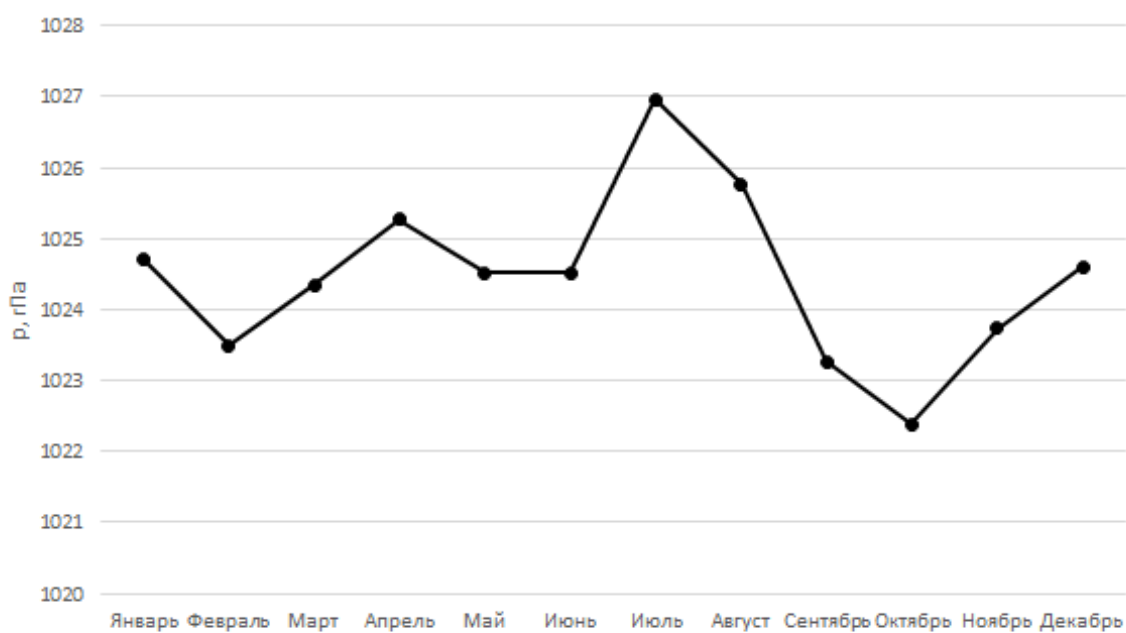


Рисунок 4.10 – Годовой ход давления в Гавайском антициклоне

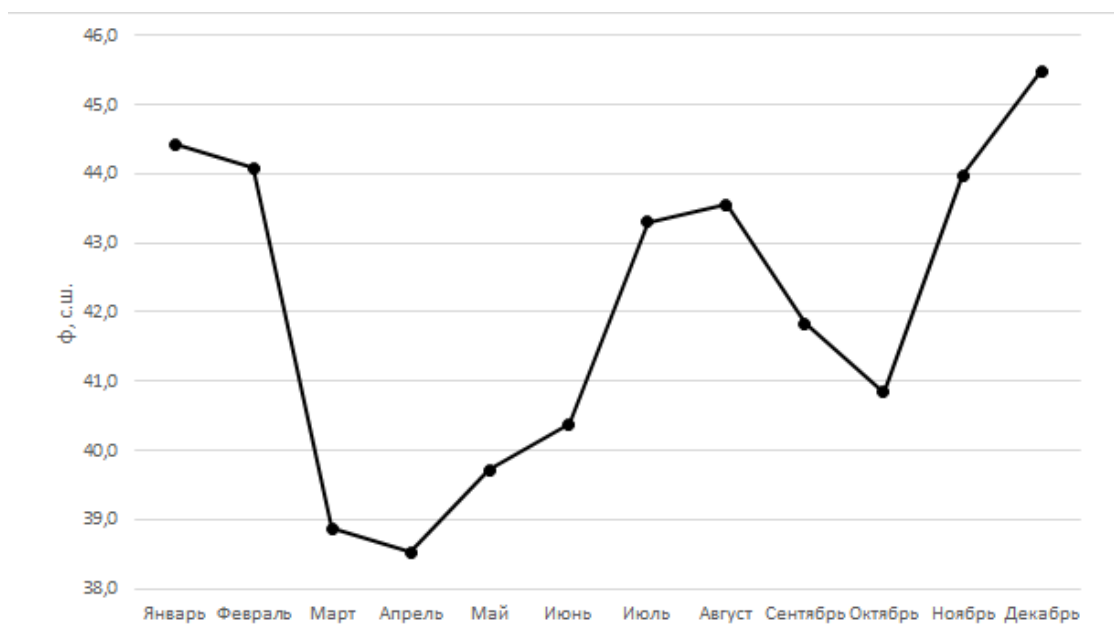


Рисунок 4.11 – Годовой ход широты в Гавайском антициклоне

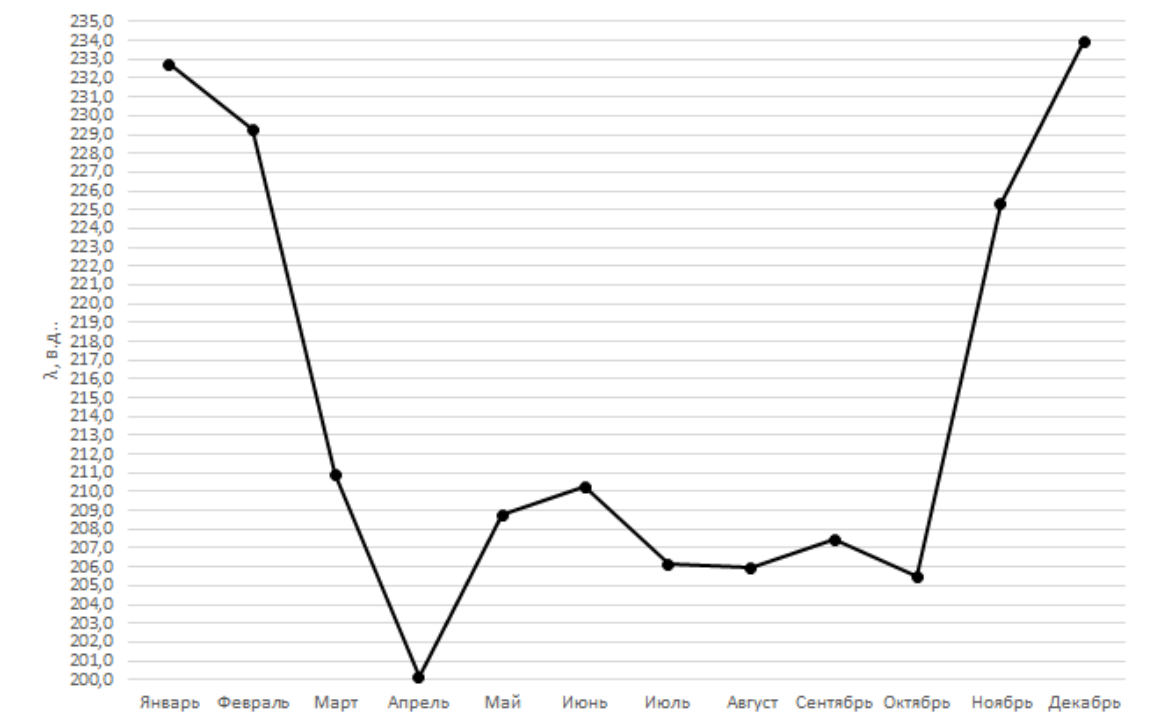


Рисунок 4.12 – Годовой ход долготы в Гавайском антициклоне

Как показано выше годовые амплитуды давления в азорском и гавайском максимуме приблизительно равны между собой (около 4- 5 гПа), однако разброс давления в циклонических центрах приблизительно в три раза больше (около 15-17 гПа).

Также для обоих циклонов можно выделить то, что самое северное положение они занимают осенью, однако если для исландской депрессии более характерен сентябрь, то алеутская сохраняет свое северное местоположение более долгий период (с июля по октябрь).

Годовой ход долгот для депрессий противоположен (на графиках подписано, что долгота в одном случае положительная, в другом отрицательная), амплитуда же изменений, годовые максимумы и минимумы приблизительно совпадают. В летние месяцы алеутский циклон сдвигается к западу, а осенью к востоку. Исландский циклон в летние месяцы занимает крайне восточное положение и сдвигается к западу зимой. Очень интересен широтный ход. График для алеутской депрессии кажется более сглаженным, для исландской же характерен экстремум в мае, когда исландский минимум занимает крайне южное положение.

Гавайский максимум и алеутский минимум имеют большую пространственную изменчивость нежели центры действия Северной Атлантики. Это можно объяснить большими пространствами самой акватории. Противоположна их позиция относительно друг друга. Так, гавайский антициклон расположен восточнее Алеутской депрессии (наиболее близки осенью и весной), тогда как в азорский антициклон наоборот расположен западнее исландской депрессии (наиболее близки зимой). Указанные выводы подтверждаются работах Смирнова Н.П. Воробьева В.Н. (в частности «Северо-Тихоокеанское колебание и динамика климата в северной части Тихого океана», однако вышеуказанные выводы сделаны на обновленных данных (прошло 20 лет), но исходные данные получены по той же методике.

Во многих работах, например ставят вопрос о взаимном влиянии друг на друга ЦДА. Связь при этом определяют корреляцией. Однако для того, чтобы коррелировать величины изменений между собой сами эти изменения должны быть одного периода. Для выявления частотно-временных характеристик ЦДА был выполнен непрерывный вейвлет-анализ.

Результаты представлены ниже.

4.1.2. Вейвлет-анализ основных характеристик ЦДА

Указанный метод анализа является очень современным спектральным методом анализа нестационарных процессов, он позволяет определить, в какой момент времени преобладала та или иная гармоника. Подробное рассмотрение спектра позволяет более точно изучить сигнал каждого колебания. Такой метод является более эффективным, чем разложение Фурье.

В отличие от преобразования Фурье разложение здесь идет не по синусоидам, а по вейвлет-образующим функциям, которые ограничены в области некоторого своего аргумента, а вдали от нее равны нулю или ничтожно малы.

Математический смысл вейвлет-преобразования подразумевает наличие двух аргументов: частоту сигнала и его локализацию.

По своему определению вейвлет-преобразование рассчитывается с помощью интеграла от произведения вейвлет-образующей функции $\psi(a,b)$ и сигнала $y(x)$:

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} (y(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right)) dx \quad (4.1)$$

В данном исследовании в качестве материнского вейвлета использовался вейвлет Морле. Раскладывались в каждом случае среднегодовые значения

для давления, широты и долготы Алеутской и Исландской депрессии, Гавайского и Азорского максимума

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} e^{i\omega t} \quad (4.2)$$

Результаты преобразований для давления, широты и долготы каждого из ЦДА представлены ниже. Также стоит отметить, что не смотря на всю универсальность и красоту используемого метода, к сожалению, он не дает ответа на природу и источник изменений частоты сигнала.

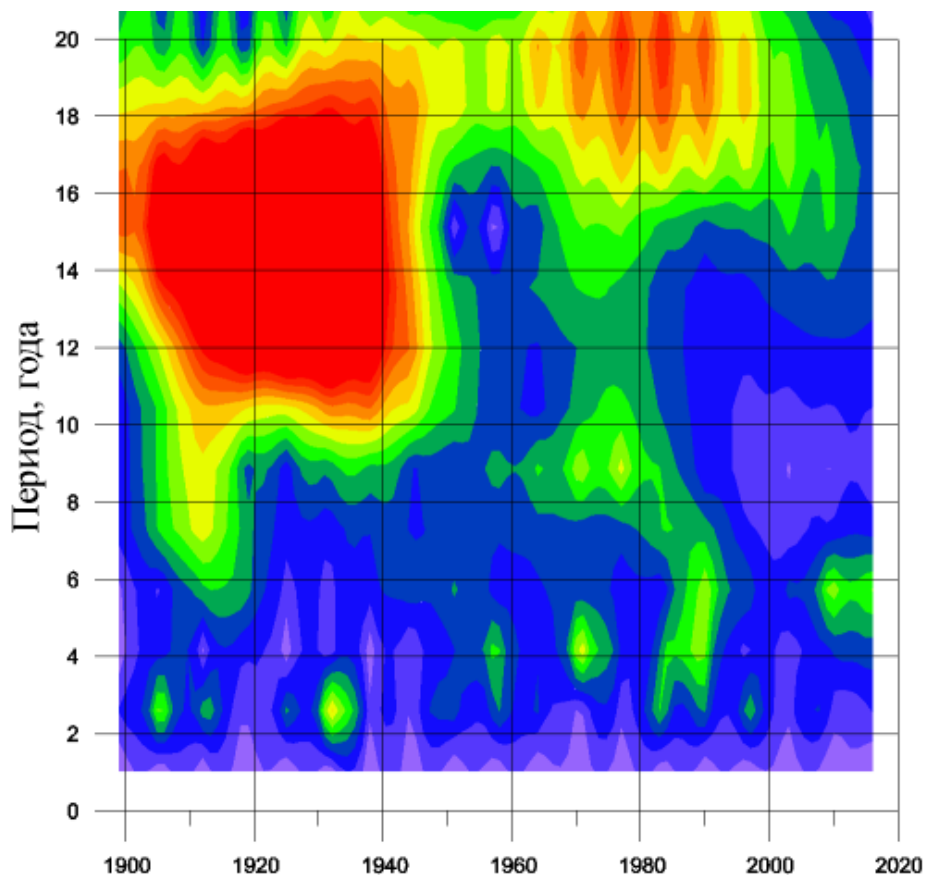


Рисунок 4.13 – Частотно-временной портрет давления в Алеутской депрессии

Как видно из рисунка 4.13 в начале века в Алеутской депрессии преобладали колебания порядка 15-16 лет, в годы, когда принято отсчитывать «глобальное потепление» усилились 20-летние гармоники, а сейчас центр достаточно стабилен. Иная картина же наблюдается в Исландской депрессии (рисунок 4.14)

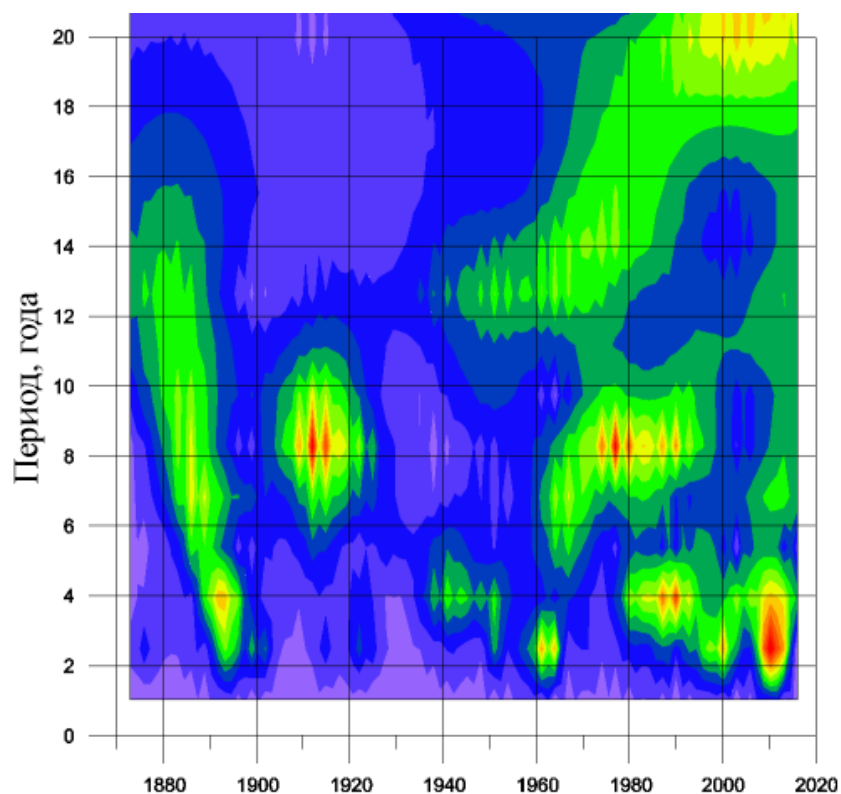


Рисунок 4.14 — Частотно-временной портрет давления в Исландской депрессии

Здесь, напротив после 80-х годов усилились колебания с более высокой частотой (период около 2-4 лет) и продолжают оставаться интенсивными по сей день.

Безусловно, помимо все центры действия надо рассматривать в паре. Обратимся к частотно-временным портретам давления для антициклонов.

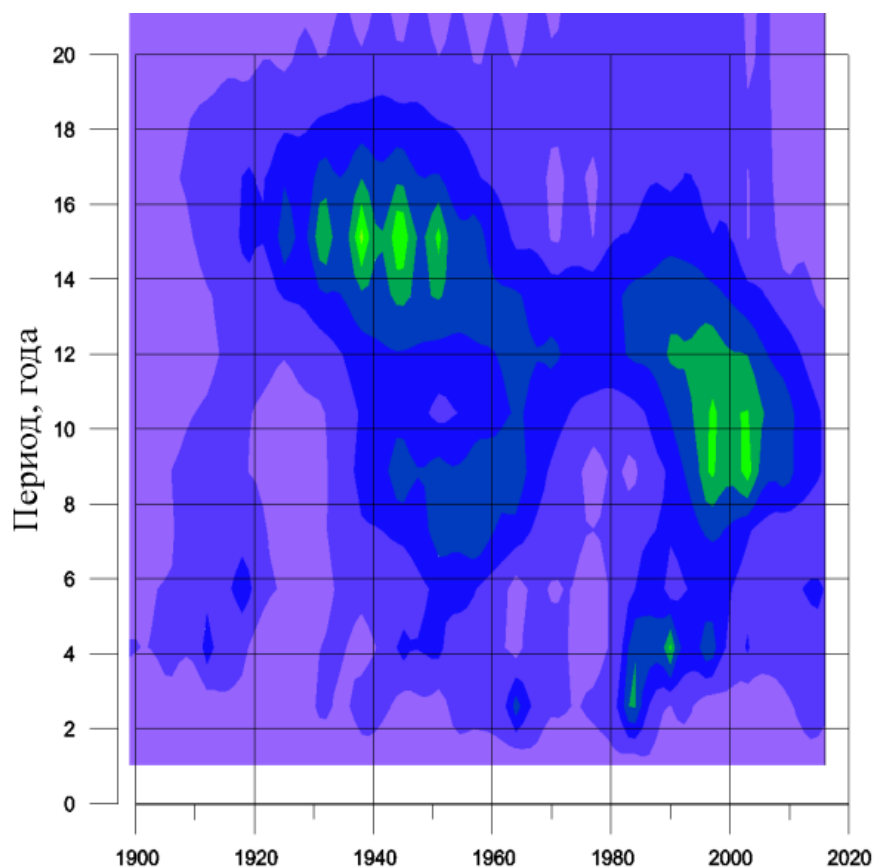


Рисунок 4.15 – Частотно-временной портрет давления в Гавайского максимума

Колебания здесь гораздо слабее, хотя в середине века также прослеживаются колебания с периодом около 15-16 лет.

Для Азорского антициклона колебания также более слабые (рисунок 4.16)

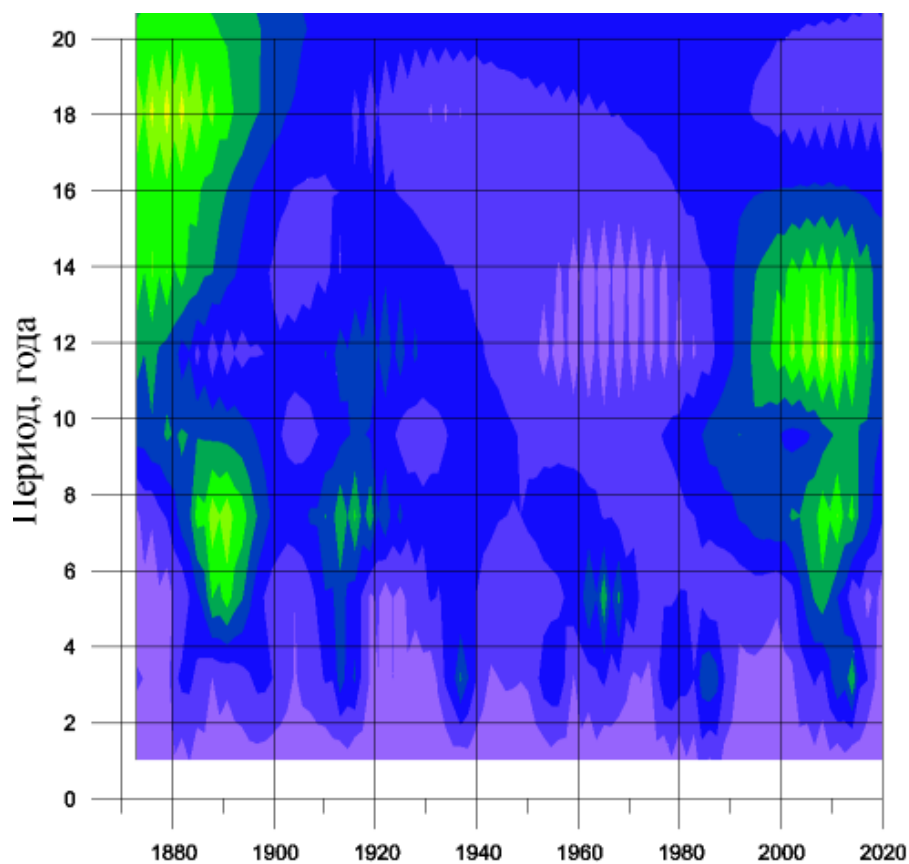


Рисунок 4.16 – Частотно-временной портрет давления в Азорского максимума

Здесь после 2000-х годов усиливается гармоника с частотой 10-12 лет, которая, очевидно связана с солнечной активностью.

Аналогичные расчеты были сделаны по широте и долготе.

На рисунке 4.17 представлен частотно-временной портрет широты Алеутской депрессии.

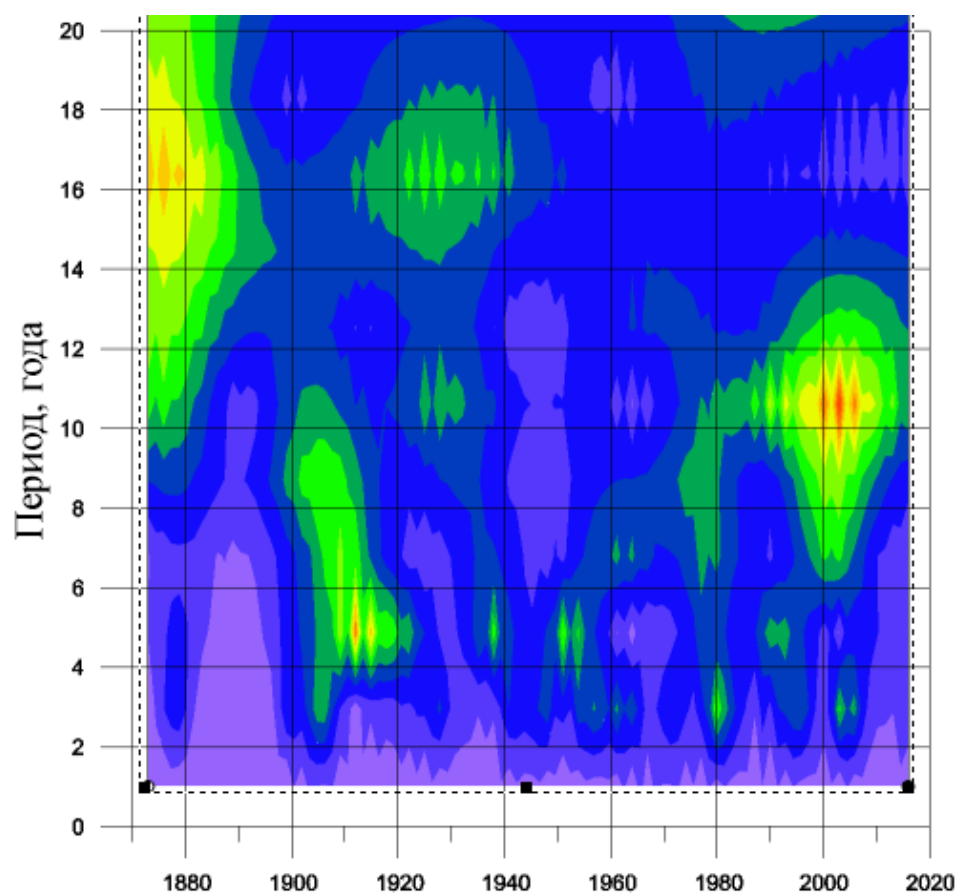


Рисунок 4.17 – Частотно-временной портрет широты Алеутской депрессии

Как видно, здесь в последние годы усилилась гармоника с периодом около 10 лет.

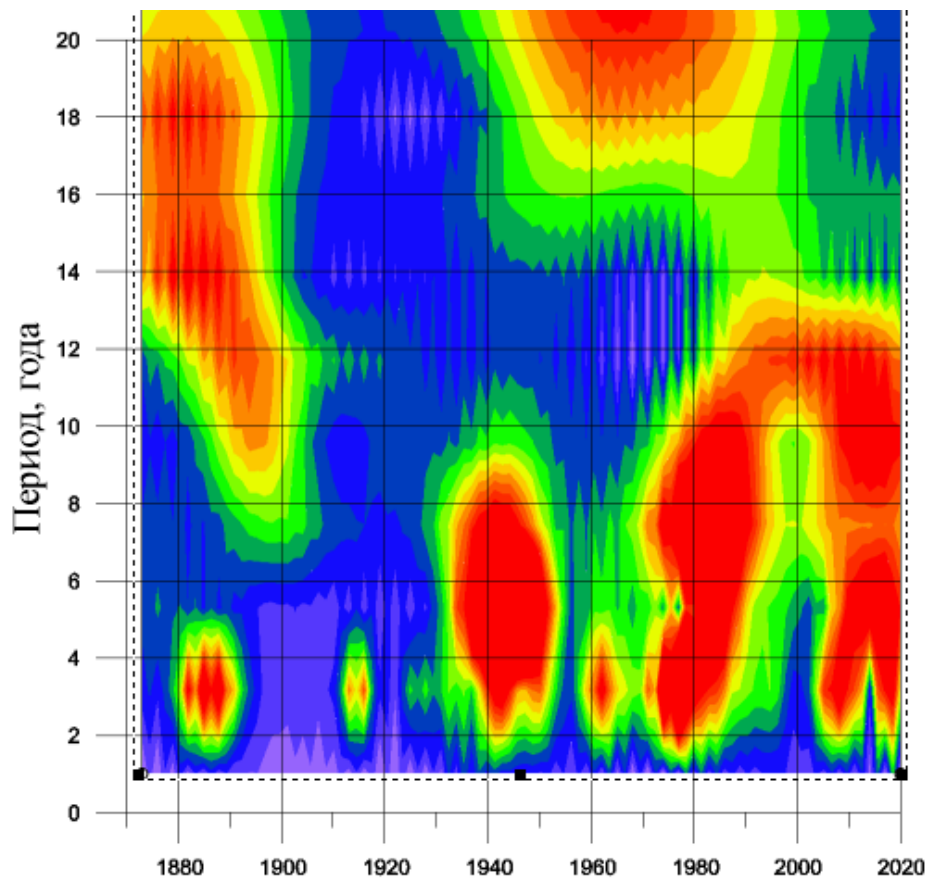


Рисунок 4.18 – Частотно-временной портрет широты Исландской депрессии

Для Исландской депрессии увеличилась не только эта гармоника, но и более высокочастотные колебания.

То есть можно отметить, что не смотря на то, что сам размах изменения широты у Алеутского циклона больше (что скорее всего связано с большей акваторией), у Исландской депрессии в последнее время возросла частота колебаний. Скорее всего, именно с этим можно связать участвовавшие погодные аномалии в Европе. Аналогично кстати увеличились и частоты с давлением, то есть давление в Исландской депрессии стало сложнее прогнозировать, а, соответственно, и погодные экстремумы.

Изменения в Гавайском антициклоне имеют схожую тенденцию, также в последние годы преобладает гармоника с периодом около 10 лет, однако здесь еще в середине века есть гармоники с периодом около 6 лет.

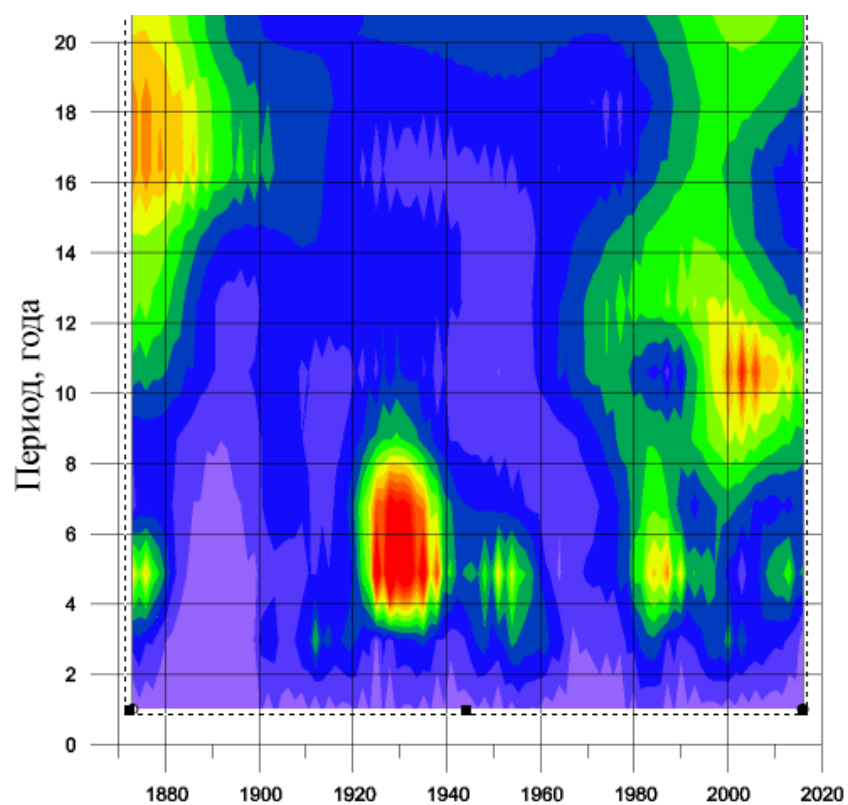


Рисунок 4.19 – Частотно-временной портрет широты Гавайского антициклона

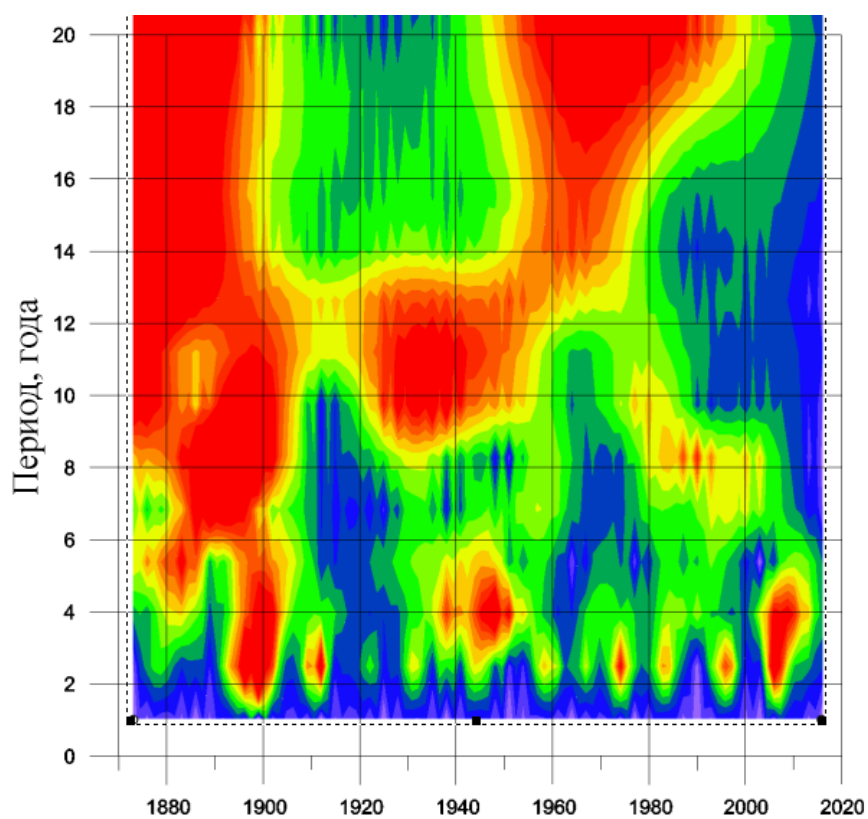


Рисунок 4.20 – Частотно-временной портрет широты Азорского антициклона

При разложении изменения долгот всех центров преобладающих гармоник не было обнаружено.

4.1.3 Годовой ход

Для анализа временных изменений давления, широт и долгот в ходе работы были проанализированы долговременные их изменения. Для этого на графики добавлена линия тренда. Значимость линейного тренда оценивалась F-критерием Фишера, который отражает, насколько линейный тренд объясняет общую дисперсию зависимой переменной, и высчитывался по формуле 4.3:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \frac{f_2}{f_1} \quad (4.3)$$

где R^2 – коэффициент детерминации (квадрат коэффициента корреляции), f_1 – число степеней свободы тренда (для линейного тренда этот показатель равен 1), f_2 – число степеней свободы выборки ($f_2 = N - k - 1$, где N – количество членов ряда, $k = f_1$). Вычисленное значение F-критерия Фишера сравнивалось с табличным значением – максимально возможным значением критерия под влиянием случайных факторов при данных степенях свободы и уровне значимости α (при расчетах использовался уровень значимости, равный 0,05). Если $F > F_{\text{табл}}$ тренд являлся значимым. Так как линейный тренд чувствителен к выбору начальной и конечной точек, то оценивался как весь период, так и отрезок после 80-го года. Так как именно после 80-х принято считать начало потепления.

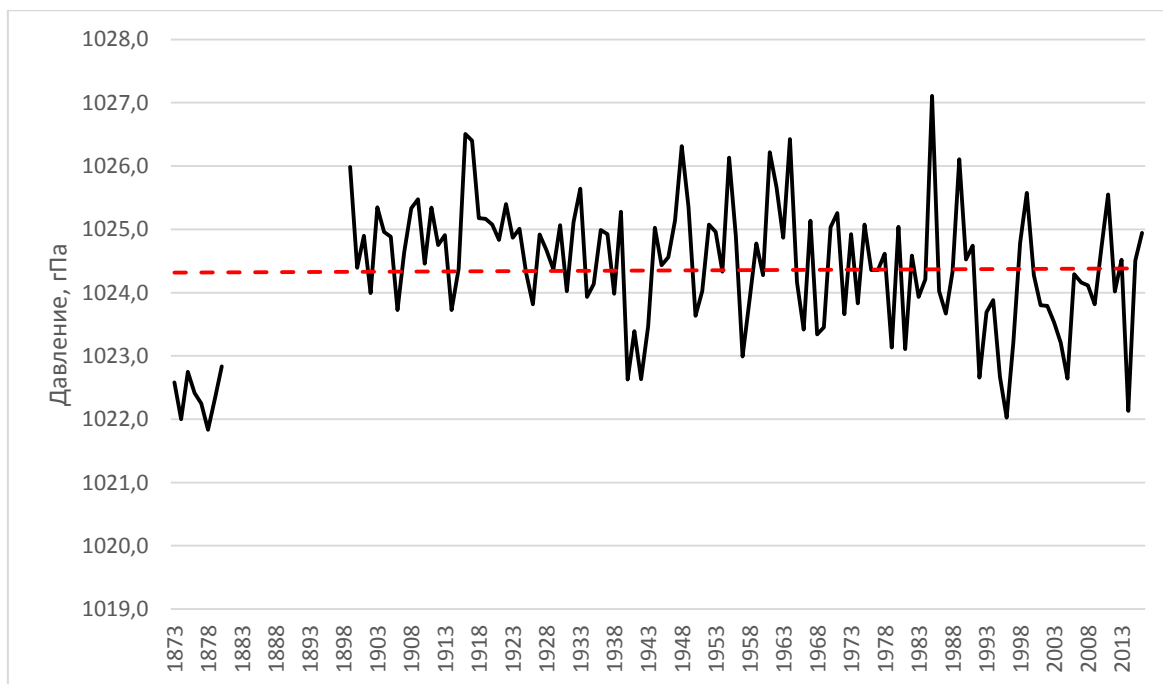


Рисунок 4.21 – Изменение давления в центре Гавайского антициклона

Как видно из рисунка выше в Гавайском антициклоне в последние годы участились аномалии, причем после 1980-х преобладают отрицательные аномалии. Тренд здесь не значим. Рассмотрим более подробно период после 1980-го года.

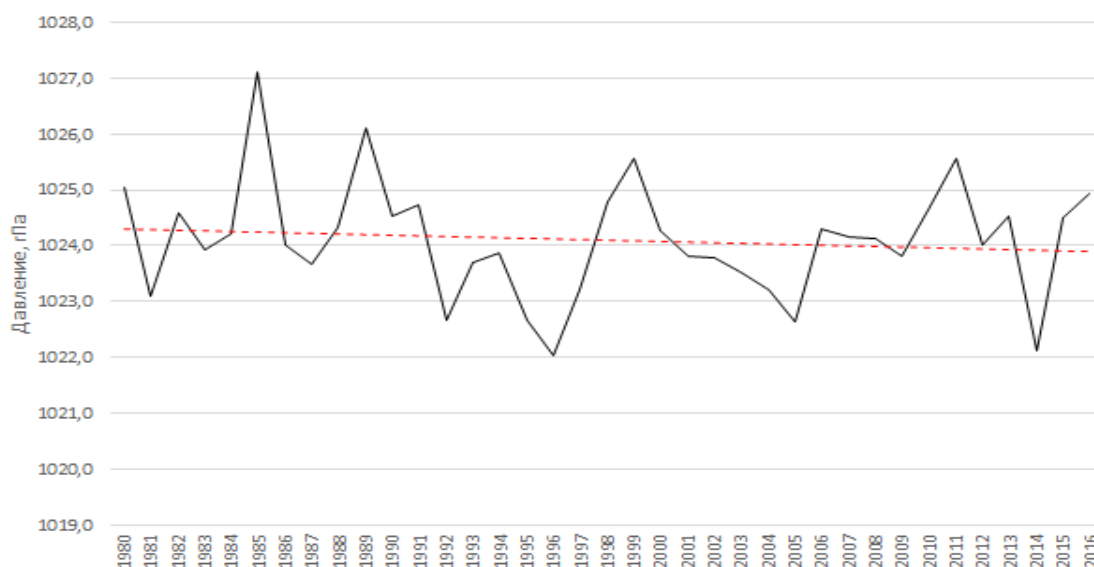


Рисунок 4.22 – Изменение давления в центре Гавайского антициклона после 1980-го

Тренд здесь также статистически не значим.

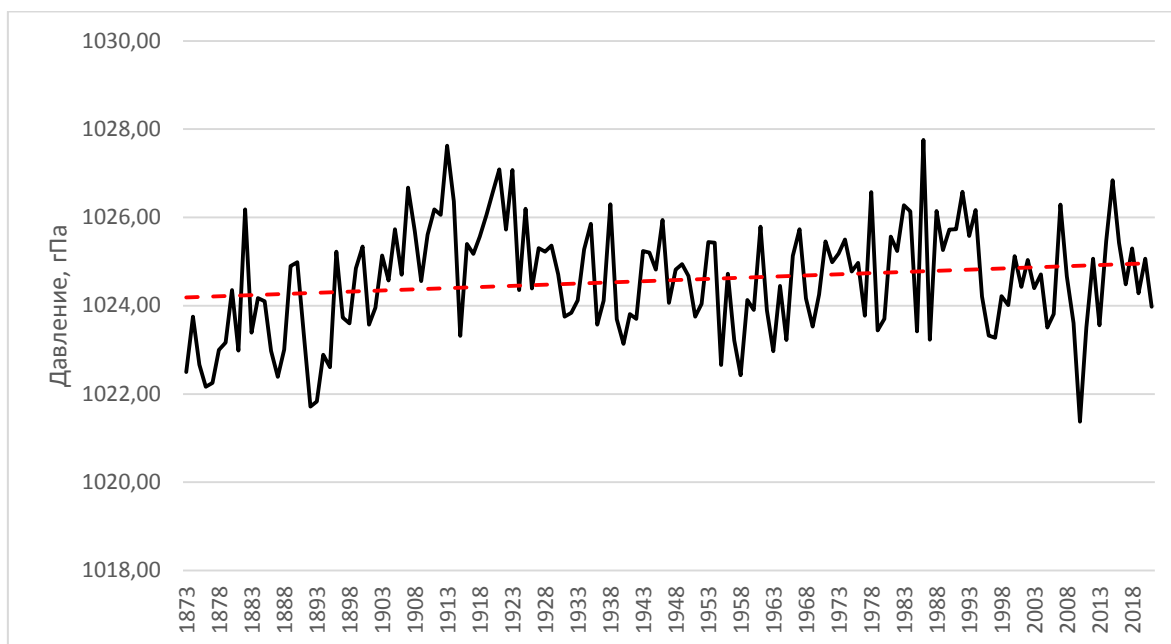


Рисунок 4.23 – Изменение давления в центре Азорского антициклона

Тренд не значим.

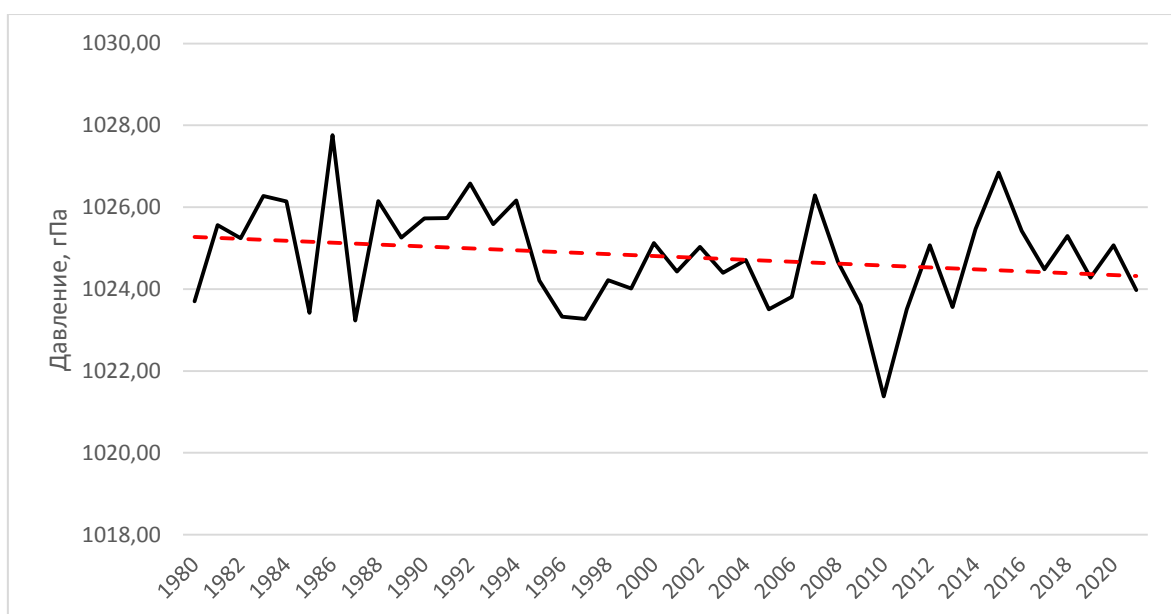


Рисунок 4.24 – Изменение давления в центре Азорского антициклона после 1980-го года

Проверка линейных трендов давления на значимость методом Фишера показала, что ни в одном из рассматриваемых временных отрезков нет значимого линейного тренда.

Алеутская депрессия

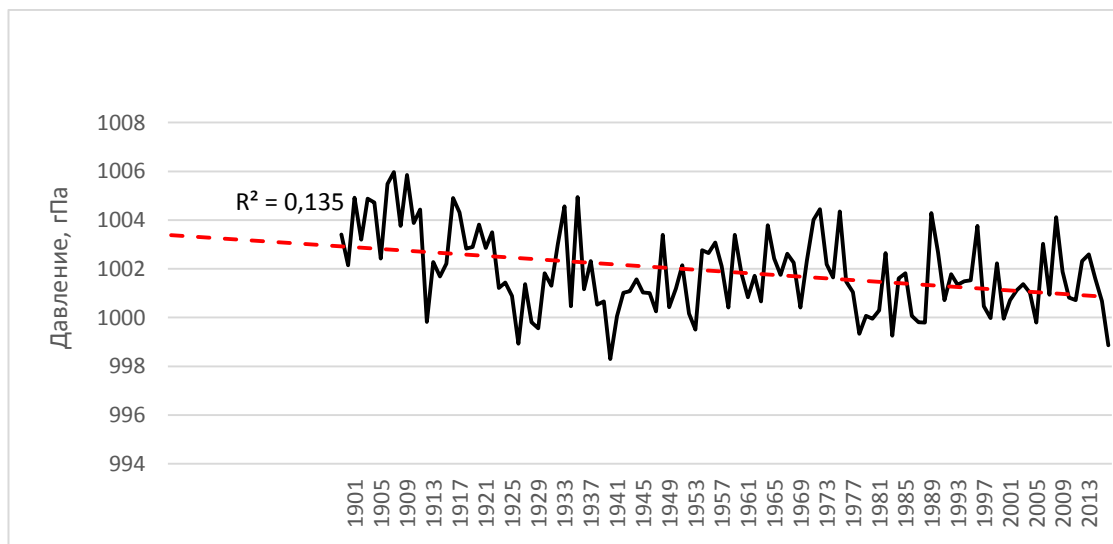


Рисунок 4.25 – Изменение давления в центре Алеутской депрессии

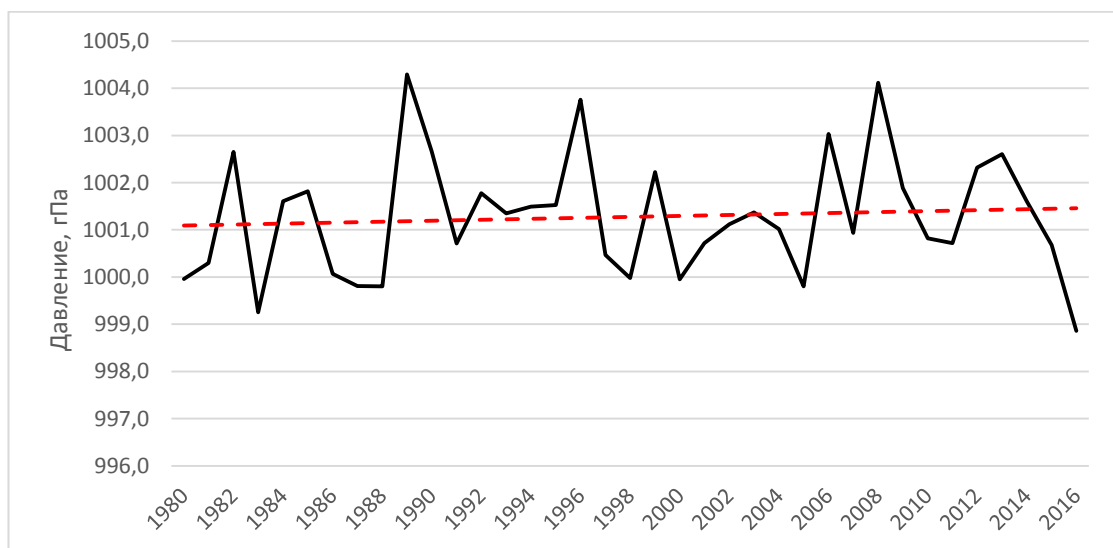


Рисунок 4.26 – Изменение давления в центре Алеутской депрессии после 1980-го года

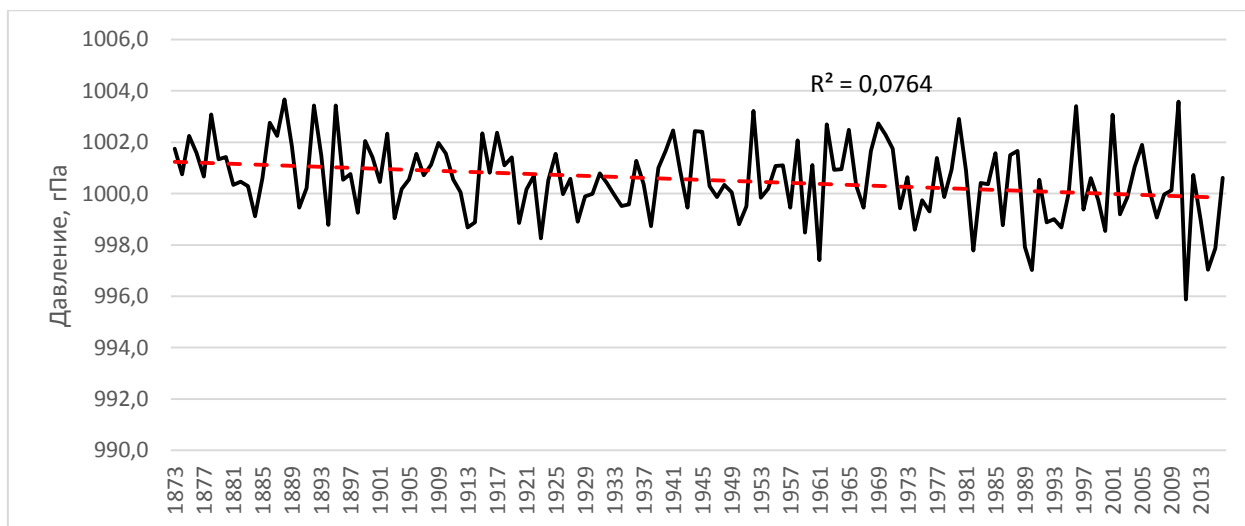


Рисунок 4.27 – Изменение давления в центре Исландской депрессии

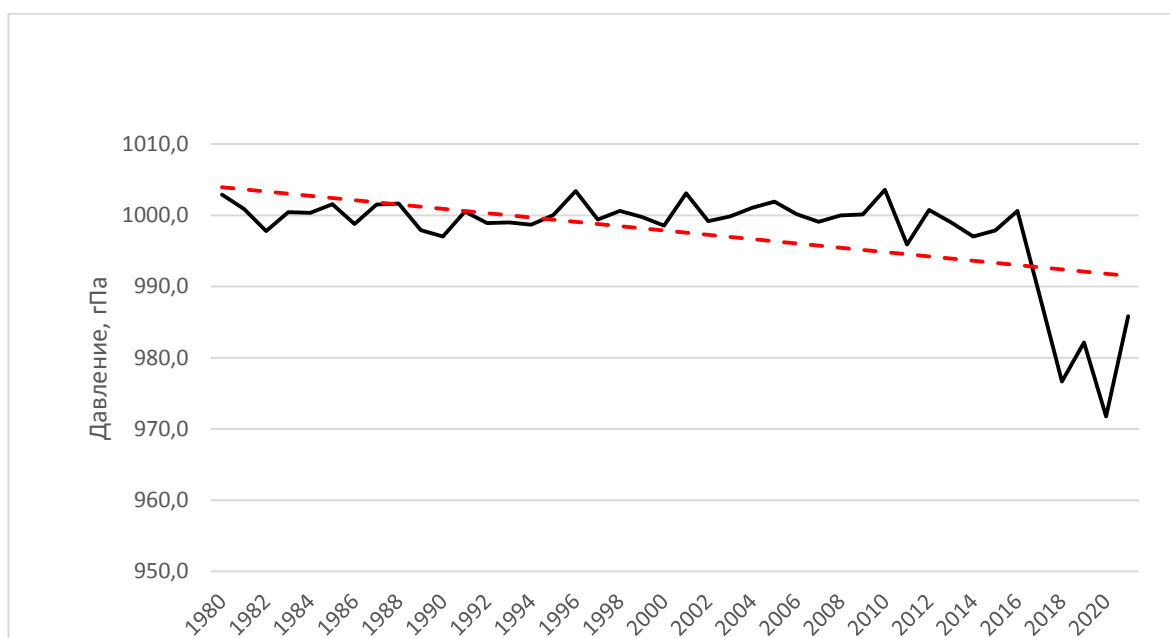
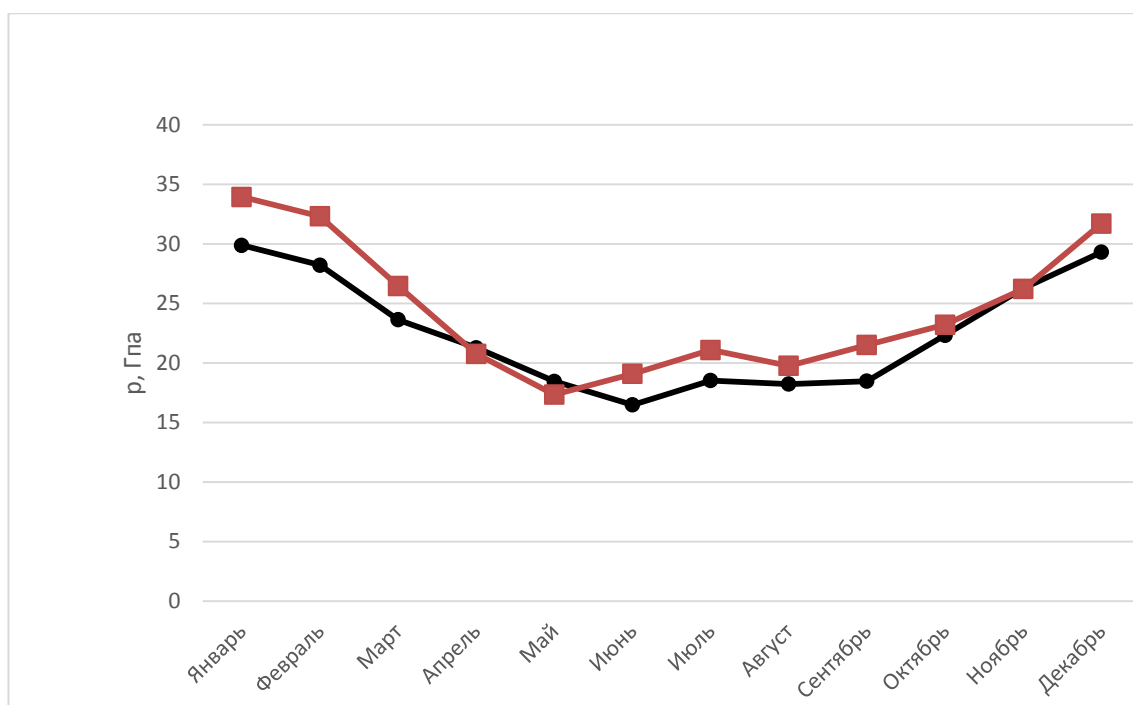


Рисунок 4.28 – Изменение давления в центре Исландской депрессии после 1980-го года

Тренды для всех приведенных выше графиков не значимы. На последнем графике в последние годы отмечено существенное снижение давления в центре Исландского циклона. Однако это требует дальнейшей проверки, так как изменения стали происходить в тот год, когда стала пополняться выборка. В дальнейшем следует обратить на это внимание.

Рассмотрим разность между центрами в давлении.



Разность между давлением в Гавайском максимуме и Алеутской депрессии



Разность между давлением в Азорском максимуме и Исландской депрессии

Рисунок 4.29 – Разность между давлениями в ЦДА

Из графиков, представленных выше видно, что динамика изменения давления в ЦДА сходная. Наибольшая разница наблюдается в зимнее время, с декабря по февраль. Однако видно, что разность в Северо-Атлантическом центре выше, то говорит о том, что интенсивность переноса в Атлантике будет выше, нежели в Тихоокеанском секторе. Кроме того, из представленных ранее графиков расположения по широте и долготе видно, что Тихоокеанские центры отстоят друг от друга дальше. Это также говорит о более слабом зональном переносе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были получены навыки работы сdo, закреплены навыки работы с MS Excel и Fortran.

Изучение центров действия атмосферы может стать перспективным направлением для дальнейших исследований, ведь климатические изменения связаны с изменением циркуляции, положения ВФЗ и т.п. Алеутская Исландская депрессии, а также Гавайский и Азорский максимум определяют динамику переноса атмосферы. Исландский циклон и Азорский антициклон в Северо-Атлантическом секторе, а Гавайский антициклон и Алеутская депрессия – в Тихоокеанском.

По итогам работы можно сделать следующие выводы:

- Из сходного можно отметить, что оба центра активны в зимнее время, с декабря по февраль. Интенсивность западного переноса в северной Атлантике выше, чем в Тихом океане, это обусловлено большей разницей между центрами и более близким расположением самих ЦДА друг относительно друга. В сравнении с Исландским циклоном Алеутский располагается южнее, при этом Азорский антициклон располагается в среднем южнее Гавайского. Самое западное положение Алеутской депрессии наблюдается в зимний период, а Исландской летом, самое западное положение обоих антициклонов в летнее время.
- Значимых тенденций в изменении широт, долгот и давления при анализе линейного тренда не отмечено ни в одном из центров, после 80-го года в том числе.
- Вейвлет-преобразование позволило выявить, что в Северо-Атлантическом центре после 2010-х годов усилились высокочастотные гармоники давления с периодом около 2-4 лет.

- В колебаниях по широтам заметные изменения наблюдаются тоже только у Атлантического центра. Так, у Исландского циклона в 2010-х годах усилились гармоника с периодом 2-4 года, которые также преобладали в 80-х годах прошлого столетия с той лишь разницей, что в 80-е доминировала еще 11-летняя гармоника, но и сейчас она также усиливается, хотя и не достигла такой же проявленности. В изменениях долгот всех центров какой-либо динамики не выявлено. Хотя если сравнивать центры друг с другом, то для Атлантических центров более характерна бОльшая изменчивость по широте, а для Тихоокеанских по долготе. То есть можно заключить, что в Тихоокеанском секторе в ближайшие годы ничего не поменяется, а в Атлантическом изменчивость по широтам станет еще больше. В принципе такая динамика может быть и с точки зрения физической географии. Атлантика вытянута в меридиональном направлении, а значит центрам есть, куда «отойти», Тихий же океан гораздо шире и обладает большим зональным направлением.

- Колебания в Исландском центре по широте означают еще один важный вывод – непостоянство высотной фронтальной зоны. Это значит, что колебания ее в широтном направлении станут более частыми, а потому район, например, Санкт-Петербурга будет оказываться то в Арктической, то в Полярной воздушной массе.

В качестве планов для дальнейших исследований можно отметить изучения влияние колебаний друг на друга: Южного колебания, Арктической осцилляции и т.п. Так как атмосфера в принципе является колебательной системой такой подход может быть интересным. Также в задачи для дальнейшей работы можно выделить обновление базы «Характеристик атмосферы», так как возможности моделирования растут, сейчас уже есть

доступ к данным более высокого разрешения, которые достаточно адекватно воспроизводят приземное давление. Разрешение в 5 градусов может быть улучшено. Кроме того, следует отметить, что надо уделить бОльшее внимание связи океана и атмосферы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ulbrich, U. Changing Northern Hemisphere Storm Tracks in an Ensemble of IPCC Climate Change Simulations / Ulbrich U., Pinto J.G., Kupfer H., Leckebusch G.C., Spanghel T., Reyers M. // Journal of Climate, Vol. 21(8). – 2008. -P. 1669-1679. - DOI: 10.1175/2007JCLI 19921.
2. World Meteorological Organization. "Center of action". Eumetcal. Archived from the original on 2016-03-03. Retrieved February 27, 2016.
3. World Meteorological Organization. "Semi-permanent anticyclone". Eumetcal. Archived from the original on October 15, 2013. Retrieved February 27, 2016.
4. Электронный источник. Режим доступа : <http://seakc.meteoinfo.ru/training/volatility>
5. World Meteorological Organization. "Semi-permanent depression". Eumetcal. Archived from the original on 2016-03-03. Retrieved February 27, 2016.
6. 5. Barnston, A. G., and R. E. Livezey, 1987: Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. Mon. Wea. Rev., 115, 1083-1126
7. 6. Latif, M., and Harnett, T.P., 1996. Decadal climate variability over the North Pacific and North America: dynamics and predictability. Journal of Climate, 9: 2407–2423.
8. Leathers, D.J., Yarnal, B., and Palecki, M.A., 1991. The Pacific/North American teleconnection pattern and United States Climate. Part I: Regional temperature and precipitation associations. Journal of Climate, 4: 517–528.
9. Rogers, J.C., 1984. The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the northern hemisphere. Monthly Weather Review, 112: 1999–2051.

10. Thompson, David W. J.; John Michael Wallace (1998). "The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields". *Geophysical Research Letters*. 25 (9): 1297–1300.
11. Maarten H. P. Ambaum, Brian J. Hoskins, and David B. Stephenson. Arctic Oscillation or North Atlantic Oscillation? – 2001. Режим доступа: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<3495:AOONAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<3495:AOONAO>2.0.CO;2)
12. Hansen, James; Reto Ruedy; Makiko Sato; Ken Lo (2009). If It's That Warm, How Come It's So Damned Cold? Retrieved. // *J. Geophys. Res.*, – 2013.
13. Lorenz, Edward N. (1951). "SEASONAL AND IRREGULAR VARIATIONS OF THE NORTHERN HEMISPHERE SEA-LEVEL PRESSURE PROFILE". *Journal of Meteorology*. 8 (1): P. 52–59
14. Электронный ресурс. Режим доступа :<https://rda.ucar.edu>
15. Электронный ресурс. Режим доступа :
http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-503175032.pdf