



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 «Взаимодействие стратосферы и тропосферы в условиях высокой
солнечной активности и положительной СКМ»

Исполнитель Крачковская Юлия Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физ.-мат. наук
(ученая степень, ученое звание)

Ермакова Татьяна Сергеевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 25 » мая 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА СТРАТОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ	5
1.1 Общее определение солнечного излучения	5
1.2 Влияние солнечной радиации на климатические процессы	6
1.3 Общая циркуляция атмосферы	8
1.4 Динамическая связь между стратосферой и тропосферой	9
2. ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ СКМ НА СТРАТОСФЕРУ И ТРОПОСФЕРУ	11
2.1 Северная кольцевая мода	11
2.2 Североатлантическое колебание	13
2.3 Взаимосвязь между Северной Кольцевой Модой и Североатлантическим колебанием	14
3. ВОЛНОВАЯ АКТИВНОСТЬ	15
3.1 Определение волновой активности	15
3.2 Что показывает анализ волновой активности в атмосфере ?	16
3.3 Взаимосвязь волновой активности с стратосферой и тропосферой	17
4. ТРОПОПАУЗА И ЕЕ СВОЙСТВА	18
4.1 Общее описание тропопаузы	18
4.2 Взаимосвязь между потоком солнечной активности и тропопаузой	19
4.3 Меняется ли состояние тропопаузы при высокой или низкой солнечной активности?	20
5. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХМЕРНЫХ ПОТОКОВ ВОЛНОВОЙ АКТИВНОСТИ	22
5.1 Трехмерный поток волновой активности	22
5.2 Метод анализа планетарных волн	23
5.3 Планетарные волны в ионосфере	24
5.4 Архив данных реанализа MERRA-2	26
6. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ ПО ПОСТАВЛЕННЫМ ЗАДАЧАМ	28
6.1 Распределение амплитуды планетарной волны в поле геопотенциальной высоты	28
6.2 Расчет и построение компонент F_z и F_y потока волновой активности на разных высотах	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	59

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире динамика атмосферы привлекает все больше внимания исследователей, особенно в контексте взаимодействия между стратосферой и тропосферой. Этот процесс оказывает существенное влияние на климатические условия и атмосферные явления. В рамках данной работы рассматривается взаимодействие этих двух слоев атмосферы в условиях высокой солнечной активности и положительной стратосферной климатической моды (СКМ).

Согласно исследованиям, взаимодействие стратосферы и тропосферы играет ключевую роль в формировании атмосферных процессов. Изменения в одном из этих слоев могут вызывать каскад эффектов, влияющих на климатические условия на поверхности Земли. В контексте глобальных изменений климата понимание этих взаимосвязей становится необходимым для прогнозирования и адаптации.

Цель: проведение комплексного анализа взаимодействия стратосферы и тропосферы в условиях высокой солнечной активности и положительной СКМ. Для достижения этой цели будут рассмотрены основные теории, проведен обзор современных исследований, и выполнен анализ данных, полученных с использованием различных методов наблюдения и моделирования.

Задачи:

1. Проанализировать распределение амплитуды планетарной волны в поле геопотенциальной высоты в условиях высокой и низкой солнечной активности и положительной фазе СКМ
2. Рассчитать и построить компоненты F_z и F_y потока волновой активности по рассматриваемым годам за выбранные месяца наблюдений
3. Изучить динамические процессы, протекающие на различных высотах атмосферы Земли, и их взаимодействия в условиях низкой/высокой солнечной активности в положительной фазе СКМ

Исходными материалами для работы послужили:

1. Индекс $f_{10.7}$ (Индекс солнечного потока) — это мера микроволнового солнечного излучения на длине волны 10,7 см или 2800 МГц. Он широко используется в моделях термосферы и ионосферы как индикатор солнечной активности и регистрируется только в одной наземной обсерватории в Канаде, в светлое время суток
2. Индекс СКМ – это индекс Североатлантического колебания, один из ведущих методов изменчивости климата в Северном полушарии.
3. Архив данных реанализа MERRA-2 (геопотенциальная высота, горизонтальные компоненты ветра, температура воздуха)

Моя выпускная квалификационная Магистерская диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников.

В первой главе представлена теоретическая часть, которая описывает такие понятия, как солнечное излучение и общая циркуляция атмосферы. Во второй главе идет описание Северной кольцевой моды и ее взаимосвязь с тропосферой и стратосферой. И так же объясняется взаимосвязь между солнечным циклом и североатлантическим колебанием. Третья глава посвящена анализу волновой активности. Четвертая глава про различные взаимосвязи в атмосфере. Пятая глава описанию параметров, которые я использовала в работе. Их характеристики, разновидности и плюсы/минусы применения. В шестой главе представлена моя практическая работа и пошаговое описание действий.

1. ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА СТРАТОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

1.1 Общее определение солнечного излучения

Солнечное излучение относится к энергии, производимой Солнцем, часть которой достигает Земли. Это основной источник энергии для большинства процессов в атмосфере, гидросфере и биосфере.

Солнечное излучение, часто называемое солнечным ресурсом или просто солнечным светом, представляет собой общий термин для обозначения электромагнитного излучения, излучаемого Солнцем. Солнечное излучение можно улавливать и превращать в полезные формы энергии, такие как тепло и электричество, используя различные технологии.

Когда солнечный свет проходит через атмосферу, некоторая его часть поглощается, рассеивается и отражается: Молекулы воздуха, водяной пар, облака, пыль, загрязнители, лесной пожар, вулканы.

Это называется рассеянным солнечным излучением.

Солнечное излучение, достигающее поверхности Земли без рассеяния, называется прямым солнечным излучением. Сумма рассеянной и прямой солнечной радиации называется глобальной солнечной радиацией. Атмосферные условия могут снизить прямое излучение лучей на 10% в ясные и сухие дни и на 100% в пасмурные дни. [1]

1.2 Влияние солнечной радиации на климатические процессы

Энергия Солнца в виде электромагнитного излучения является фундаментальной движущей силой климатической системы Земли. Изменения в частотном составе и интенсивности падающего на Землю солнечного излучения могут привести к изменениям как глобального, так и регионального климата, которые отличаются от изменений, вызванных деятельностью человека, и дополняют их. Следует учитывать два основных источника вариаций. Во-первых, существуют внутренние звездные процессы, которые влияют на общую лучистую энергию, излучаемую Солнцем, — т. е. на то, что мы будем называть «солнечной энергией». Во-вторых, изменения орбиты Земли вокруг Солнца на протяжении десятков и сотен тысяч лет напрямую влияют на количество лучистой энергии, попадающей на Землю, и ее распределение по земному шару.

Понимание роли изменчивости солнечной активности имеет важное значение для интерпретации климата прошлого и прогнозирования будущего. В прошлом, хотя о взаимосвязи между количеством солнечных пятен и погодой было написано много, метеорологи часто игнорировали тему влияния Солнца на климат. Это произошло из-за комбинации факторов, наиболее важным из которых было отсутствие каких-либо надежных измерений, указывающих на то, что уровень солнечной радиации на Земле действительно менялся. Также существовало недоверие к статистической достоверности многих предполагаемых доказательств и, что немаловажно, отсутствие установленных научных механизмов, посредством которых видимые изменения солнечной активности могли бы вызывать обнаруживаемые сигналы вблизи поверхности Земли.

Основное влияние солнечной радиации на климатические процессы проявляется через ее нагревательный эффект и воздействие на атмосферные и океанические циркуляции. Вот основные аспекты этого влияния:

1.Нагревание атмосферы и поверхности Земли: Солнечная радиация является главным источником энергии для Земли. При попадании на поверхность она преобразуется в тепловую энергию, что приводит к нагреванию атмосферы и поверхности планеты. Этот нагрев способствует формированию различных климатических условий, таких как циркуляция воздуха, образование облаков и осадков.

2.Изменение климатических зон: Неравномерное распределение солнечной радиации по поверхности Земли вызывает различия в температурных режимах и климатических зонах. Это приводит к формированию разнообразных климатических условий, от жарких тропиков до холодных полюсов.

3.Стимуляция атмосферных циркуляций: Солнечная радиация является движущей силой атмосферных циркуляций. Ее нагревательный эффект вызывает перемещение воздуха и формирование ветровых систем, таких как пассаты, муссоны и западные ветры. Это также влияет на образование атмосферных фронтов и циклонов.

4.Формирование океанических течений: Солнечная радиация также влияет на океанические циркуляции путем нагревания верхних слоев воды и вызывания конвекции. Это способствует формированию океанических течений, таких как Гольфстрим и Перуанское течение, которые в свою очередь влияют на климатические условия на суше.

5.Воздействие на метеорологические явления: Солнечная радиация также играет важную роль в формировании метеорологических явлений, таких как циклоны, антициклоны, мезомасштабные возмущения и атмосферные волны, что влияет на погоду и климат в различных регионах мира.[13]

1.3 Общая циркуляция атмосферы

Общая циркуляция атмосферы (ОЦА) представляет собой составную часть климатической системы атмосфера – океан – деятельный слой суши (АОС) и является, наряду с тепло- и влагооборотом, одним из основных климатообразующих факторов.

Под крупными масштабами понимают характерные размеры для тропосферы, стратосферы и мезосферы в целом, материков и океанов; порядка тысяч километров, охватывающих планетарный масштаб (зональные переносы, струйные течения и длинные волны) и синоптический (циклоны и антициклоны) (Погосян, 1972). Основное свойство таких процессов (макропроцессов) заключается в квазигеографичности движений: ускорения Кориолиса значительно превышает относительное ускорение. В работе (Монин, 1982) крупномасштабные компоненты ОЦА определяются как пространственные неоднородности глобальных полей, описывающих состояние атмосферы с масштабами много больше эффективной толщины атмосферы.

Изучение глобальной циркуляции может быть качественное и количественное. Качественное изучение дает объяснение главных причин обнаруженных особенностей наблюдаемой циркуляции в основных синоптических понятиях (воздушные массы, фронты, струйные течения) (Пальмен, Ньютон, 1973). Количественное исследование проводится на основе строгого решения системы физически обоснованных уравнений. Для количественного анализа атмосферной циркуляции используются физические величины, с помощью которых выражаются основные законы сохранения момента импульса, массы и энергии. Эти величины в качестве зависимых переменных содержатся в известных системах уравнений гидротермодинамики и могут использоваться в самых разных комбинациях: ветер, температура, давление, влажность; ежедневные синоптические карты со всей синоптической

информацией, дополненные средними картами и разрезами полей давления и ветра, или же производные от этих переменных – как энтропия и завихренность, зональные и вихревые составляющие кинетической и доступной потенциальной форм энергии, меридиональные переносы тепла и влаги и т.д. (Муравьев, 2006).

Основные свойства, характерные для процессов ОЦА, располагаются в порядке осредненных по независимым переменным, начиная с зонально осредненных величин. В первой группе – свойства, наиболее полно отражающиеся при осреднении по времени и долготе. Это дает представление о зональных циркуляциях, типа западного переноса и пассатов. Вторая группа содержит свойства, сохраняющиеся при осреднении только по времени. Это позволяет выделить такие явления, как муссонные циркуляции, Исландский и Алеутский минимумы зимой. Третья группа формируется из осреднений только по долготе, что дает информацию о таких явлениях, как колебания индекса зональности, восточные ветры в полярных областях, квазидвухлетняя цикличность ветра в тропиках. Четвертая группа выделяется только синоптическим масштабом – никаких осреднений не производится, благодаря чему можно анализировать такие синоптические феномены, как мигрирующие вихри, ложбины и гребни на высотах, главные фронты, внутритропическую зону конвергенции (ВЗК), тропопаузу, струйные течения.[8]

1.4 Динамическая связь между стратосферой и тропосферой

Термин “сопряжение” предполагает взаимодействие между независимыми компонентами, и поэтому возникает вопрос о том, оправдано ли в первую очередь удобное разделение атмосферы на слои.

Ключевое динамическое различие между тропосферой и стратосферой заключается в различиях в их стратификации и в том факте, что большинство процессов (например, конвекция влаги и скрытый перенос тепла) происходят

только в тропосфере. Однако разделение между слоями частично носит исторический характер, эволюционируя в реакция на развитие методов прогнозирования погоды и доступность вычислительных ресурсов.

Погодные системы средних широт связаны с крупномасштабными волнами Россби, которые обязаны своим существованием градиентам вращения или завихренности атмосферы по вертикали из-за изменения угла между плоскостью поверхности и осью вращения в зависимости от широты. Новаторские работы Чарни и Дразина (1961) и Мацуно (1970) показали, что преобладающие в тропосфере волны, содержащие энергию, с волновым числом примерно 4-8, так называемые синоптические масштабы, не могут эффективно распространяться в стратосферу из-за наличия восточных ветров в летнем полушарии и сильных западных ветровых волн. Таким образом, для целей прогнозирования погоды стратосферу можно было бы в значительной степени рассматривать как верхнее граничное условие. Таким образом, в моделях стратосфера была описана максимально экономно, чтобы сосредоточить численные ресурсы на тропосфере. Сильные ветры в зимней стратосфере также накладывают более строгие условия Курана-Фридрихса-Леви на временной шаг модели, хотя более совершенные численные методы облегчили эту проблему.

Несмотря на динамическое разделение волн в масштабе метеорологической системы, волны большего масштаба Волны Россби (волновые числа 1-3, называемые планетарными масштабами) могут проникать в зимнюю стратосферу, обеспечивая обмен импульсами между слоями. Кроме того, гравитационные волны меньшего масштаба (порядка 10-1000 км) также переносят импульс между слоями.

Стратосфера оказывает более заметное влияние на межсезонные временные рамки из-за более длительных временных масштабов изменчивости. Однако повышение предсказуемости является условным и зависит от состояния стратосферы. При нормальных условиях зимняя стратосфера в полярных регионах

очень холодная, что связано с сильным западным воздушным потоком или стратосферным полярным вихрем. Как впервые было замечено в 1950-х годах (Шерхаг, 1952), этот сильный вихрь иногда нарушается планетарной волновой активностью, распространяющейся снизу, что приводит к значительным изменениям температуры (до 70 градусов по Цельсию в течение нескольких дней) и изменению западного направления.

Болдуин и Данкертона (Baldwin and Dunkerton, 2001) продемонстрировали влияние этих изменений на тропосферу, показав, что за резким потеплением стратосферы следует смещение струйного течения в тропосфере к экватору и связанное с этим штормовое движение. Аномально холодная стратосфера, наоборот, связана со смещением струйного течения к полюсу, хотя возникновение холодных вихрей происходит не так резко. Что еще более важно, изменения в тропосфере длятся до 2-3 месяцев в медленном масштабе времени восстановления стратосферы, в то время как при нормальных условиях тропосфера имеет хаотический характер. Связанные с этим изменения в стратосферном струйном течении и смещении тропосферных струй удобно описываются Северным кольцевым.[11]

2. ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ СКМ НА СТРАТОСФЕРУ И ТРОПОСФЕРУ

2.1 Северная кольцевая мода

Положительная Северная Кольцевая Мода (СКМ) — это климатическое явление, связанное с изменениями в циркуляции атмосферы и океанов в северном полушарии. Эта мода характеризуется аномалиями атмосферного давления и циркуляции, влияющими на температуры и погодные условия.

Стратосфера:

В условиях положительной СКМ могут происходить изменения в циркуляции в стратосфере. Эти изменения могут включать усиление зональных ветров (восточных ветров) в средних и высоких широтах.

Повышение зональных ветров в стратосфере может воздействовать на распределение озона, и в некоторых случаях, приводить к изменениям в атмосферной химии и температуре.

Тропосфера:

Положительная СКМ может влиять на циркуляцию в тропосфере. Например, она может вызвать изменения в паттернах ветра, особенно в зимний период.

Эти изменения в циркуляции могут сказываться на температурных условиях в различных регионах, а также на распределении атмосферного давления.

Погодные условия:

Положительная СКМ может оказывать влияние на погодные условия в северном полушарии. В зимний период это может быть связано с повышением температур в некоторых регионах и изменениями в атмосферных фронтах.

Возможны также последствия для распределения снега и ледяного покрова, что, в свою очередь, может воздействовать на погодные условия в близлежащих областях.

Важно отметить, что эффекты положительной СКМ неоднозначны и могут различаться в зависимости от сезона, географического положения и других факторов. Кроме того, влияние СКМ взаимодействует с другими климатическими явлениями, такими как Эль-Ниньо/Ла-Нинья и может иметь комплексные последствия. [2]

2.2 Североатлантическое колебание

Индекс Североатлантического колебания (САК) основан на разнице давления на уровне поверхности моря между субтропическим (Азорские острова) высоким и субполярным низким. Положительная фаза САК отражает значения высот и давления ниже нормы в высоких широтах Северной Атлантики и выше нормы в центральной части Северной Атлантики, на востоке Соединенных Штатов и в Западной Европе. Отрицательная фаза отражает противоположную картину аномалий высоты и давления в этих регионах. Обе фазы САК связаны с изменениями интенсивности и местоположения североатлантического струйного течения и тропы штормов в масштабах всего бассейна, а также с крупномасштабными изменениями нормальных зональных и меридиональных режимов переноса тепла и влаги, что, в свою очередь, приводит к изменениям температуры и характера осадков, часто распространяющимся от восточной части Северной Америки до Западной и Центральной Европы.

Сильные положительные фазы САК, как правило, связаны с температурами выше нормы на востоке Соединенных Штатов и по всей Северной Европе и температурами ниже нормы в Гренландии и часто по всей Южной Европе и на Ближнем Востоке. Они также связаны с количеством осадков, превышающим норму в Северной Европе и Скандинавии, и количеством осадков, превышающим норму в Южной и Центральной Европе. Во время сильных отрицательных фаз САК обычно наблюдаются противоположные температурные и атмосферные аномалии. В особо продолжительные периоды, когда преобладает одна конкретная фаза САК, аномальные высоты и температурные режимы также часто наблюдаются на территории Центральной России и северо-центральной Сибири. САК демонстрирует значительную межсезонную и межгодовую изменчивость, и часто наблюдаются длительные периоды (несколько месяцев) как положительных, так и отрицательных изменений. Индекс САК рассчитывается путем

проецирования характера нагрузки САК на дневную аномалию высотой 500 миллибар в диапазоне 0-90° северной широты.[12]

2.3 Взаимосвязь между Северной Кольцевой Модой и Североатлантическим колебанием

Северная Кольцевая Мода (СКМ) и Североатлантическое колебание (САК) - это два ключевых климатических индекса, связанных с атмосферными явлениями в северном полушарии. Взаимосвязь между ними довольно сложна и может варьироваться в зависимости от времени года и конкретных метеорологических условий.

Одним из способов понимания связи между СКМ и САК является то, что САК часто интерпретируется как индекс, описывающий осцилляции в атмосферном давлении между Азорскими островами и Исландией. В то время как СКМ - это аналогичный индекс, который описывает изменения в атмосферном давлении в более обширной области, включая и Арктику.

Исследования показывают, что СКМ и САК имеют тесную связь, особенно в зимний период. Оба индекса могут варьировать синхронно и часто используются для объяснения климатических аномалий и погодных условий в Европе, Северной Америке и других регионах.

Влияние САК на СКМ и наоборот может быть связано с изменениями в атмосферном циркуляционном режиме, температурных аномалиях в регионах Атлантики и Арктики, а также влиянием на формирование стихийных явлений, таких как ураганы, циклоны и другие метеорологические события.

Кроме того, исследования также показывают, что сильные положительные или отрицательные фазы САК могут стимулировать или усиливать отклонения в

СКМ и наоборот, что приводит к дополнительным климатическим эффектам и погодным условиям в северном полушарии.

Как правило, при анализе климатических условий и погоды учитываются как САК, так и СКМ, чтобы лучше понять и прогнозировать изменения в атмосферном циркуляционном режиме и их влияние на погоду в соответствующих регионах.[14]

3. ВОЛНОВАЯ АКТИВНОСТЬ

3.1 Определение волновой активности

В контексте солнечной физики, волновая активность означает колебания или волны, которые возникают в различных слоях Солнца. Эти волны могут иметь различные происхождения, такие как акустические (звуковые) волны, магнитные волны и гравитационные волны. Перенос горизонтальной компоненты через солнечную волновую активность может отражать влияние этих волн на газовые и магнитные структуры в солнечной атмосфере.

Процессы переноса горизонтальной компоненты в солнечной атмосфере могут включать следующее:

1.Магнитные волны: В магнитно-активных областях Солнца могут возникать магнитные волны, такие как магнитоакустические волны, которые могут воздействовать на горизонтальное движение газов и магнитных полей в солнечной атмосфере.

2.Акустические волны: Акустические волны, или звуковые волны, могут также распространяться в солнечной атмосфере. Они создают давление и компрессии, которые могут вызывать горизонтальные движения газов.

3.Гравитационные волны: Гравитационные волны, вызванные изменениями гравитационного поля, также могут влиять на горизонтальные компоненты в атмосфере Солнца.

Изучение этой волновой активности помогает ученым понимать внутреннюю структуру Солнца, его атмосферу и магнитные поля. Исследования волновой активности проводятся с использованием наземных и космических обсерваторий, таких как солнечные телескопы и спутники.[3]

3.2 Что показывает анализ волновой активности в атмосфере ?

Анализ волновой активности в атмосфере может предоставить ценную информацию о различных аспектах атмосферных процессов. Вот несколько ключевых аспектов, которые можно изучать с помощью анализа волновой активности:

1.Структура атмосферы: Акустические волны могут использоваться для зондирования вертикальной структуры атмосферы. Измерение времени, требуемого для распространения звуковых волн в различных слоях атмосферы, может дать информацию о температуре, давлении и составе атмосферы на различных высотах.

2.Вертикальное движение воздуха: Волновая активность может указывать на вертикальные движения воздуха. Например, гравитационные волны могут возникнуть из-за вертикальных перемещений воздуха в результате нагрева или охлаждения.

3.Динамика атмосферных явлений: Анализ волновой активности позволяет изучать динамику атмосферных явлений, таких как циклоны, антициклоны и внутренние волны. Это важно для понимания погодных процессов и климатических изменений.

4.Распространение звука и связанных волн: Изучение акустических волн может быть полезным для анализа распространения звука в атмосфере и связанных с этим эффектов, таких как атмосферные лучи звука.

5.Влияние на космические условия: Магнитные и электрические волны в атмосфере также могут быть связаны с солнечной активностью и воздействовать на ионосферу и условия распространения радиоволн.[4]

3.3 Взаимосвязь волновой активности с стратосферой и тропосферой

Волновая активность играет важную роль в воздушных слоях атмосферы, включая тропосферу и стратосферу.

1.Внутренние волны и тропосфера: В тропосфере, самом нижнем слое атмосферы, различные виды волновой активности, такие как гравитационные волны и волны Кельвина, могут возникать из-за вертикальных движений воздуха, например, вызванных нагревом от поверхности Земли. Гравитационные волны, порожденные атмосферными фронтами или рельефом поверхности, могут воздействовать на структуру облаков, вертикальные перемещения воздуха и температурные градиенты.

2.Реакция стратосферы на тропосферные волны: Волны из тропосферы могут проникать в стратосферу. Это особенно ярко проявляется в случае сильных бурь, таких как циклоны и антициклоны, которые могут генерировать мощные внутренние волны. Эти волны могут влиять на динамику стратосферы, включая циркуляцию и распределение озона.

3.Стратосферные волны и климат: Стратосфера также может содержать свои собственные типы волн, такие как волны планетарного масштаба. Эти волны могут быть связаны с динамикой озона в стратосфере и могут оказывать влияние на климат в средних и высоких широтах.

4. Взаимодействие солнечной активности: Изменения в солнечной активности могут вызывать изменения в тропосфере, влияя на атмосферное давление и температурные структуры. Эти изменения могут в свою очередь распространяться в стратосферу.

Исследования волновой активности в этих атмосферных слоях помогают лучше понять динамику атмосферы в целом, в том числе её влияние на климат и прогнозирование погоды. Спутники, радиозонды и другие средства мониторинга используются для изучения этих процессов. [5]

4. ТРОПОПАУЗА И ЕЕ СВОЙСТВА

4.1 Общее описание тропопаузы

Тропопауза - это граница между тропосферой и стратосферой в атмосфере Земли. Она является одним из ключевых уровней атмосферы и играет важную роль в различных атмосферных процессах. Вот несколько основных характеристик и свойств тропопаузы:

1. Граница между тропосферой и стратосферой: Тропосфера - это нижний слой атмосферы, простирающийся от поверхности Земли до примерно 8-15 километров в экваториальных областях и до 8-10 километров в средних широтах. Верхний предел тропосферы называется тропопаузой. Тропосфера характеризуется уменьшением температуры с высотой.

2. Свойства тропопаузы: В тропопаузе температурный градиент изменяется от негативного в тропосфере к почти нулевому или положительному в стратосфере. Это является ключевым отличием между тропосферой и стратосферой. Тропопауза также характеризуется изменениями в градиентах

влажности, и она может представлять собой барьер для вертикального перемешивания водяного пара.

3.Роль в атмосферных явлениях: Тропопауза служит барьером для вертикального перемешивания воздуха между тропосферой и стратосферой. Это ограничение важно для поддержания структуры и свойств двух этих слоев. Тропопауза также играет важную роль в циркуляции озона. Здесь происходит основная часть переноса озона из тропосферы в стратосферу.

4.Тропопауза и климатические изменения: Изменения в тропопаузе могут быть связаны с изменениями климата, и исследования этой области помогают понять влияние человеческих деятельности на атмосферу.

Изучение тропопаузы и её свойств важно для понимания атмосферных процессов, воздействующих на климат, и оказывающих влияние на погодные условия. Такие измерения проводятся с использованием атмосферных зондов, спутников и других инструментов наблюдения. [6]

4.2 Взаимосвязь между потоком солнечной активности и тропопаузой

Взаимосвязь между потоком солнечной активности и тропопаузой является сложной и включает в себя ряд факторов. Поток солнечной активности оценивается по количеству солнечных пятен и других солнечных явлений, а также по вариациям в солнечном излучении.

Поток солнечной активности воздействует на температурные структуры атмосферы, в том числе на вертикальные градиенты температуры в тропосфере и стратосфере. В периоды с высокой солнечной активностью может наблюдаться некоторое увеличение температуры в стратосфере, что может оказать воздействие на тропопаузу.

Периоды повышенной солнечной активности могут влиять на циркуляцию в тропосфере, что, в свою очередь, может воздействовать на положение и структуру

тропопаузы. Некоторые исследования предполагают, что в периоды минимальной солнечной активности (солнечные минимумы) могут изменяться характеристики ветров в стратосфере и тропосфере.

Солнечное излучение является ключевым источником энергии, определяющим термодинамические процессы в атмосфере. Изменения в солнечной активности могут влиять на радиационный баланс тропосферы и стратосферы. Эти изменения в радиационном балансе могут влиять на вертикальные градиенты температуры и давления, что в конечном итоге может повлиять на тропопаузу.

Несмотря на это, прямая связь между потоком солнечной активности и тропопаузой не является прямой и однозначной. Воздействие солнечной активности на атмосферу Земли является сложным процессом, и эффекты могут быть модулированы другими атмосферными и климатическими факторами. Тем не менее, ученые продолжают исследовать эти взаимосвязи с использованием наблюдений и численных моделей атмосферы. [6]

4.3 Меняется ли состояние тропопаузы при высокой или низкой солнечной активности?

Факторы, влияющие на тропопаузу, могут изменяться в зависимости от уровня солнечной активности. Однако следует отметить, что эти изменения могут быть сложными и подвержены взаимодействию различных факторов в атмосфере. Далее описаны несколько аспектов, которые могут меняться при высокой или низкой солнечной активности.

Высокая солнечная активность может влиять на вертикальные температурные градиенты в атмосфере. В стратосфере это может проявиться в изменениях температуры вблизи тропопаузы. Некоторые исследования

предполагают, что в периоды солнечного минимума (низкая солнечная активность) могут наблюдаться изменения в температурной структуре атмосферы. Высокая солнечная активность может влиять на циркуляцию в стратосфере. Это может привести к изменениям в ветровых потоках и давлении вблизи тропопаузы. В периоды с низкой солнечной активностью могут наблюдаться более слабые влияния солнечного излучения на стратосферу.

Высокая солнечная активность влияет на радиационный баланс в атмосфере, в том числе на верхние слои тропосферы и стратосферы. Это может оказать воздействие на температуру и давление в области тропопаузы. Периоды низкой солнечной активности могут сопровождаться более мягкими изменениями в радиационном балансе. Солнечная активность может влиять на распределение и концентрацию озона в стратосфере. Изменения в озоновом слое могут, в свою очередь, оказывать воздействие на структуру и характеристики тропопаузы. Периоды низкой солнечной активности могут быть связаны с изменениями в распределении озона в стратосфере.

Эти взаимосвязи все еще являются предметом активных исследований, и точные механизмы и последствия изменений в солнечной активности для тропопаузы требуют дополнительного изучения. Современные атмосферные модели и обширные наблюдения позволяют ученым лучше понимать эти сложные взаимосвязи. [7]

5. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХМЕРНЫХ ПОТОКОВ ВОЛНОВОЙ АКТИВНОСТИ

5.1 Трехмерный поток волновой активности

В тропосфере доминируют волны синоптического масштаба с зональными волновыми числами $m = 4 - 8$, которые практически никакого влияния на стратосферу не оказывают. По этой причине еще в XX в. в прогностических моделях стратосфера описывалась очень «экономно», просто как верхняя граница динамической системы тропосферы. Однако волны планетарного масштаба (с волновыми числами $m = 1$ и 2) зимой могут проникнуть в стратосферу, что реализует обмен импульса между этими слоями новыми числами $m = 4 - 8$, которые практически никакого влияния на стратосферу не оказывают. По этой причине еще в XX в. в прогностических моделях стратосфера описывалась очень «экономно», просто как верхняя граница динамической системы тропосферы. Однако волны планетарного масштаба (с волновыми числами $m = 1$ и 2) зимой могут проникнуть в стратосферу, что реализует обмен импульса между этими слоями. Поэтому с увеличением мощности вычислительных машин в последние годы большое внимание уделяется изучению взаимосвязей тропосфера–стратосфера–тропосфера как возможного механизма, который может использоваться для улучшения предсказаний погодных условий у поверхности земли со значительной заблаговременностью.

Стратосфера, в отличие от тропосферы, в последние десятилетия испытывала существенное похолодание. Температура снизилась примерно на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ за промежуток времени 1958–2007 гг. Для более холодной стратосферы характерно усиление полярного вихря (ПВ), что, в свою очередь, связано с циркуляционными условиями тропосферы. Деформации ПВ (ослабление или обращение стратосферного струйного течения), которые сопровождаются

повышением температуры, являются последствием распространения стационарных планетарных волн большой амплитуды из тропосферы в стратосферу. Особенно это заметно зимой в Северном полушарии. Все изменения первоначального состояния стратосферы в дальнейшем влияют на условия распространения планетарных волн, в частности на местоположение их обрушения.

Когда меняется высота или положение обрушения волн, меняются атмосферные вертикальные движения, что влияет на структуру циркуляции Брюэра-Добсона вплоть до поверхности земли. Таким образом, приземный температурный градиент будет реагировать на любые изменения вертикального движения атмосферы. Еще в конце XX в. Baldwin and Dunkerton показали, что аномалии ПВ передаются вниз из стратосферы в тропосферу, и данный механизм можно описать с помощью понятия Северной кольцевой моды (СКМ). СКМ является первой эмпирической ортогональной функцией в разложении аномалий геопотенциальных высот на любой изобарической поверхности. У поверхности земли данную характеристику называют Арктическим колебанием. Во время слабого ПВ индекс СКМ бывает отрицательным, а положительный индекс отражает временные периоды с аномально сильным ПВ.[9]

5.2 Метод анализа планетарных волн

Для того, чтобы проанализировать распространение планетарных волн в атмосфере, их воздействие на зональную циркуляцию и дивергенцию потока в горизонтальной плоскости обычно рассматривают трехмерные потоки Элиассена-Палма и используют алгоритм Р.А. Пламба. Алгоритм Р.А. Пламба позволяет оценить направление распространения волнового пакета на трехмерной плоскости, что очень успешно применяется в изучении вертикального перехода волн между стратосферой и тропосферой. Трехмерный вектор потока волновой

активности описывает распространение планетарных волн вдоль долготы (F_x), широты (F_y), высоты (F_z):

$$\vec{F}_s = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \frac{P}{P_0} \cos \varphi \begin{pmatrix} v'^2 - \frac{1}{2a\Omega \sin 2\varphi} \frac{\partial(v' \phi')}{\partial \lambda} \\ -u' v' + \frac{1}{2a\Omega \sin 2\varphi} \frac{\partial(u' \phi')}{\partial \lambda} \\ \frac{2\Omega \sin \varphi}{S} \left[v' T' - \frac{1}{2a\Omega \sin 2\varphi} \frac{\partial(T' \phi')}{\partial \lambda} \right] \end{pmatrix}, \quad (5.1)$$

где p — давление; p_0 — давление, равное 1000 гПа; Ω — угловая скорость вращения Земли; λ — долгота; ϕ — широта; a — радиус Земли; S — параметр статической устойчивости; u' — возмущение зональной скорости (отклонение от среднего по долготе значения); v' — возмущение меридиональной скорости; T' — возмущение температуры; ϕ' — возмущение геопотенциала.

Параметр статической устойчивости рассчитывается следующим образом:

$$S = \frac{\partial \hat{T}}{\partial z} + \frac{k \hat{T}}{H}, \quad (5.2)$$

где T_b — температура, осредненная по территории Северного полушария от 20° с.ш.; k — коэффициент теплопроводности; H — масштаб высоты.[10]

5.3 Планетарные волны в ионосфере

Ионосфера Земли - это область верхних слоев атмосферы, простирающаяся примерно от 60 до 1000 километров над уровнем моря. Здесь доминируют заряженные частицы, такие как электроны и положительные ионы, вызванные радиационной активностью Солнца — отсюда и название. Ионосфера важна для

многих научных и промышленных применений, поскольку заряженные частицы влияют на распространение электромагнитных волн, таких как радиосигналы.

Так называемая задержка распространения радиосигналов в ионосфере является одним из важнейших источников помех для спутниковой навигации. Следовательно, хорошее знание электронной плотности может помочь в коррекции сигналов. В частности, представляет интерес верхняя область ионосферы, превышающая 600 километров, поскольку 80 процентов электронов собирается в этой так называемой верхней ионосфере.

Проблема в том, что плотность электронов сильно варьируется — в зависимости от долготы и широты над Землей, времени суток и года, а также солнечной активности. Это затрудняет их реконструкцию и прогнозирование, например, на основе коррекции радиосигналов.

В последнее время проблема изучения динамики крупномасштабных (103-104 км) движений в ионосфере, на фоне которых происходят практически все физико-химические процессы, находится в центре внимания исследований верхних слоев атмосферы. Это обусловлено тем, что на рассматриваемых высотах (80-600 км) атмосфера представляет собой слабо ионизированную ионосферную плазму, заряженная составляющая которой мгновенно реагирует на любые изменения динамического режима нейтральной составляющей ионосферы. Реакция на динамическое воздействие носит электромагнитный характер. Он распространяется в среде со скоростью более 1 км/с в виде собственных (короткопериодических) колебаний продолжительностью от нескольких минут до нескольких часов и с длиной волны от нескольких метров до 103 км.

В частности, для условия распространения планетарных волн вверх получено простое неравенство $k(k+1) < 2\omega_0/\alpha$, где k — волновое число, α — индекс циркуляции, ω_0 — угловая скорость вращения Земли. В тропосфере зональные ветры летом направлены на восток ($\alpha < 0$), а зимой — на запад ($\alpha > 0$).

Следовательно, летом нет условий для их распространения, так как в этом случае нарушается неравенство. Зимой могут распространяться только крупномасштабные возмущения с волновыми числами $k=1$ и 2 (обычно $(\omega_0/\alpha) \approx 4$). Таким образом, проникновение планетарных волн с волновыми числами $k > 2$ теоретически невозможно. Однако экспериментальные результаты исследования долгопериодических вариаций параметров ионосферы показывают, что “отклики” на прохождение планетарных волн в ионосфере наблюдаются не только зимой, но и летом, причем наблюдаются вариации с волновыми числами $k > 2$. Все вышесказанное показывает, что источники планетарных волн и крупномасштабных вихрей могут существовать не только в нижних слоях атмосферы, но и в самой ионосфере.

Реакция ионосферной плазмы на прохождение волн в верхних слоях атмосферы обычно регистрируется ионосферными и магнитными обсерваториями во время магнитных бурь, суббурь, землетрясений, запуска космических аппаратов. Интерпретация отклика ионосферной плазмы является жизненно важной задачей исследователей верхних слоев атмосферы и околоземного космического пространства.[15]

5.4 Архив данных реанализа MERRA-2

MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2) - это продвинутый метеорологический реанализ, разработанный Национальным центром атмосферных исследований (NCAR) и Национальным аэронавтическим и космическим управлением (NASA). Он представляет собой глобальный датасет, охватывающий период с 1980 года по настоящее время, который используется для анализа атмосферных процессов и их влияния на климат.

Вот некоторые основные характеристики и особенности MERRA-2:

1. MERRA-2 предоставляет данные о состоянии атмосферы на глобальной сетке с горизонтальным разрешением примерно 0,5 градуса по широте и долготе.
2. Реанализ охватывает временной период с 1980 года по текущий момент и обновляется регулярно.
3. MERRA-2 предоставляет широкий спектр атмосферных параметров, включая температуру, давление, влажность, ветер, облачность и другие. Кроме того, в нем также представлены данные о поверхностных условиях, таких как температура поверхности, осадки, снегопады и т. д.
4. Для создания MERRA-2 используются передовые численные модели атмосферы и ассимиляция наблюдений, что позволяет получить достоверные и согласованные данные. Данные регулярно обновляются и обрабатываются, чтобы предоставить пользователям актуальную информацию о состоянии атмосферы.

MERRA-2 является важным инструментом для исследователей и климатологов, использующих его для анализа климатических трендов, изучения атмосферных процессов и моделирования климатических изменений. Данные MERRA-2 доступны через интернет и могут быть использованы широким кругом пользователей, включая исследователей, ученых, климатологов и специалистов по погоде. MERRA-2 является важным ресурсом для анализа атмосферных процессов и климатических изменений на глобальном уровне и широко используется в научных исследованиях, прогностических моделях и мониторинге климата. Хотя MERRA-2 предоставляет данные с 1980 года, для некоторых анализов требуются еще более долгосрочные наблюдения, которые могут быть недоступны. Горизонтальное разрешение данных MERRA-2 составляет примерно 0,5 градуса по широте и долготе, что может быть недостаточно для некоторых применений, требующих более высокого разрешения.

6. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ ПО ПОСТАВЛЕННЫМ ЗАДАЧАМ

6.1 Распределение амплитуды планетарной волны в поле геопотенциальной высоты

В процессе исследования, были проанализированы изменения амплитуды планетарной волны в года с высокой и низкой солнечной активностью в условиях положительной СКМ. Для каждого года были построены четыре планетарные волны с волновыми числами 1-4 (гармоники) за период февраль-март и начало апреля.

Структуру северной кольцевой моды (СКМ) описывает первая эмпирическая ортогональная функция (ЭОФ) разложения аномалий геопотенциальной высоты различных изобарических поверхностей. Считается, что СКМ может использоваться как «инструмент» для определения интенсивности циркумполярного вихря в стратосфере Северного полушария.

Термин «гармоника» относится к периодическим колебаниям в атмосфере, которые могут быть обусловлены различными факторами, такими как сезонные изменения в потоках солнечной радиации, приливы, циклы солнечной активности и другие.

В анализе гармоник часто выделяют несколько гармонических компонентов, таких как первая гармоника, вторая гармоника и так далее. Эти компоненты представляют собой различные частоты или периоды колебаний, которые могут быть выделены из временного ряда данных.

Первая гармоника – это основной цикл или основная частота в данных. Например, для сезонных гармоник это может быть период изменения погоды от одного времени года к другому. Так же обычно имеет самый длинный период среди всех гармоник. Вторая гармоника – это компонента, которая имеет

удвоенную частоту первой гармоники. Может отображать внутрисезонные вариации, такие как месячные или квартальные циклы. Третья гармоника – она выступает с утроенной частотой первой гармоники. Представляет более высокочастотные колебания или изменения в данных. Дальнейшие гармоники – это компоненты с еще более высокими частотами, умноженными на множители первой гармоники.

Амплитуда планетарной волны в поле геопотенциальной высоты зависит от множества факторов, таких как распределение массы Земли, атмосферное движение и т. д. Планетарные волны представляют собой основные волны в атмосфере и океане, которые обычно вызываются кориолисовской силой, гравитацией и атмосферной теплопередачей. Они имеют различные гармоники, связанные с различными частотами и волновыми длинами.

Амплитуда планетарной волны может быть измерена с помощью различных инструментов и методов, включая атмосферные модели, наблюдения за средней высотой атмосферы и др. Однако точные значения амплитуды в различных гармониках могут варьироваться в зависимости от конкретных условий и методов измерения.

В начале работы я построила график изменения потока солнечного излучения за выбранный период времени (с 1980 по 2016 год), где были выделены зимы с аномально низкой и аномально высокой активностью. Выбранные года, анализировались как холодные периоды при высокой солнечной активностью и при низкой. Значения для низкой активности были взяты от 0 до 100, а начиная с 150 и выше это высокая активность.

После я перешла к анализу среднемесячного индекса СКМ с ноября по апрель. Мы можем наблюдать что на графике индекса СКМ в года с высокой солнечной активностью именно в феврале месяце у нас идет сходимост значений, которые стремятся к 1.5 (полутору) и на графике индекса СКМ с низкой солнечной активностью под конец февраля начала марта у нас идет некоторое

сужение коридора значений. Следовательно в дальнейшем я сосредоточила свое внимание именно на феврале и марте.

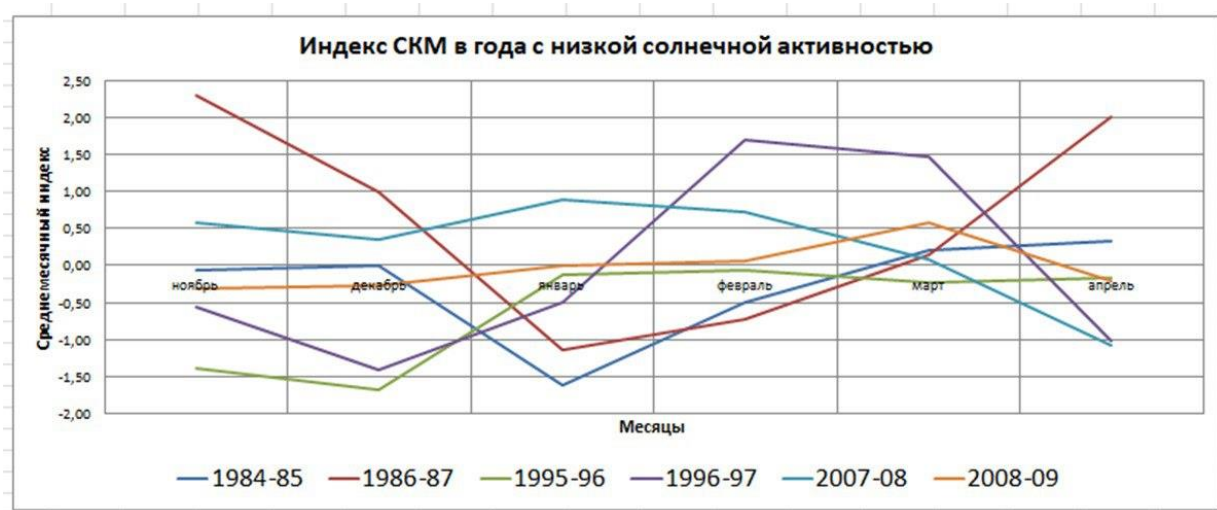


Рисунок 6.1- Среднемесячный индекс СКМ с ноября по апрель в года с низкой солнечной активностью

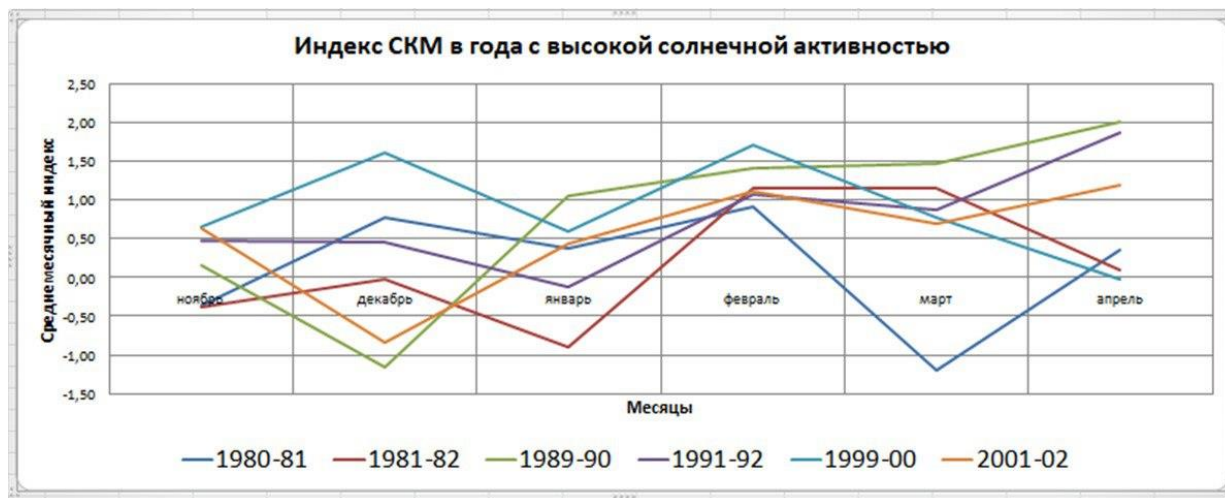


Рисунок 6.2- Среднемесячный индекс СКМ с ноября по апрель в года с высокой солнечной активностью

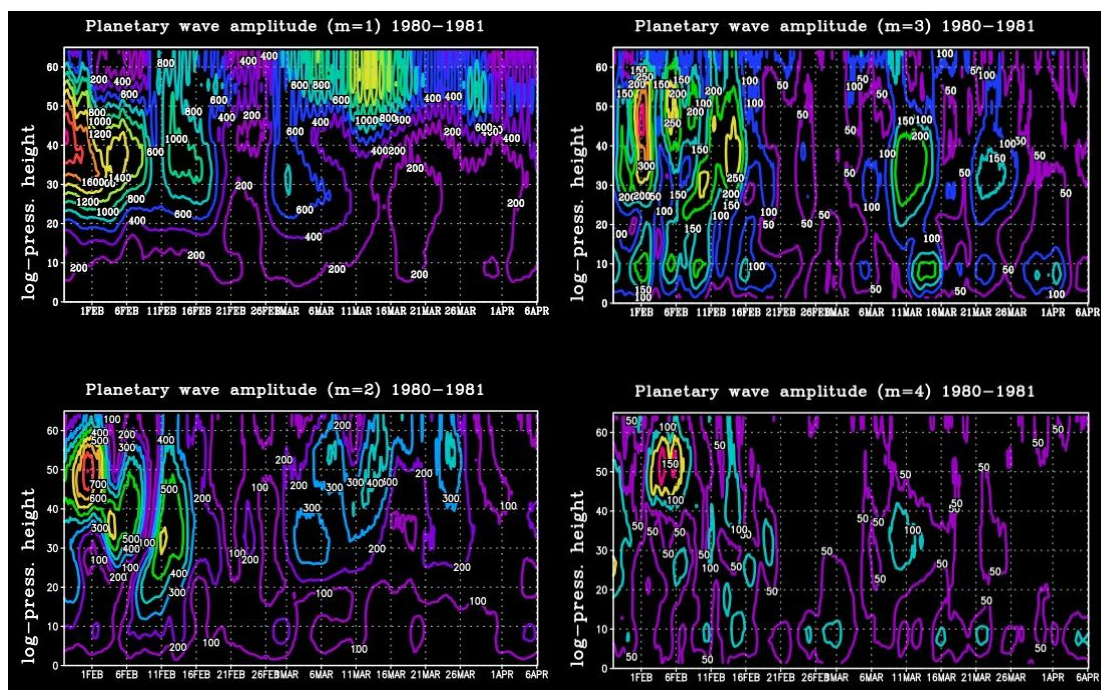


Рисунок 6.3-Распределение амплитуды планетарной волны в поле геопотенциальной высоты в год с высокой солнечной активностью (1981) и положительной СКМ

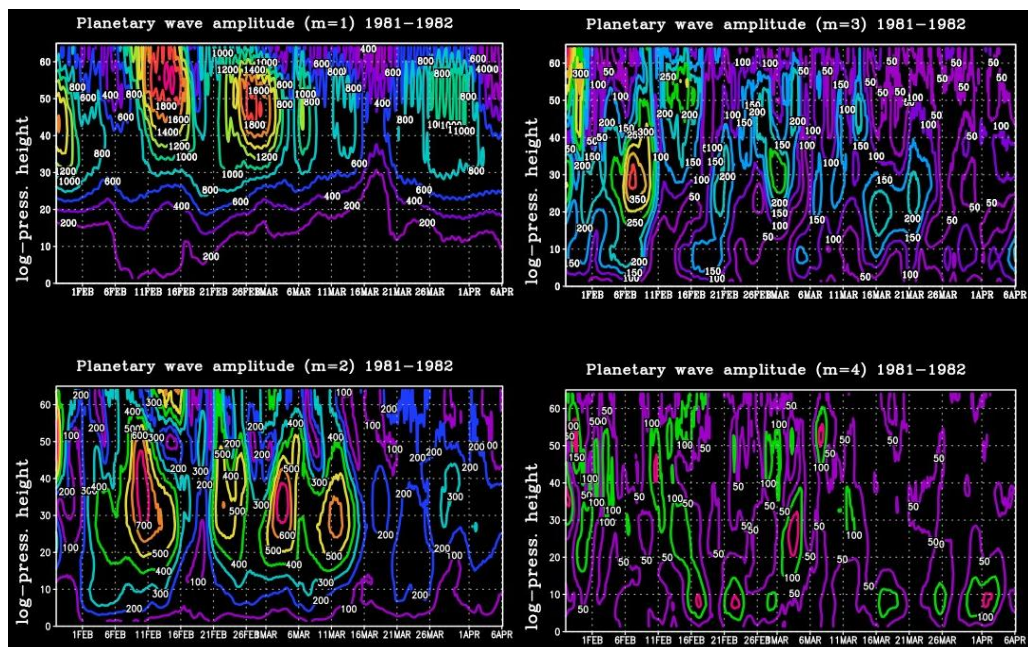


Рисунок 6.4-Распределение амплитуды планетарной волны в поле геопотенциальной высоты в год с высокой солнечной активностью (1982) и положительной СКМ

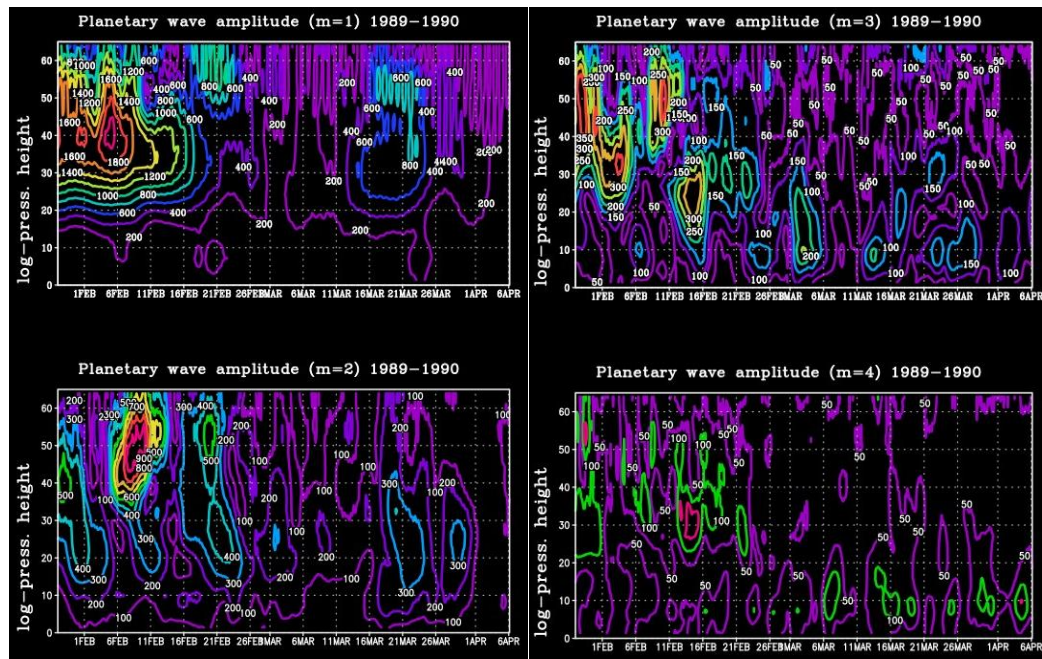


Рисунок 6.5-Распределение амплитуды планетарной волны в поле геопотенциальной высоты в год с высокой солнечной активностью (1990) и положительной СКМ

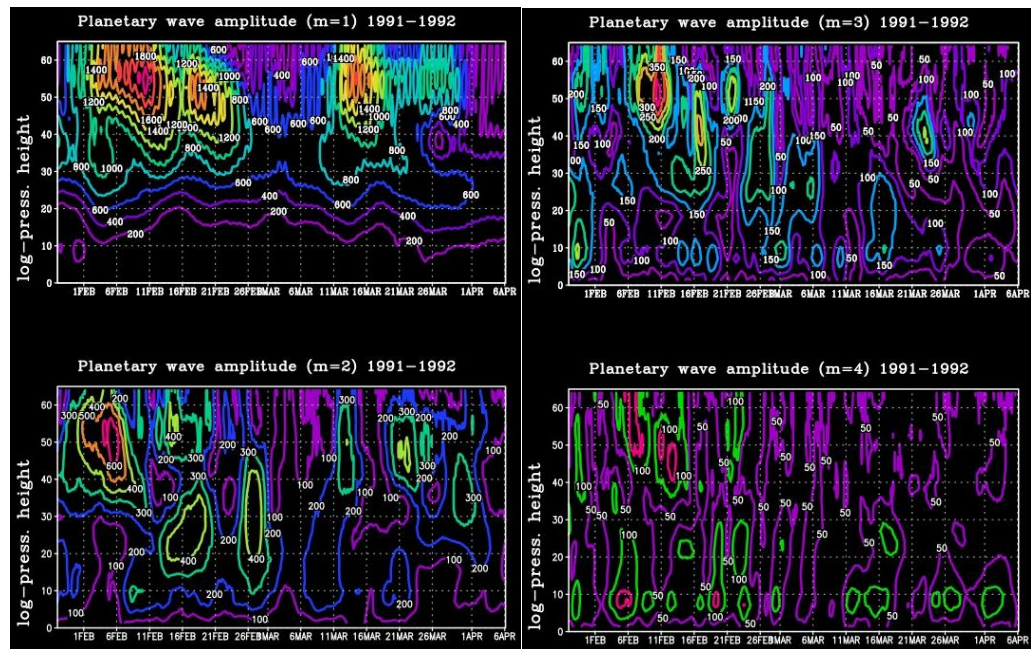


Рисунок 6.6-Распределение амплитуды планетарной волны в поле геопотенциальной высоты в год с высокой солнечной активностью (1992) и положительной СКМ

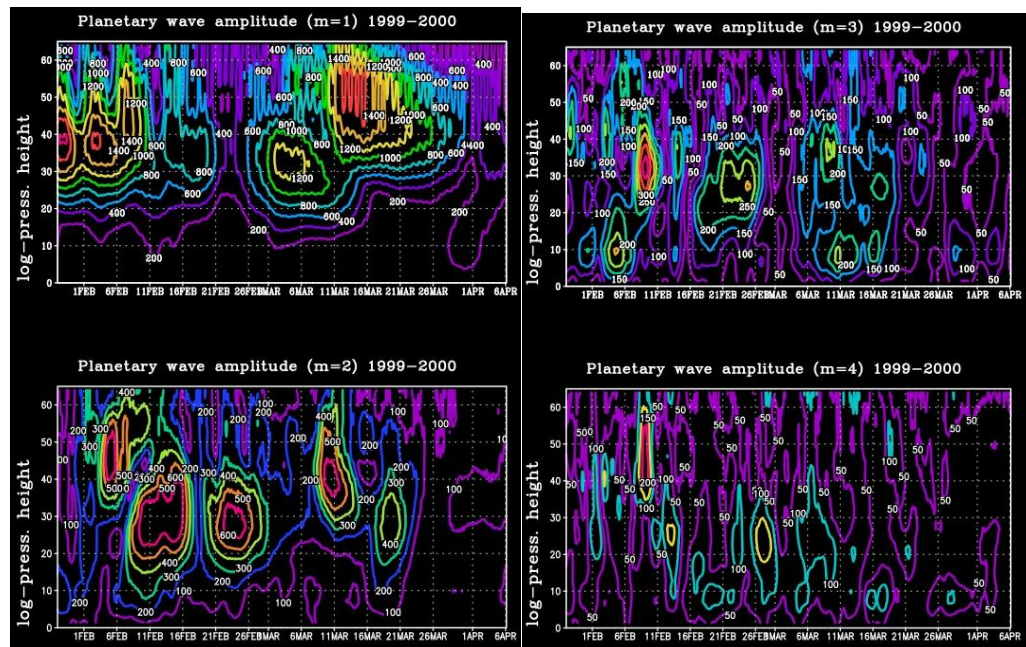


Рисунок 6.7-Распределение амплитуды планетарной волны в поле геопотенциальной высоты в год с высокой солнечной активностью (2000) и положительной СКМ

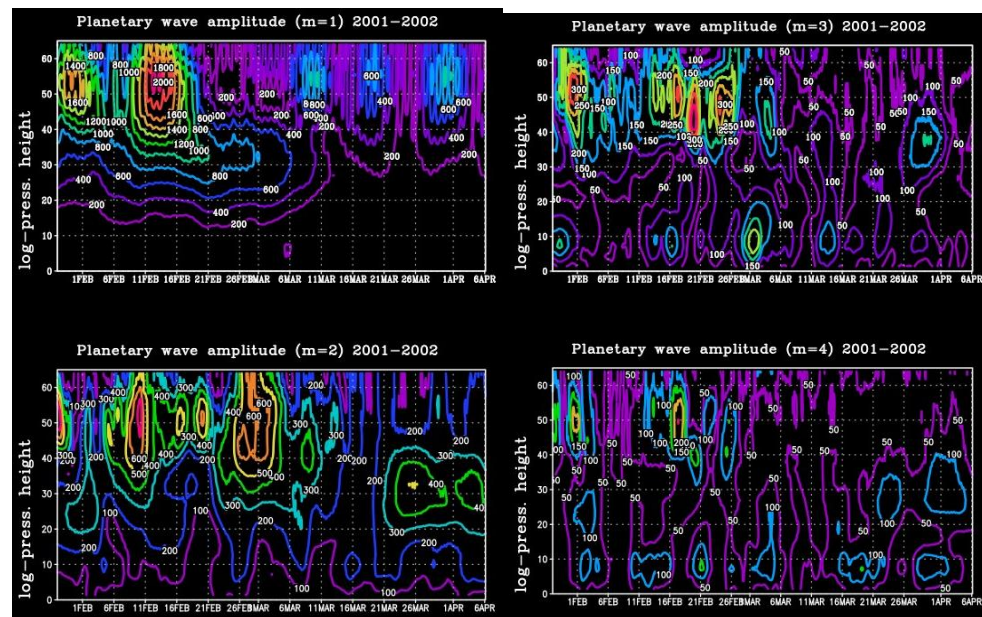


Рисунок 6.8-Распределение амплитуды планетарной волны в поле геопотенциальной высоты в год с высокой солнечной активностью (2002) и положительной СКМ

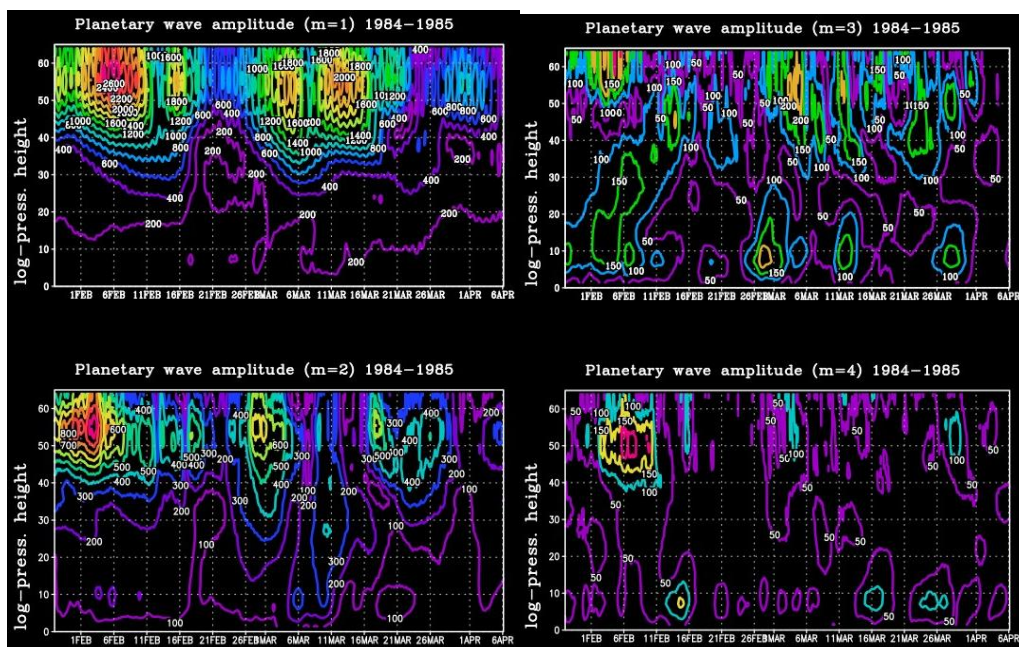


Рисунок 6.9-Распределение амплитуды планетарной волны в поле геопотенциальной высоты в год с низкой солнечной активностью (1985) и положительной СКМ

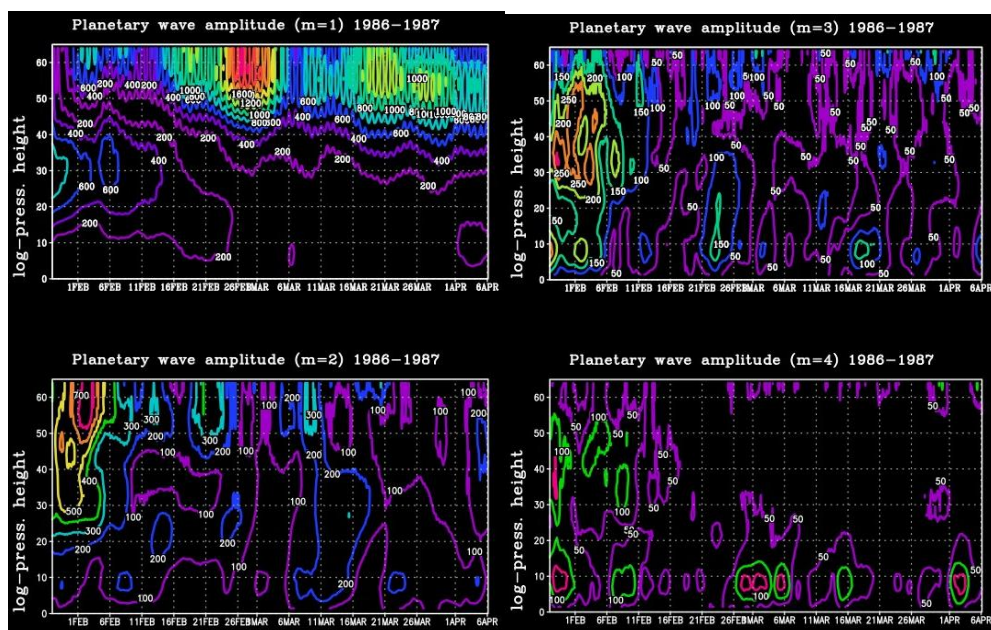


Рисунок 6.10-Распределение амплитуды планетарной волны в поле геопотенциальной высоты в год с низкой солнечной активностью (1987) и положительной СКМ

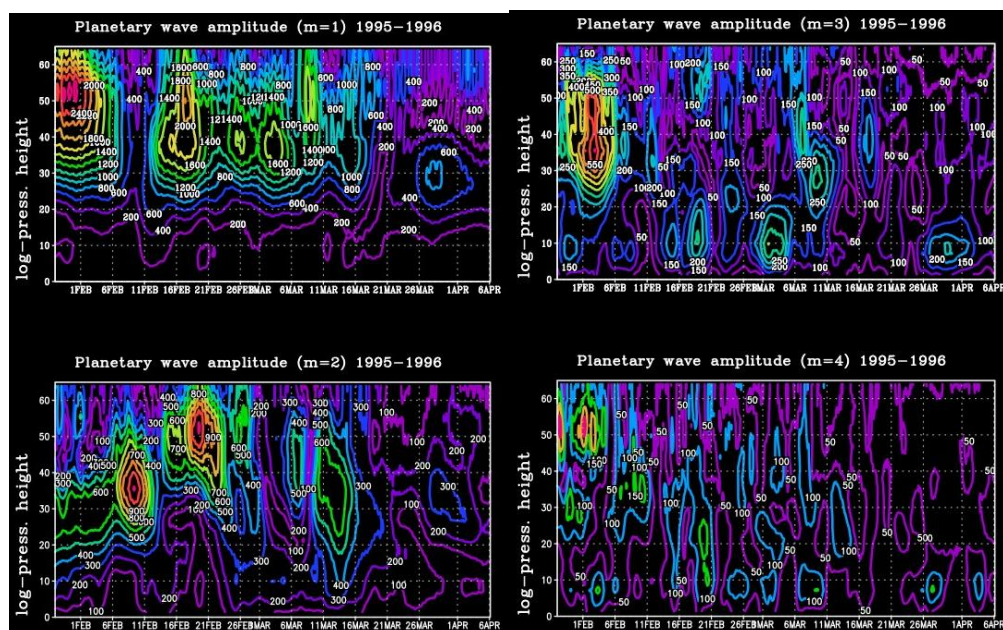


Рисунок 6.11-Распределение амплитуды планетарной волны в поле геопотенциальной высоты в год с низкой солнечной активностью (1996) и положительной СКМ

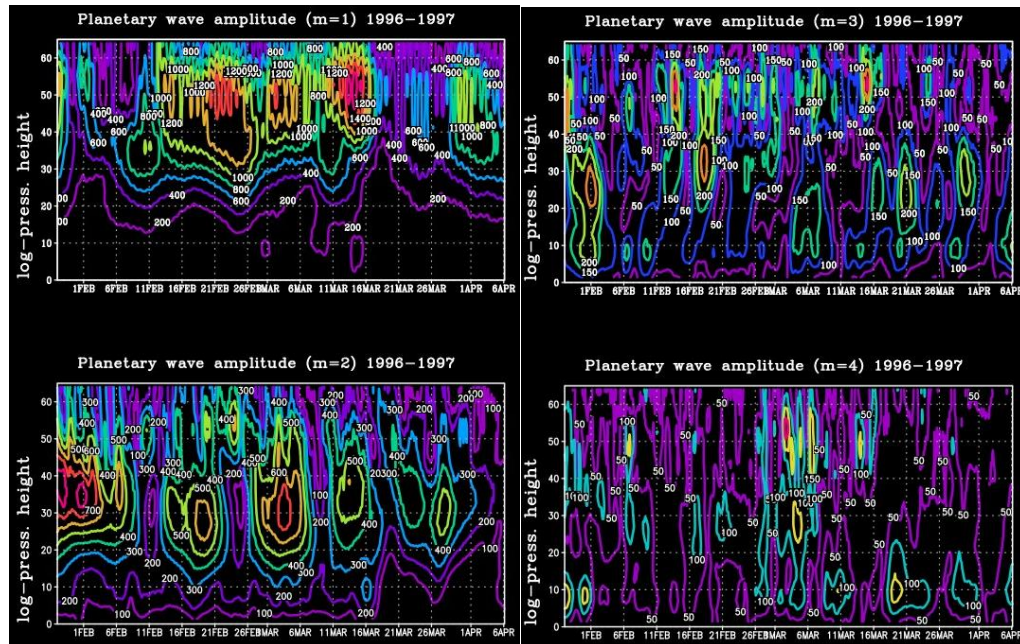


Рисунок 6.12-Распределение амплитуды планетарной волны в поле геопотенциальной высоты в год с низкой солнечной активностью (1997) и положительной СКМ

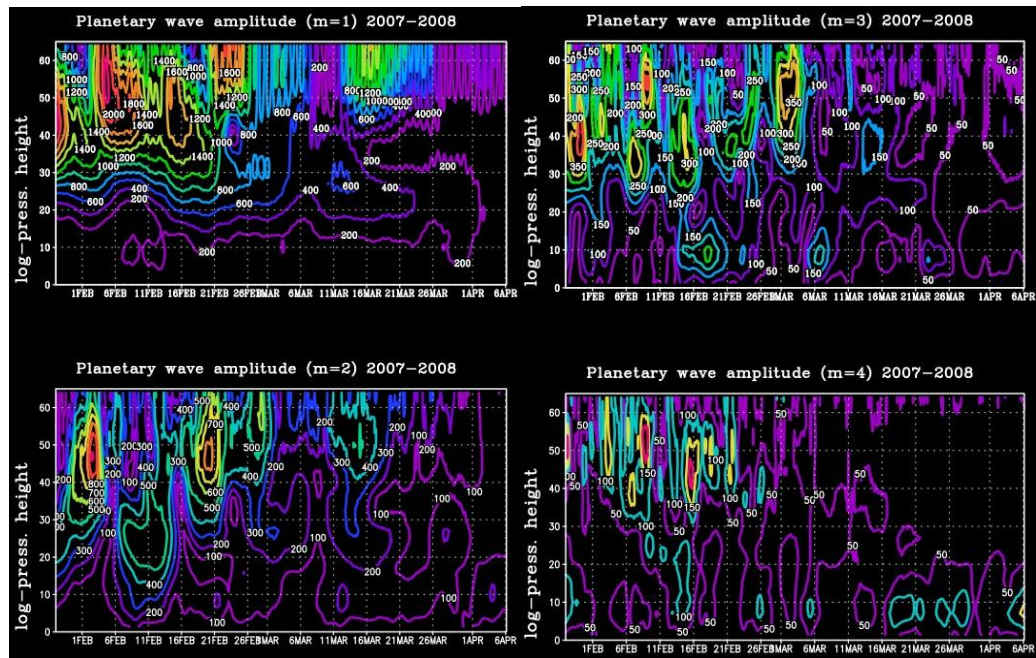


Рисунок 6.13-Распределение амплитуды планетарной волны в поле геопотенциальной высоты в год с низкой солнечной активностью (2008) и положительной СКМ

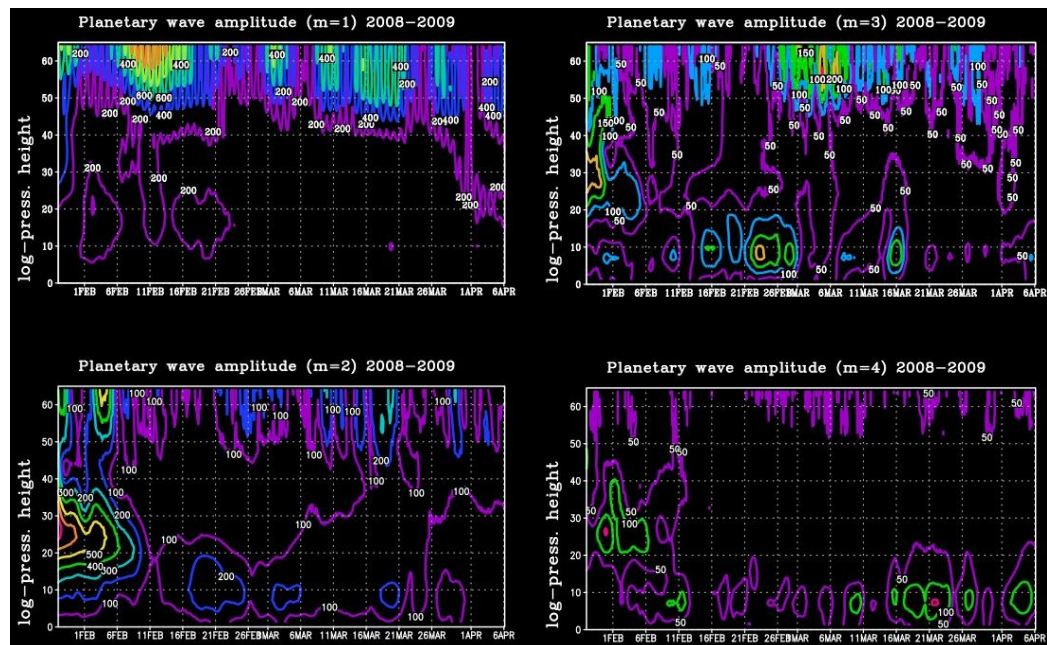


Рисунок 6.14- Распределение амплитуды планетарной волны в поле геопотенциальной высоты в год с низкой солнечной активностью (2009) и положительной СКМ

В метеорологии поле геопотенциальной высоты используется для описания вертикальной структуры атмосферы и анализа атмосферных явлений. Оно представляет собой карту или набор данных, отображающих геопотенциальную высоту в различных точках атмосферы.

Геопотенциальная высота – это мера потенциальной энергии единичной массы воздуха в данной точке атмосферы относительно некоторой определенной высоты. Она является функцией гравитационного потенциала.

Проанализировав рисунки, были составлены две таблицы с полученными данными по распределению планетарной волны с волновыми числами 1-4. В таблице представлены даты конца активности планетарной волны, максимальные значения амплитуды волны в геопотенциальных метрах и максимальные значения по высоте в километрах.

Года	Первая Гармоника			Вторая Гармоника		
	Конец активности планетарной волны	Мах знач. амплитуды волны в (гп.м)	Мах знач. амплитуды волны по высоте (км)	Конец активности планетарной волны	Мах знач. амплитуды волны в (гп.м)	Мах знач. амплитуды волны по высоте (км)
1981	01.04	1800	40	26.03	800	50
1982	01.04	2000	55	16.03	700	45
1990	23.03	2000	40	26.02	900	50
1992	01.04	2000	55	26.03	600	55
2000	01.04	1600	55	21.03	600	50
2002	11.03	2000	55	11.03	700	55

Третья гармоника			Четвертая гармоника		
Конец активности планетарной	Мах знач. амплитуды волны в (гп.м)	Мах знач. амплитуды волны по высоте (км)	Конец активности планетарной	Мах знач. амплитуды волны в (гп.м)	Мах знач. амплитуды волны по высоте (км)
26.03	350	50	11.03	150	55
16.03	400	30	08.03	150	30
21.02	350	50	06.03	150	30
26.03	350	55	25.02	150	55
11.03	350	35	28.02	150	50
26.02	300	50	21.02	150	50

Таблица 1: Данные для годов с высокой солнечной активностью и положительной СКМ по распределению амплитуды планетарной волны

Года	Первая Гармоника			Вторая Гармоника		
	Конец активности планетарной волны	Мах знач. амплитуды волны в (гп.м)	Мах знач. амплитуды волны по высоте (км)	Конец активности планетарной волны	Мах знач. амплитуды волны в (гп.м)	Мах знач. амплитуды волны по высоте (км)
1985	21.03	2600	60	06.03	900	55
1987	27.03	2000	60	11.03	700	60
1996	21.03	2600	55	16.03	1000	55
1997	01.04	1600	55	27.03	800	40
2008	26.03	2200	60	21.03	900	50
2009	21.03	800	60	21.03	600	30

Третья гармоника			Четвертая гармоника		
Конец активности планетарной	Мах знач. амплитуды волны в (гп.м)	Мах знач. амплитуды волны по высоте (км)	Конец активности планетарной	Мах знач. амплитуды волны в (гп.м)	Мах знач. амплитуды волны по высоте (км)
06.03	250	60	11.02	200	50
11.02	300	40	11.02	150	40
06.02	600	45	06.02	250	50
16.03	300	55	16.03	200	55
06.03	350	55	23.02	200	55
21.03	200	60	21.03	150	30

Таблица 2: Данные для годов с низкой солнечной активностью и положительной СКМ по распределению амплитуды планетарной волны

Рассмотрим сначала результаты первой гармоник: в годы с ВСА и положительной СКМ конец активности планетарной волны наблюдается в первых числах апреля. Максимальное значение амплитуды волны достигло 2000 (гп.м), а по высоте 55 (км). В годы с НСА и положительной СКМ конец активности планетарной волны наступает намного раньше, примерно на последней неделе марта с 21.03 по 27.03. Максимальное значение амплитуды волны достигло 2600 (гп.м), а по высоте 60 (км).

Вторая гармоника: во второй гармонике наблюдается сходство в окончании активности планетарной волны как в годы с высокой солнечной активностью, так и в годах с низкой активностью, которое приходится в основном на середину марта. Согласно указанным в таблицах амплитуд очевидно, что максимальное значение активности в годы ВСА составляет 900 (гп.м), в то время как в годы НСА достигает 1000 (гп.м). Максимальное значение активности амплитуды волны по высоте составляет 55 (км) и 60 (км) соответственно.

Третья гармоника: здесь мы видим, что в года ВСА и положительной СКМ конец активности планетарной волны также происходит в середине марта, в то

время как в года НСА и положительной СКМ конец явно наступает в начале марта в период с 16.03 по 6.03. Максимальное значение в ВСА достигает 400 (гп.м), по высоте 55 (км), тогда как в НСА максимальное значение составляет 600 (гп.м), по высоте 60 (км).

Четвертая гармоника имеет схожие результаты: конец активности планетарной волны наблюдается в ВСА с 28.02 по 08.03, а в НСА в середине февраля. Максимальное значение в первом случае достигло 200 (гп.м) и 55 (км). Во втором случае 200 (гп.м) и 55 (км) соответственно.

В итоге можно сделать вывод, что наблюдается заметное различие в поведении амплитуды планетарной волны в года с разной солнечной активностью. В года с НСА и положительной СКМ активность планетарной волны прекращается раньше, однако максимальные значения значительно превышают те, что наблюдаются в года с ВСА и положительной СКМ.

Ещё одним выводом, который можно сделать из этих рассуждений, является то, что солнечная активность может оказывать значительное влияние на характеристики и поведение планетарных волн. Влияние солнечной активности на атмосферные процессы и динамику атмосферы может привести к изменениям в активности планетарных волн, как в их продолжительности, так и в их амплитуде. Это подчеркивает важность учета солнечной активности при исследовании атмосферных явлений и прогнозировании погоды и климатических изменений.

6.2 Расчет и построение компонент F_z и F_y потока волновой активности на разных высотах

На разных высотах волновой поток F_z может проявляться разнообразными способами в зависимости от конкретных атмосферных условий и географического местоположения.

Волновой поток F_z играет важную роль в понимании динамики атмосферы, особенно в отношении процессов, связанных с формированием погоды, циклоническими системами и другими явлениями.

Если объяснять простыми словами, то положительная компонента F_z волновой активности распространяется снизу в верх, а отрицательная сверху вниз. Компонента F_y волновой активности имеет направление вдоль меридианы, соответственно отрицательная F_y распространяется от севера к югу, а положительная от юга к северу.

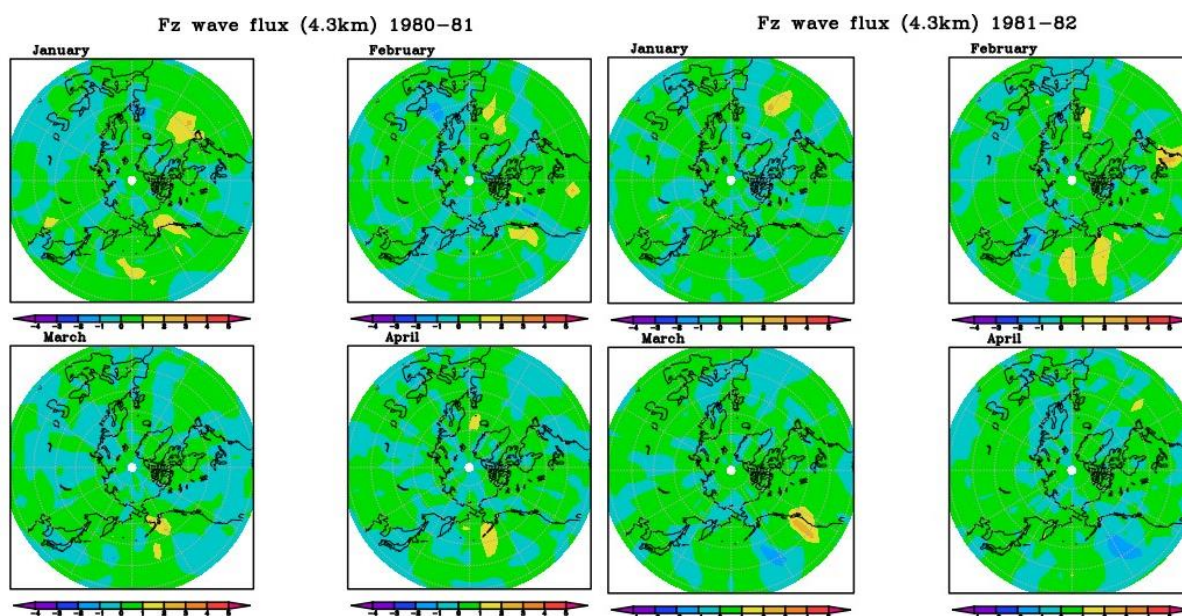


Рисунок 6.15- Волновой поток F_z на высоте (4.3 км) за четыре месяца (январь, февраль, март, апрель) в года с высокой солнечной активностью 1980-81 и 1981-82

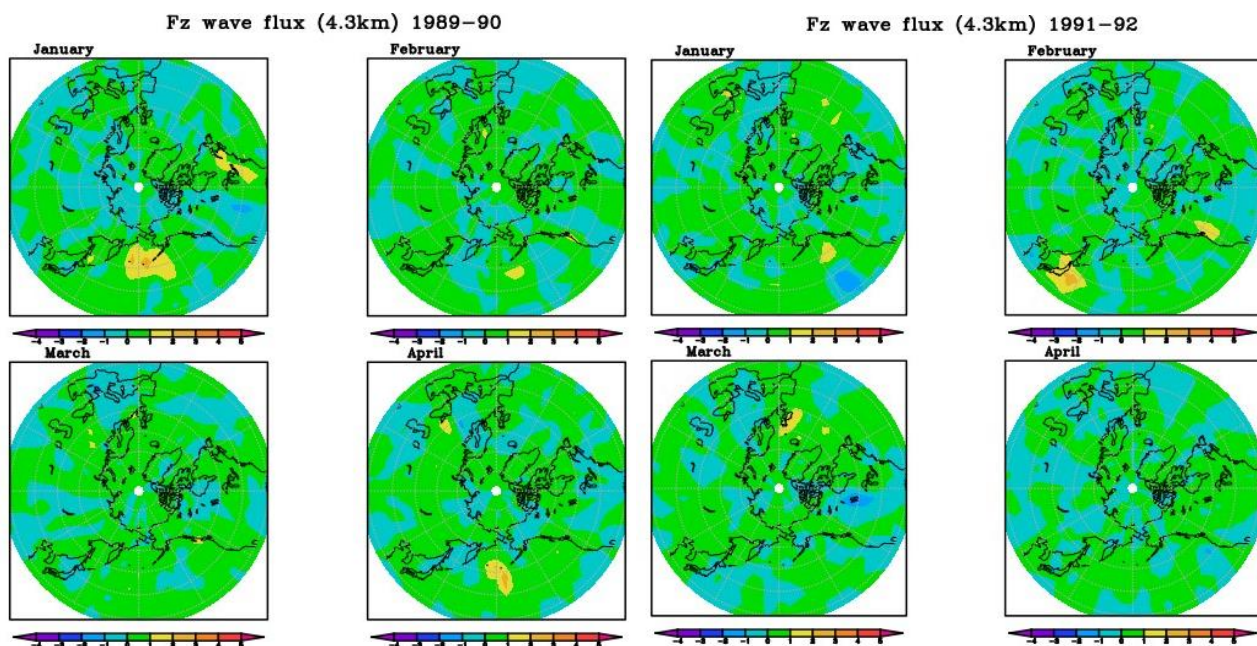


Рисунок 6.16- Волновой поток Fz на высоте (4.3 км) за четыре месяца (январь, февраль, март, апрель) в года с высокой солнечной активностью 1989-90 и 1991-92

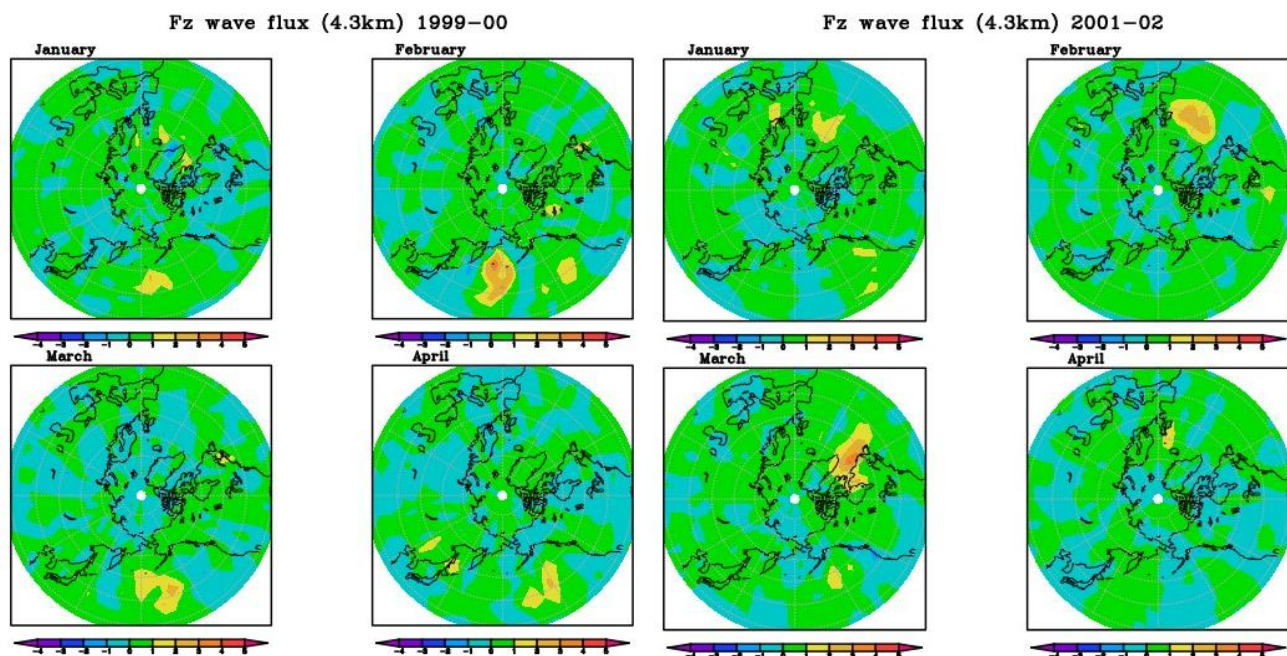


Рисунок 6.17- Волновой поток Fz на высоте (4.3 км) за четыре месяца (январь, февраль, март, апрель) в года с высокой солнечной активностью 1999-00 и 2001-02

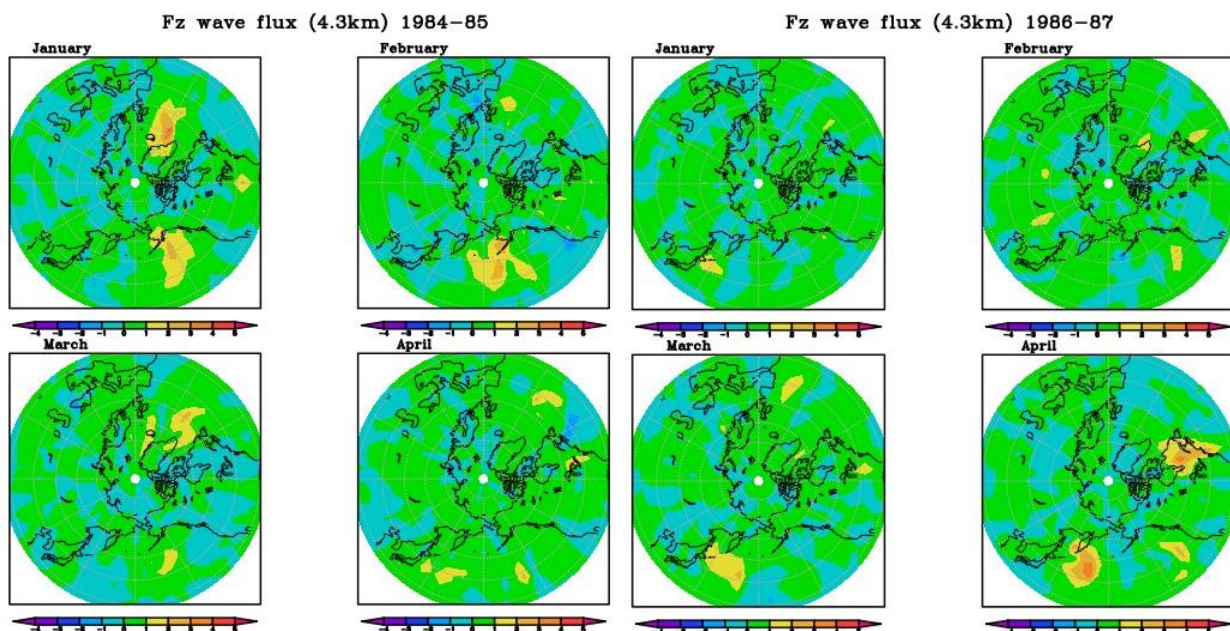


Рисунок 6.18- Волновой поток Fz на высоте (4.3 км) за четыре месяца (январь, февраль, март, апрель) в года с низкой солнечной активностью 1984-85 и 1986-87

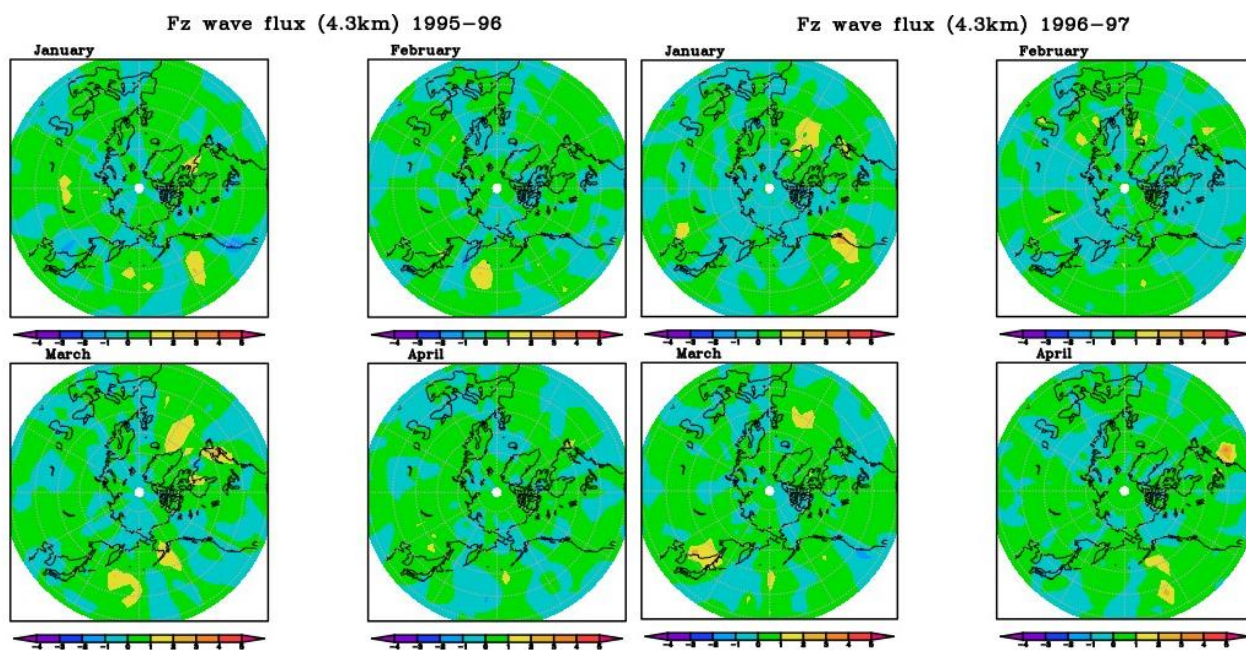


Рисунок 6.19- Волновой поток Fz на высоте (4.3 км) за четыре месяца (январь, февраль, март, апрель) в года с низкой солнечной активностью 1995-96 и 1996-97

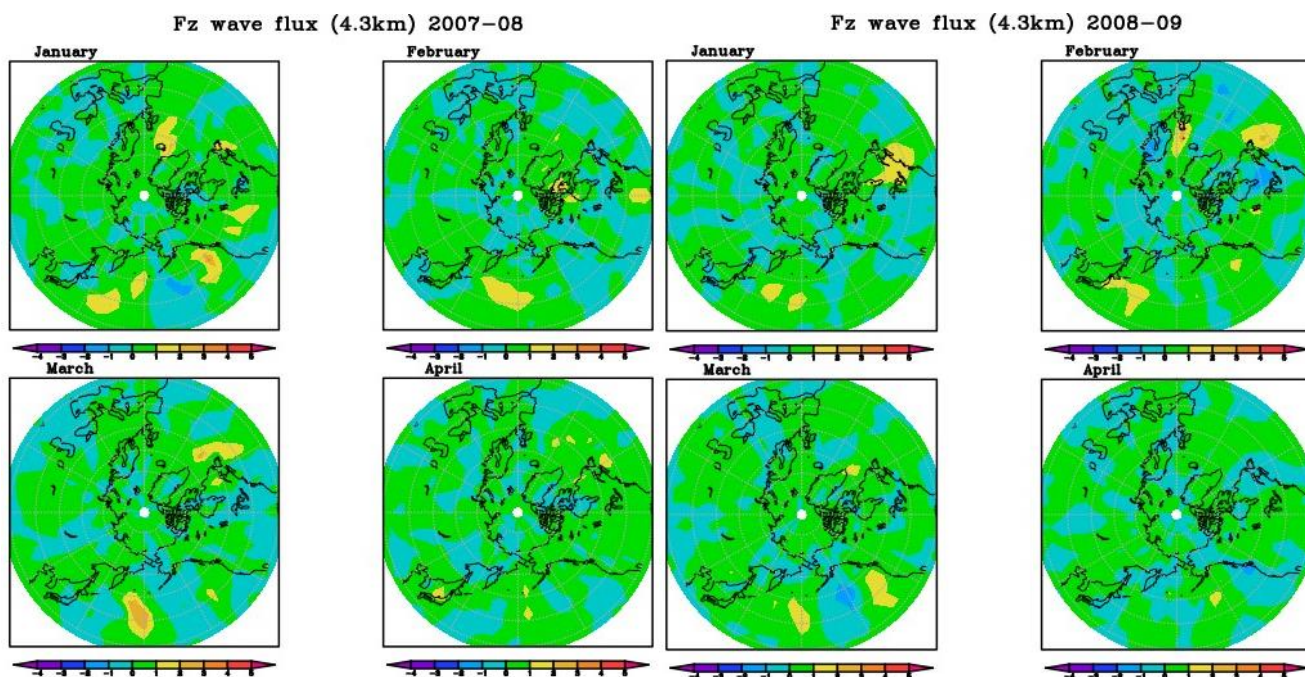


Рисунок 6.20- Волновой поток Fz на высоте (4.3 км) за четыре месяца (январь, февраль, март, апрель) в года с низкой солнечной активностью 2007-08 и 2008-09

Затем было рассмотрено осреднение за февраль и март компоненты Fz потока волновой активности на (4.3 км, 7 км, 10 км) за годы с высокой и низкой солнечной активностью при положительной СКМ.

Fz wave flux (4.3km) February Low Activity

Fz wave flux (4.3km) February Hight Activity

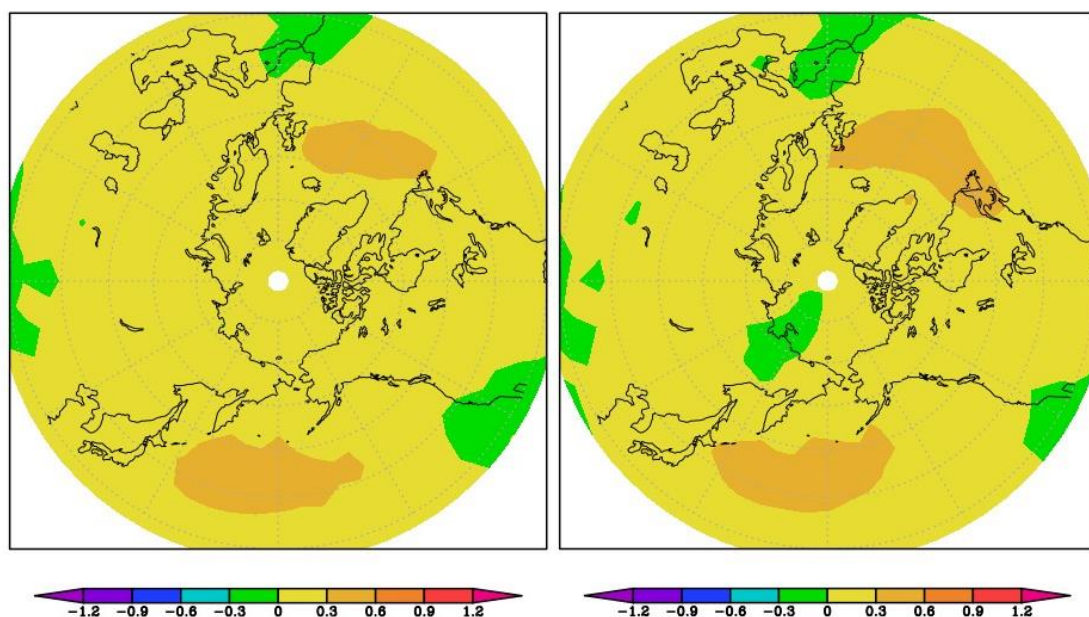


Рисунок 6.21- Осреднение за февраль компоненты Fz потока волновой активности на (4.3 км) за годы с высокой и низкой солнечной активностью при положительной СКМ

Анализируя два представленных рисунка, можно увидеть, что на восточной части России, между морем Лаптевых и Восточно-Сибирским морем, наблюдаются отличия в значениях волновой активности компоненты Fz в зависимости от уровня солнечной активности. В годах с высокой солнечной активностью отмечаются отрицательные значения, тогда как в года с низкой солнечной активностью наблюдаются положительные значения.

В Атлантическом океане, прямо под Гренландией на левом рисунке площадь всплеска положительных значений меньше, чем на правом.

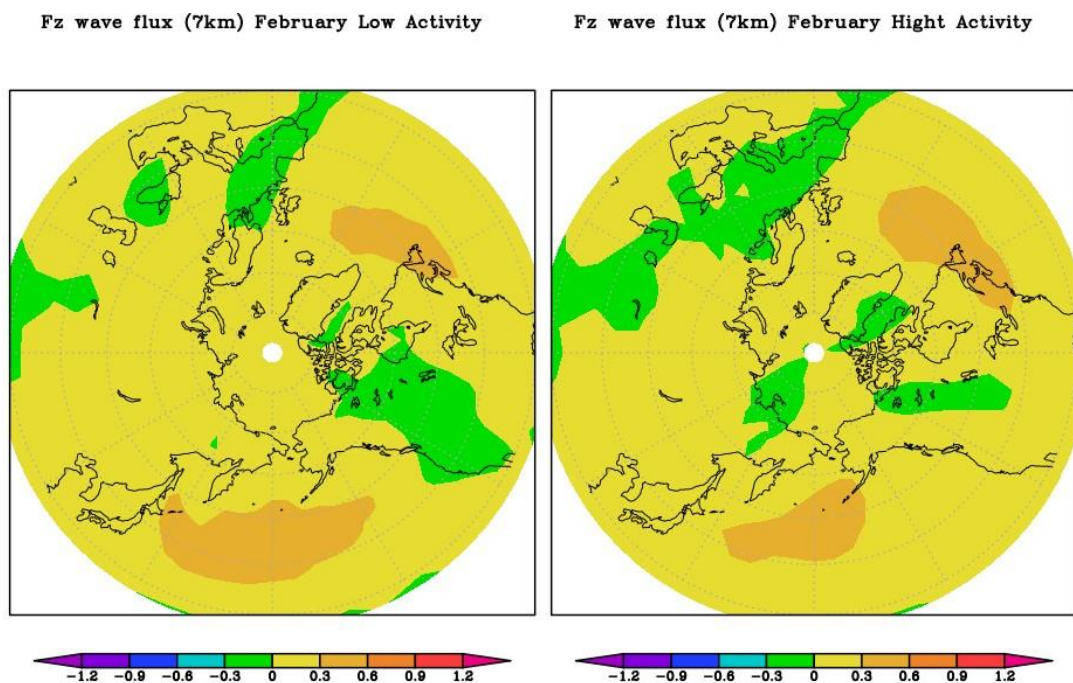


Рисунок 6.22- Осреднение за февраль компоненты Fz потока волновой активности на (7 км) за годы с высокой и низкой солнечной активностью при положительной СКМ

В периоды с низкой солнечной активностью мы можем наблюдать отрицательные значения над территориями Швеции, Финляндии и частично на севере России. Также над Черным морем и вблизи Саудовской Аравии. В годах с высокой солнечной активностью отрицательные значения охватывают более обширные пространства, простираясь практически через всю Европу и западную Россию, а затем непрерывно распространяясь через Турцию, Иран и Ирак, уходя дальше на юго-восток.

В атлантическом океане мы наблюдаем похожую ситуацию, что и с прошлыми рисунками.

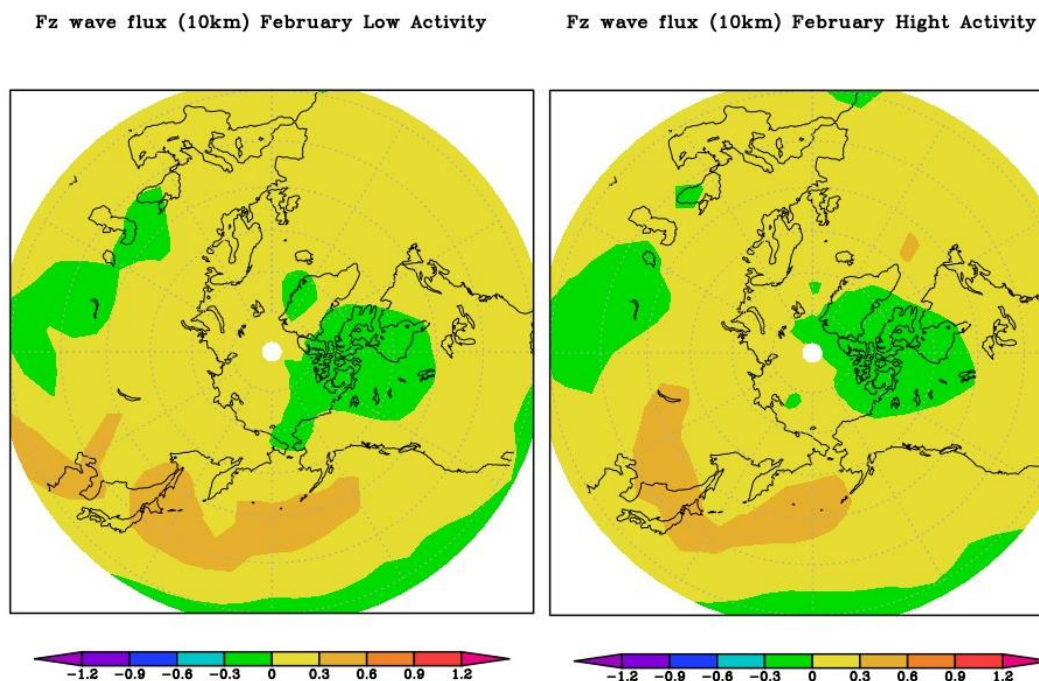


Рисунок 6.23- Осреднение за февраль компоненты Fz потока волновой активности на (10 км) за годы с высокой и низкой солнечной активностью при положительной СКМ

Здесь значения волновой активности компоненты Fz распределены почти равномерно, и уже не так легко заметить отличия. Отрицательные и положительные значения наблюдаются на той же территории, причем различия в масштабе минимальны.

Исходя из анализа представленных данных, можно сделать вывод о том, что волновая активность, выраженная компонентой Fz , подвержена влиянию солнечной активности. Во-первых, изменения в уровне солнечной активности приводят к колебаниям в волновой активности. В периоды высокой солнечной активности отмечаются отрицательные значения Fz , в то время как при низкой активности мы видим положительные значения Fz . Или отрицательные значения присутствуют, но в более малом масштабе. Это свидетельствует о тесной связи между солнечной активностью и поведением атмосферных волн.

Таким образом, волновая активность компоненты Fz является результатом сложного взаимодействия между солнечной активностью и географическими особенностями, и понимание этих взаимосвязей поможет лучше понять динамику атмосферы и ее влияние на климатические процессы.

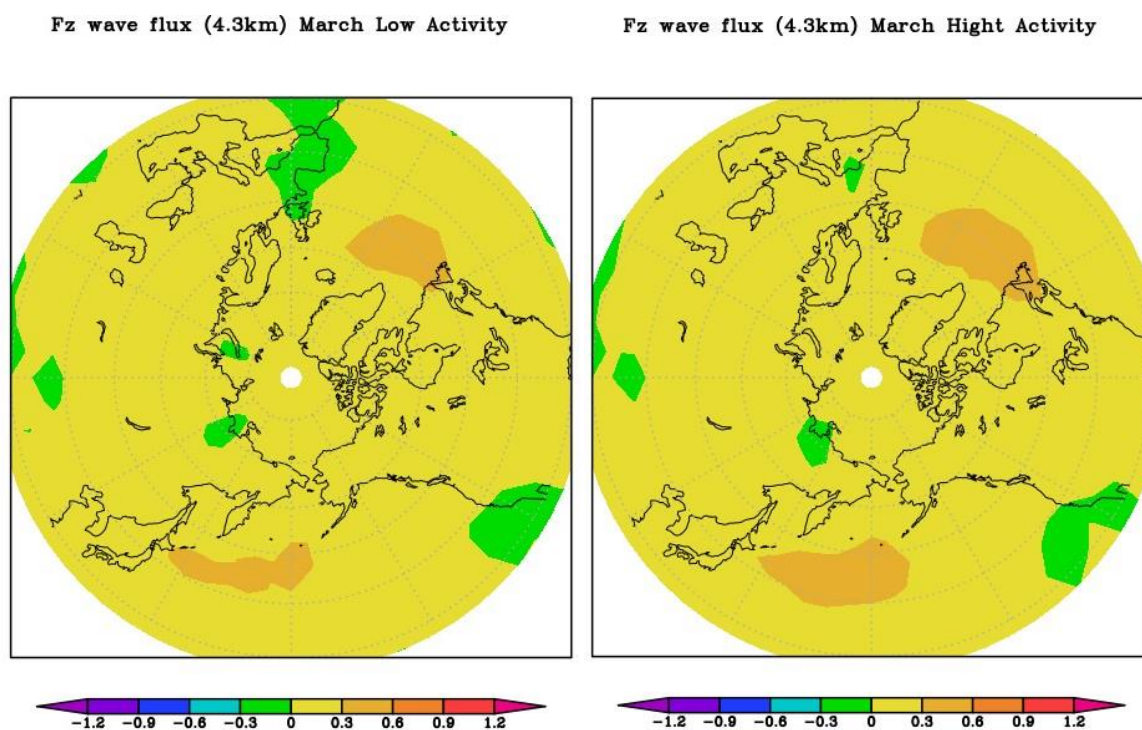


Рисунок 6.24- Осреднение за март компоненты Fz потока волновой активности на (4,3 км) за годы с высокой и низкой солнечной активностью при положительной СКМ

Рассмотрим также осреднение за март. Положительный волновой поток компоненты Fz в периоды низкой солнечной активности наблюдается в Атлантическом океане под Гренландией и в Тихом океане, простираясь от Японии до Аляски. В годы высокой солнечной активности мы видим аналогичную картину, но с расширением области распространения.

Перейдя к отрицательным значениям, можно отметить некоторые различия относительно февраля. В Марте на левом рисунке отрицательные значения над

Швецией и Финляндией оказываются более выраженными по масштабу, чем на правом.

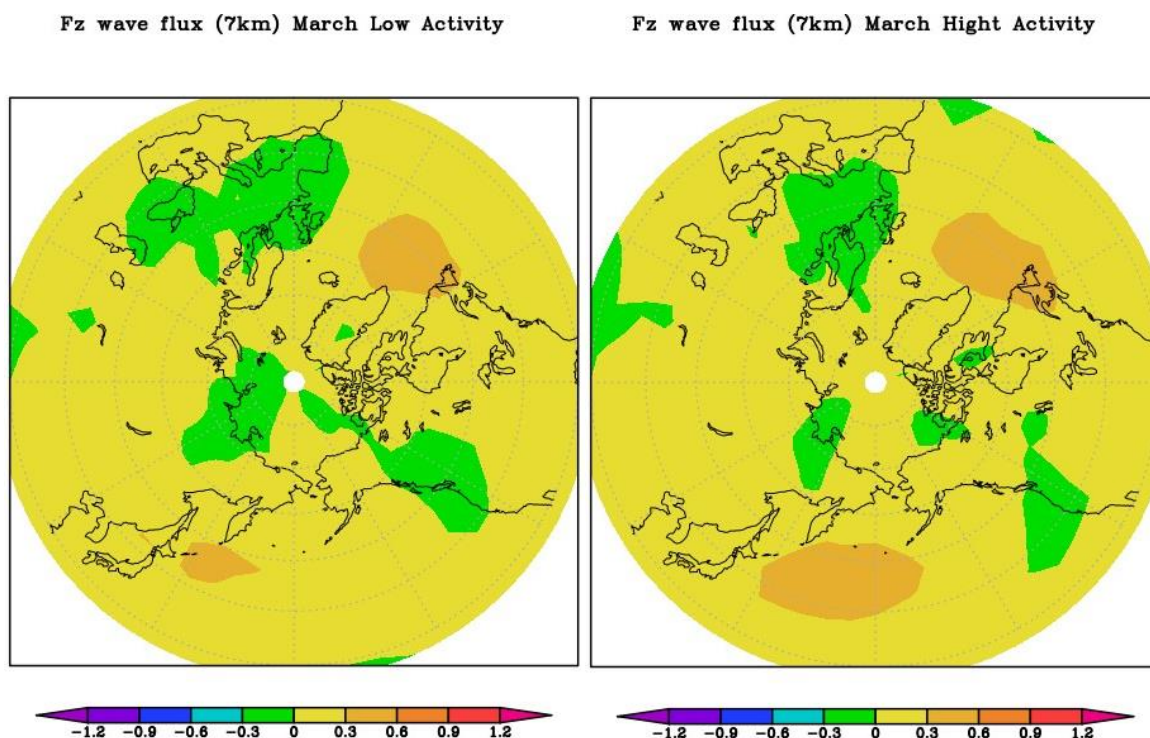


Рисунок 6.25- Осреднение за март компоненты F_z потока волновой активности на (7 км) за годы с высокой и низкой солнечной активностью при положительной СКМ

Анализируя представленные графики, становится очевидным, что с положительными значениями волнового потока F_z наблюдается схожая динамика, как было описано ранее. Справа масштаб распространения оказывается больше, чем слева.

При рассмотрении отрицательных значений волнового потока F_z в периоды низкой солнечной активности, мы видим их распространение над Европой, северной частью России, Турцией, Ираном, а также над Морем Лаптевых и США. Однако при повышенной солнечной активности отрицательные значения

волнового потока Fz не так широко распространены, а сконцентрированы в более локальных областях.

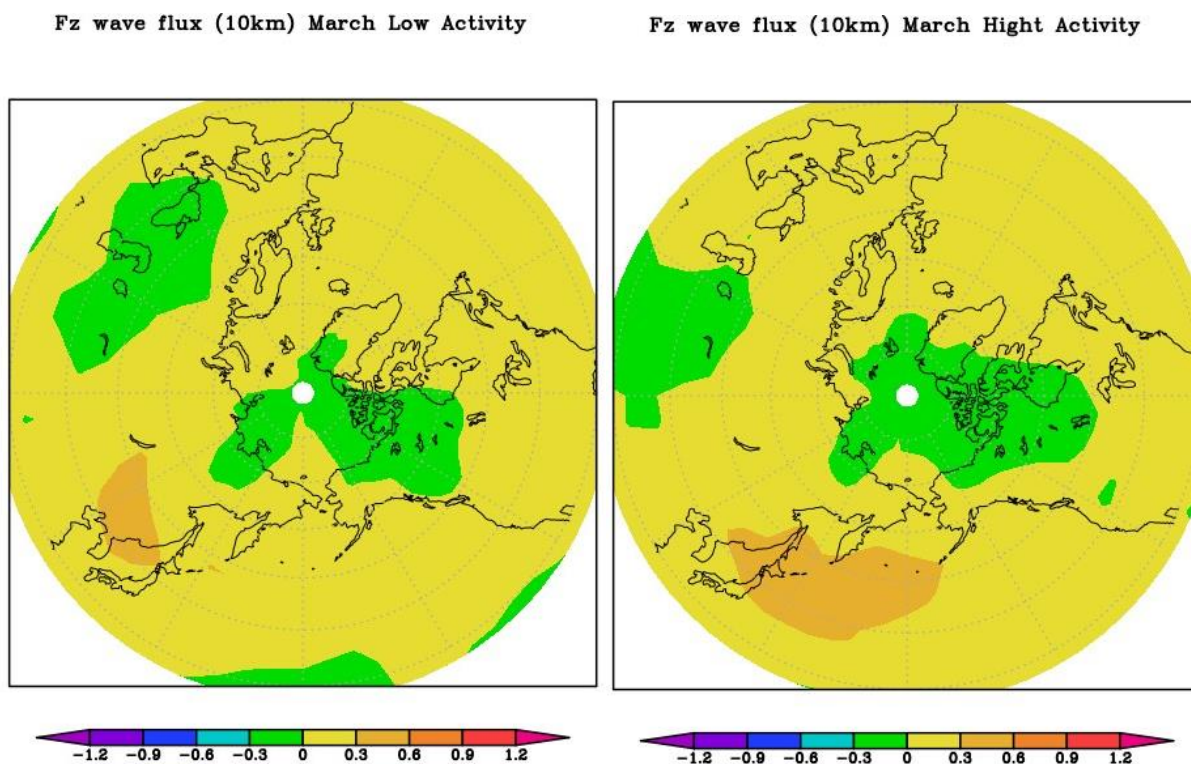


Рисунок 6.26- Осреднение за март компоненты Fz потока волновой активности на (10 км) за годы с высокой и низкой солнечной активностью при положительной СКМ

На левом рисунке мы наблюдаем положительную активность над восточной частью Китая, захватывая Корею и Японию. В то время как на правом рисунке распространение этой активности простирается дальше по Тихому океану до Аляски. Отличия между двумя рисунками в отношении отрицательных значений волнового потока Fz практически незаметны, за исключением некоторых территориальных различий.

Из данного наблюдения можно вывести закономерность и взаимосвязь в распределении волновой активности компоненты Fz в разные годы с высокой и низкой солнечной активностью (BCA и HCA). В периоды высокой солнечной

активности положительные значения волнового потока в феврале и марте на высоте 4,3 км и 7 км занимают значительно большее пространство по площади, чем в периоды низкой солнечной активности.

Отрицательные значения, напротив, на высотах 4,3 км и 7 км в феврале более распространены в периоды ВСА, в то время как в марте в годах с НСА.

На высоте 10 км во всех случаях эти различия почти не заметны или совсем отсутствуют.

После было рассмотрено осреднение за февраль компоненты F_y потока волновой активности на (4.3 км, 7 км, 10 км) за годы с высокой и низкой солнечной активностью при положительной СКМ.

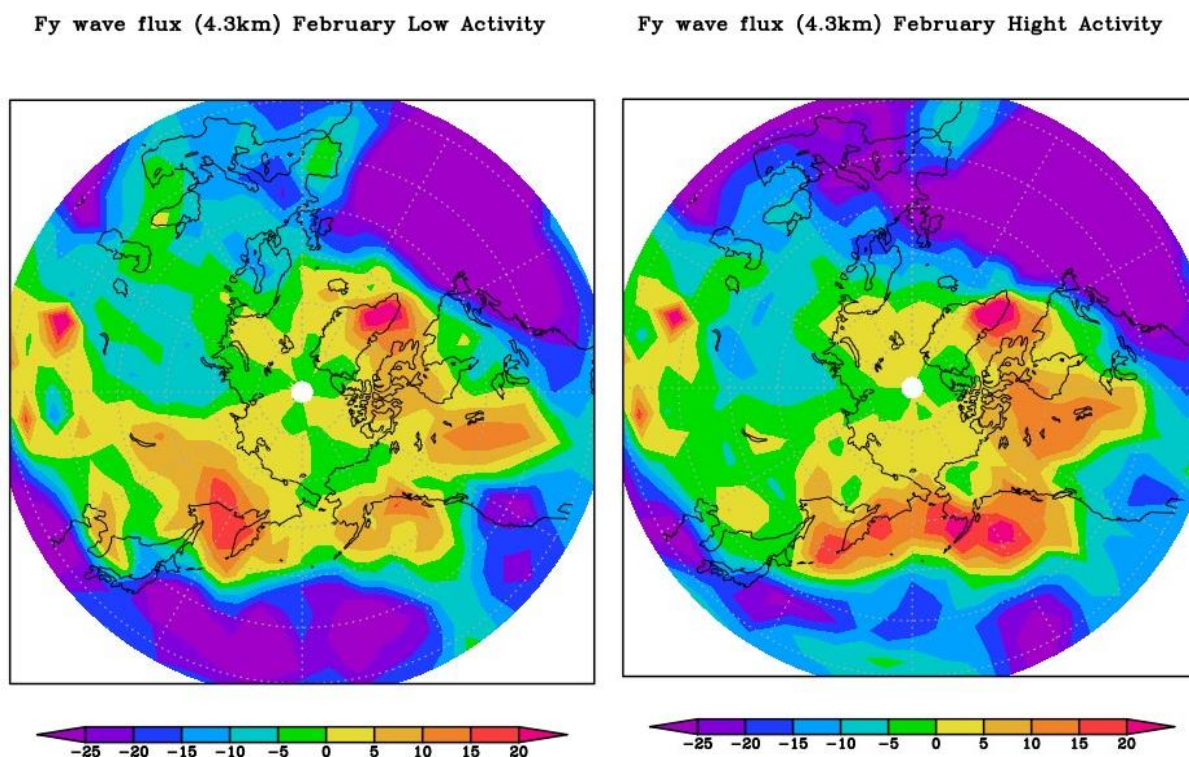


Рисунок 6.27- Осреднение за февраль компоненты F_y потока волновой активности на (4.3 км) за годы с высокой и низкой солнечной активностью при положительной СКМ

Проведя анализ представленных рисунков, мы наблюдаем, что максимальные положительные значения волновой активности компоненты F_y на левом изображении сосредоточены над Охотским морем и Гренландией, в то время как на правом изображении они проявляются преимущественно около Северо-Курильска, в Баренцевом море, у западной части Аляски и также вблизи Гренландии.

Отрицательные значения, в свою очередь, в основном проходят над водными просторами, лишь частично затрагивая сушу. По сравнению с периодами высокой солнечной активности, в годах с низкой солнечной активностью наблюдается уменьшение масштабов.

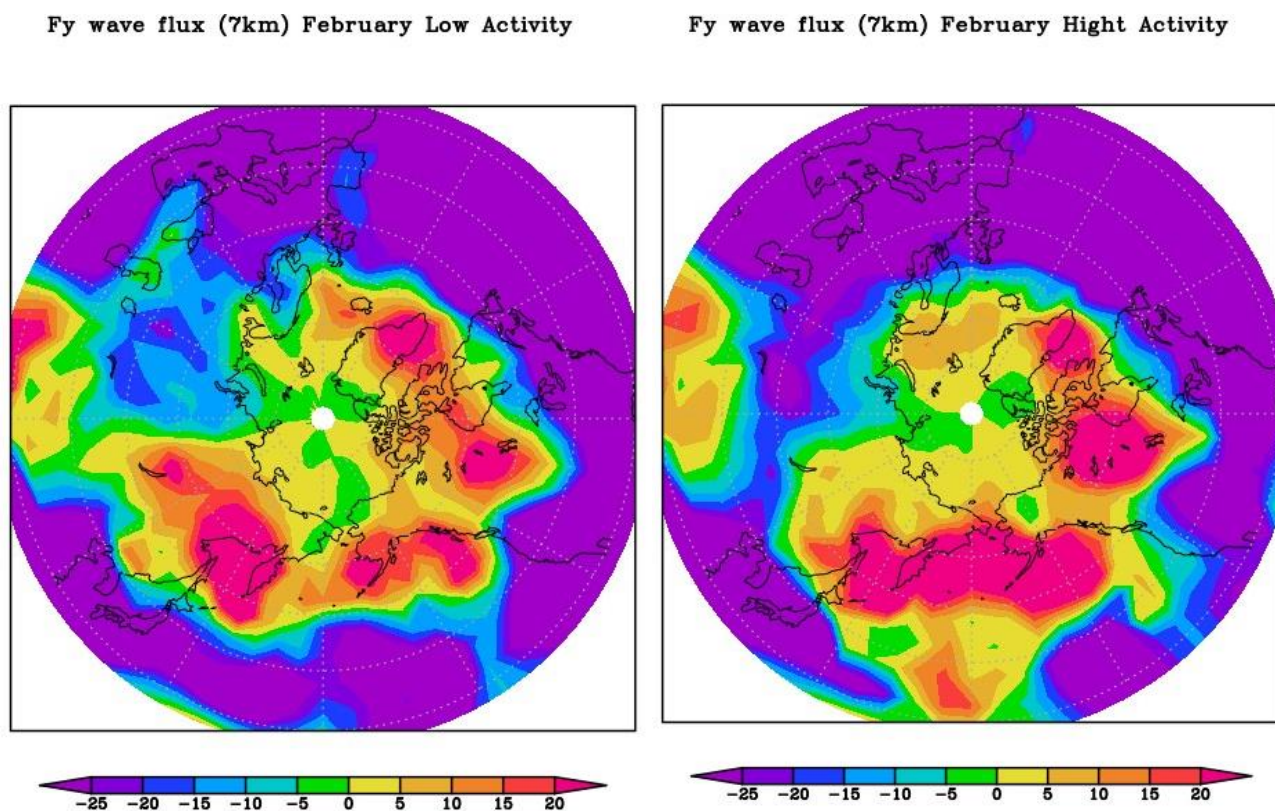


Рисунок 6.28- Осреднение за февраль компоненты F_y потока волновой активности на (7 км) за годы с высокой и низкой солнечной активностью при положительной СКМ

В годах с НСА видно, что максимальные положительные значения волновой активности компоненты F_y имеют более локальное распределение, сосредоточенное преимущественно на восточной части России, западной части Аляски, а также на территории США и Гренландии. В года с ВСА тот же паттерн распределения сохраняется, однако наблюдается значительное увеличение общей площади, которая охватывается положительными значениями, образуя более развернутые области.

Что касается отрицательных значений, схожая ситуация наблюдается что и на предыдущих графиках, указывающая на некоторую устойчивость.

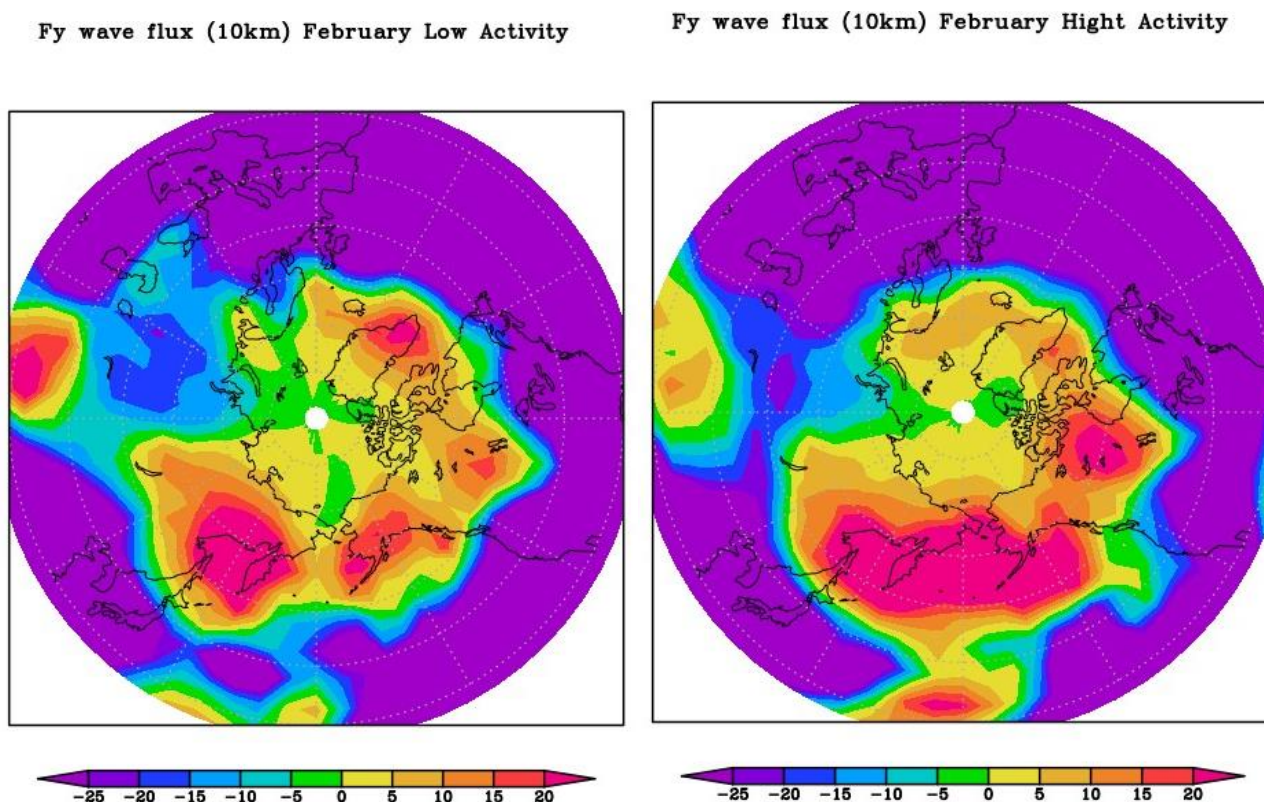


Рисунок 6.29- Осреднение за февраль компоненты F_y потока волновой активности на (10 км) за годы с высокой и низкой солнечной активностью при положительной СКМ

На данной высоте (10км) полностью идентичная ситуация, которая наблюдалась и на 4.3 км и на 7км.

Анализ данных показывает, что максимальные положительные значения волновой активности компоненты F_y имеют разное географическое распределение в зависимости от солнечной активности. В годах с низкой солнечной активностью (НСА) они локализованы, в то время как в периоды высокой активности (ВСА) охватывают большую площадь. Отрицательные значения проявляют стабильность в своем распределении. На высоте 10 км наблюдаемые тенденции аналогичны тем, что были зафиксированы на более низких высотах.

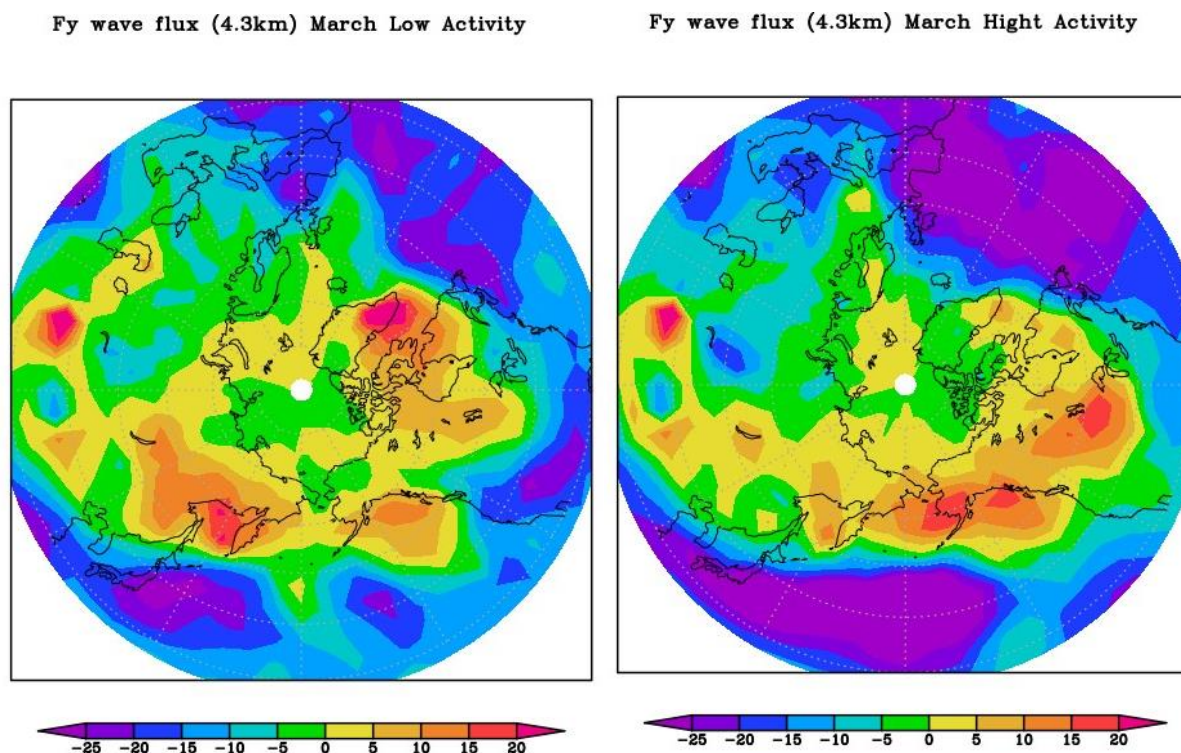


Рисунок 6.30- Осреднение за март компоненты F_y потока волновой активности на (4.3 км) за годы с высокой и низкой солнечной активностью при положительной СКМ

В года с НСА наблюдаются максимальные положительные значения волнового потока в Охотском море и около Гренландии, в то время как в периоды ВСА они выделяются в области около Аляски, США и Канады. Распределение по площади практически одинаково в обоих случаях.

Относительно отрицательных значений можно отметить, что на правой карте наблюдается более значительная площадь по сравнению с левой картой. Эти территории, как и в случае с февралем, в основном расположены над водными поверхностями.

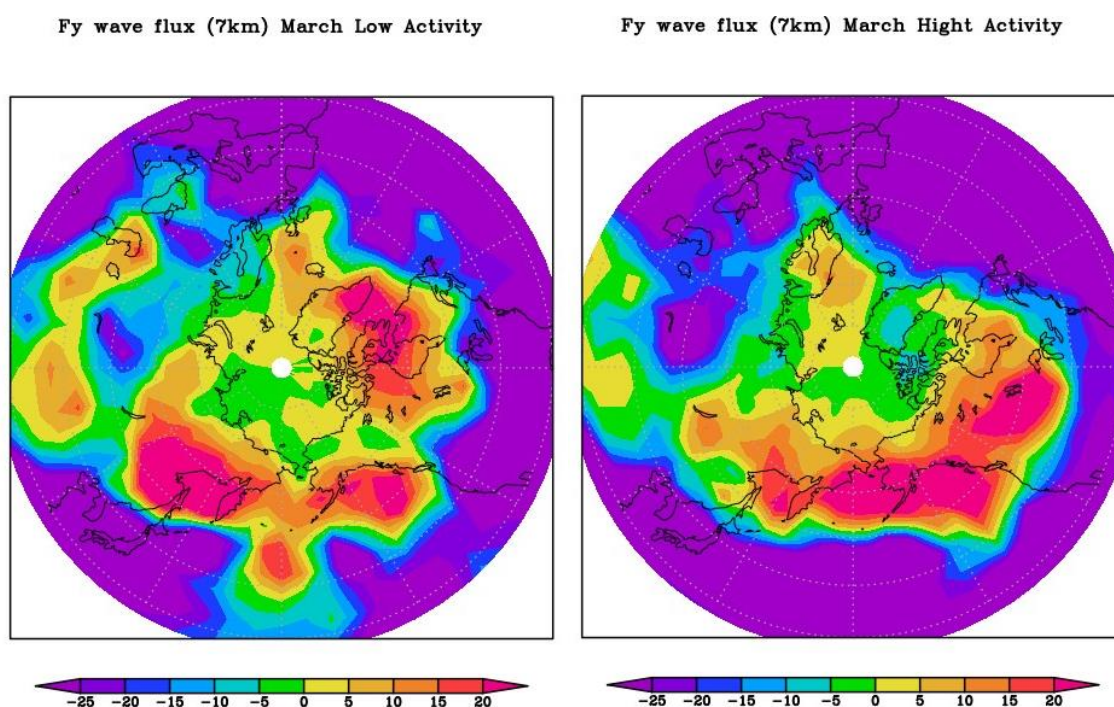


Рисунок 6.31- Осреднение за март компоненты F_y потока волновой активности на (7 км) за годы с высокой и низкой солнечной активностью при положительной СКМ

Здесь наблюдается более выраженные различия в распределении положительных значений по сравнению с аналогичными данными на высоте 4.3 км. На левом рисунке они представлены в более локальных областях, в то время как на правом рисунке наблюдается их сплошное распространение по

поверхности. С отрицательными значениями наблюдается аналогичная динамика, что и на предшествующих графиках.

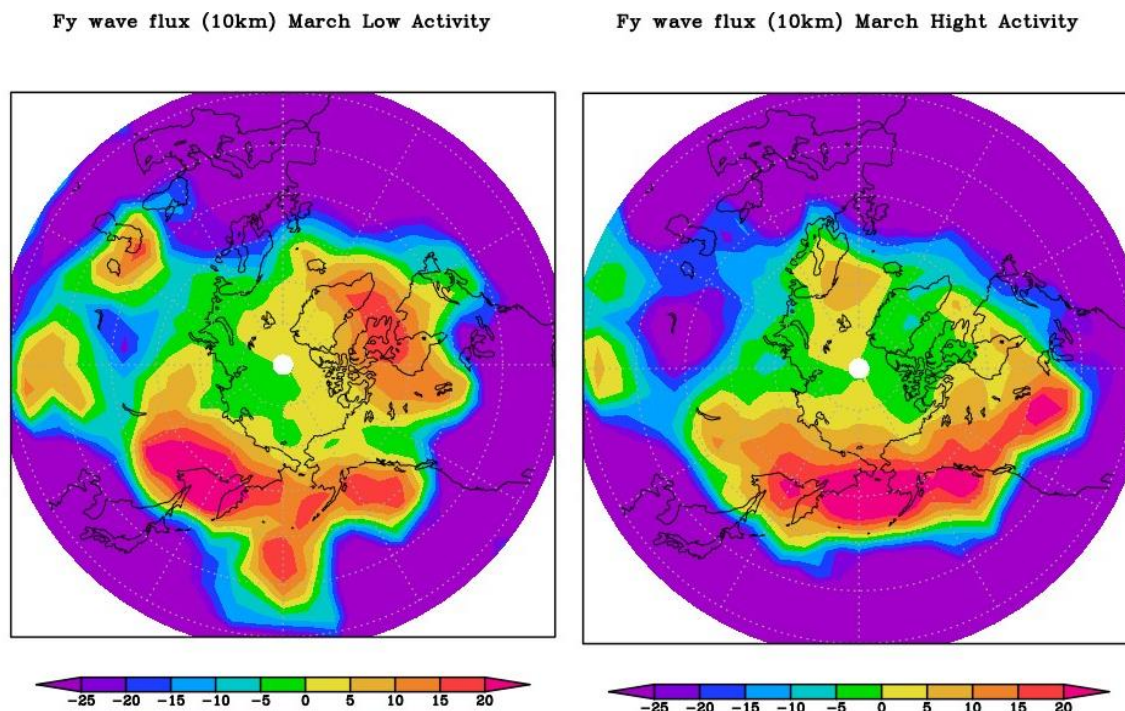


Рисунок 6.32- Осреднение за март компоненты F_y потока волновой активности на (10 км) за годы с высокой и низкой солнечной активностью при положительной СКМ

На данной высоте также наблюдаются различия в распределении положительных и отрицательных значений волновой активности компоненты F_y . Вывод о динамике и местоположении значений аналогичен предшествующим наблюдениям, отмеченным на более низких высотах.

В результате данные указывают на важные закономерности в распределении волновой активности компоненты F_y в зависимости от солнечной активности и высоты наблюдения.

Выводы: 1. Влияние солнечной активности: Распределение максимальных положительных значений меняется в зависимости от уровня солнечной активности: в периоды низкой активности они наблюдаются в локальных

позициях, а в периоды высокой активности более распространённо.

2. Устойчивость отрицательных значений: Подтверждается стабильность распределения отрицательных значений, преимущественно над водными поверхностями.

3. Влияние высоты наблюдения: На высоте 7 км наблюдается более широкое распространение положительных значений F_u по сравнению с более низкой высотой (4.3 км), что свидетельствует о различиях в динамике атмосферных явлений на разных уровнях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения данной работы были решены все поставленные задачи и сделаны следующие выводы:

1. В годы с высокой солнечной активностью и положительной фазой СКМ период высоких значений амплитуды планетарной волны в поле геопотенциальной высоты более продолжителен (до 10 дней), чем в годы с низкой солнечной активностью.

2. В года с НСА и положительной фазой СКМ максимальные значения амплитуды планетарных волн превышают те, что наблюдаются в года с ВСА (до 500 гп.м.).

Максимальные значения амплитуды для всех рассмотренных гармоник отмечаются ниже по высоте в условиях ВСА. Например, для первой гармоники: в условиях НСА – 60 км, ВСА -55 км.

3. Анализ осредненной компоненты F_z потока волновой активности для февраля и марта демонстрирует, что в годы НСА области с положительными значениями F_z на высотах 4,3 км и 7 км менее обширны в районе Алеутского минимума и на севере Атлантики, чем в годы ВСА.

Отрицательные значения F_z на высотах 4,3 км и 7 км в феврале занимают большую площадь в годы ВСА, в то время как в марте в годы НСА.

На высоте 10 км во всех случаях изменения минимальны или совсем отсутствуют.

4. Анализ осредненной компоненты F_y потока волновой активности для февраля и марта показывает, что положительные значения в годы НСА имеют более локальное распределение, в то время как в годы ВСА охватывают более

развернутую площадь. Данное наблюдение сохраняется на всех рассмотренных высотах.

Отрицательные значения в высокую солнечную активность занимают большую площадь, чем в года с низкой солнечной активностью, проявляя стабильность в своем распределении на разных высотах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.Статья с сайта ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY/ Solar Radiation Basics/ Электронный источник: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-radiation-basics> .
- 2.И. В. Боровко, В. Н. Крупчатников /Влияние динамики стратосферного полярного вихря на циркуляцию в нижней тропосфере/ Сибирский журнал вычислительной математики, 2009, том 12, номер 2, страницы 145–160.
3. Jacso P. Google Scholar (redux). [Web document]. Jun 2005. [cited 10 Sep 2005].
4. "Atmospheric Science: An Introductory Survey"/ by John M. Wallace и Peter V. Hobbs.- 24 mart. 2006 г.
- 5.И. Гечайте, А.И. Погорельцев, А.И. Угрюмов /Волновое взаимодействие стратосфера-тропосфера как предвестник аномальных похолоданий в восточной части Балтийского региона/ Учебные записки №43.-июль 2016.
6. STRATOSPHERE–TROPOSPHERE EXCHANGE | Global Aspects/ J.R. Holton, in Encyclopedia of Atmospheric Sciences.- 2003.
7. Solar cycle influence on troposphere and middle atmosphere via ozone layer in the presence of planetary waves: Simulation with ARM/ A. A. Krivolutsky, L. A. Cherepanova, A. V. Dement'eva.-08 October 2015.
8. Теория общей циркуляции атмосферы: учебное пособие / Ю.П. Переведенцев, И.И. Мохов, А.В. Елисеев и др.; науч. ред. Э.П. Наумов. – Казань: Казан. ун-т, 2013. – 224 с.
9. Нестеров Е.С Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. //Гидрометеорологический научно-исследовательский центр.-2013.
10. КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СТРАТОСФЕРНО-ТРОПОСФЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ, НАБЛЮДАЕМАЯ В ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯТ/ статья по специальности «Науки о Земле и смежные экологические науки, Диденко К.А.
11. The Stratosphere and its Coupling to the Troposphere and Beyond/ Edwin P. Gerber.

12. Электронный источник: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/nao/>
13. Solar influences on Climate/ PROFESSOR JOANNA HAIGH /Grantham Institute for Climate Change Briefing paper No 5/- February 2011.
- 14.Статья Solar radiation and temperature/ электронный источник: <https://www.britannica.com/science/climate-meteorology/Solar-radiation-and-temperature>.
15. Электронный источник: <https://angeo.copernicus.org/>