



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: «Влияние квазидвухлетних колебаний на динамический режим
зимней стратосферы »

Исполнитель Талалуева Софья Александровна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)
Савенкова Елена Николаевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой



(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 03 » июня 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. История исследования КДК. Современное состояние вопроса изучения влияния КДК на динамику атмосферы	6
1.1 История исследования КДК	6
1.2 Попытки объяснения феномена КДК.....	8
2. Влияние квазидвухлетних колебаний на динамические процессы и их представление в моделях.....	10
2.1 Квазидвухлетние колебания.....	10
2.2 Численные модели для воспроизведения КДК	15
3. Принципы деления квазидвухлетних колебаний на фазы	18
4. Данные, используемые в работе	22
5. Анализ полученных результатов	24
5.1. Анализ направления зонального ветра за 42 года для выявления восточной и западной фаз КДК	24
5.2 Разница между зональным ветром восточного и западного направлений.	25
5.3 Анализ амплитуд СПВ в высотно широтном разрезе за западную и восточную фазы КДК.....	28
5.4 Анализ разницы амплитуд между восточной и западной фазами КДК за месяц	35
5.5 Анализ среднеквадратичного отклонения (СКО) амплитуд СПВ и вариативности СКО	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ВЫВОДЫ.	54
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	56

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

КДК — квазидвухлетнее колебание

СПВ — стационарная планетарная волна

СКО — среднеквадратичное отклонение

MERRA-2 — Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2

МЮ — колебание Мэддена-Джулиана

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее внимание уделяется изучению атмосферных явлений и их влиянию на климатические процессы нашей планеты. Особое внимание ученых привлекает стратосфера — слой атмосферы, расположенный выше тропосферы и ниже мезосферы. Стратосфера — это важный слой атмосферы Земли, который играет значительную роль в климатических процессах и обмене энергии между верхней и нижней атмосферой. Динамические процессы в стратосфере оказывают сильное влияние на климатические условия нашей планеты.

Радиозондовые и ракетные наблюдения в экваториальной стратосфере указывают на наличие цикличности воздушных течений. Квазидвухлетние колебания (КДК) — атмосферные колебания в стратосфере, представляющие собой распространяющиеся вниз переменные восточные и западные ветры с периодичностью около 28 месяцев. Существуют квазидвухлетняя цикличность в верхней стратосфере и шестимесячная в нижней, которые, вдобавок, взаимосвязаны друг с другом. Эти колебания имеют большое значение для климатической системы Земли, поскольку они могут влиять на распространение тепла и характер циркуляции атмосферы. К тому же они оказывают существенное влияние на атмосферную динамику средних и высоких широт.

Актуальность данной работы заключается в изучении квазидвухлетних колебаний для улучшения прогнозов погоды и климата, а также для более точного понимания атмосферных процессов. Понимание механизмов, определяющих динамику стратосферы, имеет большое значение для прогнозирования и понимания климатических изменений.

Целью данной дипломной работы является исследование влияния квазидвухлетних колебаний на динамический режим зимней стратосферы.

Список задач, необходимых для достижения поставленной цели:

- 1) Установление фазы колебаний для каждого месяца за период сорока двух лет, которые составлены по данным направления зонального

ветра над экватором на высоте 30 гПа. Определение восточной и западной фазы колебаний КДК для зимних месяцев в разные годы;

2) Применение гармонического анализа к полю данных геопотенциальной высоты по долготе, полученных из реанализа MERRA-2 за каждый год;

3) Вычисление амплитуды, разницы амплитуд, среднеквадратичного отклонения амплитуд стационарной планетарной волны в зимние месяцы для восточной и западной фаз КДК по годам. Построение высотно-широтного разреза с помощью интерактивной системы GrADS (Grid Analysis and Display System);

4) Анализ изменения амплитуды в геопотенциальной высоте в зависимости от фазы КДК;

5) Анализ разницы амплитуд между восточной и западной фазами КДК внутри одного месяца;

6) Анализ среднеквадратичного отклонения амплитуд СПВ и вариативности СКО;

7) Заключение по результатам работы.

1. История исследования КДК. Современное состояние вопроса изучения влияния КДК на динамику атмосферы

1.1 История исследования КДК

Радиозондовые и ракетные наблюдения в экваториальной стратосфере указывают на наличие цикличности воздушных течений. Существуют квазидвухлетняя цикличность в верхней стратосфере и шестимесячная в нижней, которые, вдобавок, взаимосвязаны друг с другом.

Квазидвухлетние колебания (КДК) – атмосферные колебания в стратосфере, представляющие собой распространяющиеся вниз переменные восточные и западные ветры с периодичностью около 28 месяцев.

В конце XIX – начале XX вв. были открыты ветры Кракатау и Берсона. Ветры Кракатау были обнаружены после сильного извержения вулкана Кракатау в 1883 г.. После извержения вулканический пепел за две недели обогнул планету с востока на запад. Такие стратосферные ветры восточного направления получили название ветры Кракатау [1].

Ветры Берсона – ветры, дующие с запада на восток в стратосфере. Были открыты немецким метеорологом А. Берсоном в 1908 г.. Он запускал метеорологические зонды в тропической Африке и обнаружил ветры западного направления вблизи тропопаузы.

Данные метеорологического зондирования в начале XX в. не давали полной картины сменяемости ветров Кракатау и Берсона. В 1954 году Палмер использовал данные зондирования верхних слоев атмосферы, собранные для изучения радиоактивных осадков в результате ядерных испытаний на Маршалловых островах, чтобы обнаружить, что переход между западными ветрами Берсона и восточными ветрами Кракатау менялся от месяца к месяцу и из года в год. Тогда обнаружили переход между ветрами Берсона и Кракатау с течением времени. Однако этих данных было

недостаточно, чтобы показать какую-либо периодичность. Периодичность этой сменяемости ветров была выявлена после наблюдений на острове Рождества через несколько лет. Грейстоун в 1959 году составил график скоростей ветра за 2 года в плоскости время-высота, который показал постепенно опускающиеся восточный и западный режимы ветра. Было открыто, что ветры имеют двухлетнюю сменяемость.

Открытие квазидвухлетних колебаний принадлежит американскому физику Р. Риду и англичанину Р. А. Эбдону. В статье “Циркуляция стратосферы” Рид объявил об открытии чередующихся полос восточных и западных ветров, которые возникают на высоте 30 км и движутся вниз через стратосферу со скоростью около 1 км в месяц. Им были исследованы данные радиозондирования атмосферы с острова Гуанчжоу в Китае. В работе изложено о существовании сменяемости направления ветра, о его движении и периодичности. Благодаря этим данным было установлено, что стратосферный ветер имеет свое начало на высоте более 30 км и движется вниз со скоростью примерно равной 1 км/мес без потери скорости [2]. Сменяемость направления ветра с восточного на западное происходит раз в 14 месяцев. Период полных ветровых стратосферных колебаний составляет от 26 до 28 месяцев. Наряду с ветровыми колебаниями цикл колебаний метеорологических характеристик стратосферного воздуха составляет такую же длительность.

Эбдон в 1960 также использовал данные с острова Гуанчжоу, охватывающие 1954-1959 годы, чтобы показать, что колебания ветра имели очевидный двухлетний период. Эбдон и Верьярд (1961 г.) использовали дополнительные данные с острова Гуанчжоу на уровне 50 ГПа, чтобы показать, что ветер колебался с периодом 25-27 месяцев, а не ровно 2 года. Они расширили предыдущее исследование, включив в него другие экваториальные станции, и пришли к выводу, что колебания ветра происходили одновременно по всему экваториальному поясу, и подсчитали,

что ветровым режимам потребовалось около года, чтобы опуститься с уровня 10 гПа до уровня 60 гПа [3]. Верьярд и Эбдон [1961] расширили это исследование, чтобы найти доминирующий период в 26 месяцев, и наблюдали аналогичные колебания температуры.

Сам термин квазидвухлетних колебаний был введен в результате изучения колебаний зонального ветра по данным долгопериодных наблюдений Д. К. Ангеллом и Д. Коршовером в 1964 году.

1.2 Попытки объяснения феномена КДК

Со времен открытия явления квазидвухлетних колебаний ведутся попытки объяснить данный феномен. К сожалению, окончательный ответ о возникновении КДК до сих пор не ясен. Тем не менее, многие ученые пытались выяснить причину формирования этого феномена вплоть с шестидесятых годов XX в.

Так, велись попытки смоделировать квазидвухлетние колебания с помощью численных моделей атмосферы. Например, во время исследования КДК Уоллесом и Холтоном в 1968 с помощью численной модели было показано, что импульса планетарных волн для распространяющихся вниз КДК не достаточно. Такие волны не смогут распространяться вниз без уменьшения амплитуды. Из этого следует, что необходим некий источник импульса, способный осуществить опускание колебаний.

В этом же году Линдсен заявил, что в качестве импульса могут служить гравитационные волны, которые распространяются вверх. Его численная модель, созданная совместно с Холтоном, показала, что для осуществления КДК имеет место широкий спектр таких гравитационных волн. У них удалось смоделировать колебание, представляющее из себя опускающиеся вниз восточные и западные ветры.

Моделирование КДК посредством экваториальных гравитационных волн проводилось практически одновременно с созданием теории об экваториальных волнах. Данная теория рассматривала волны Россби и волны Кельвина, которые как раз и смоделировали КДК.

В 1967 году в работе [4] было рассмотрено влияние волн Россби. Так, влияние этих волн в западном направлении способно дать толчок для возникновения восходящего потока с западным импульсом, дающим западное ускорение для КДК. Такой же результат получился при рассмотрении в 1968 году Уоллесом и Коуски гравитационных волн Кельвина.

В дальнейшем Холтон и Линдстен создали модель на основе гравитационных волн Кельвина и Россби, распространяющихся в вертикальном направлении. Эти волны создавали западный и восточный импульс соответственно. Амплитуды полученных волн оказались невелики, но способны генерировать КДК [5].

Однако такие амплитуды волн могли генерировать КДК в моделях идеальной атмосферы. В 1989 году Грей и Пайл при моделировании радиационно-динамических процессов решили, что таких значений амплитуд недостаточно для создания близких к реальным квазидвухлетних колебаний, поэтому они были увеличены в три раза [6].

Исследования ветровых режимов КДК Данкертона показали, что влияния гравитационных волн, рассмотренных выше, не достаточно для генерации КДК с наблюдаемым периодом. Для возникновения этого феномена необходима дополнительная сила, которая могла бы создаваться большим спектром волн гравитации [7].

2. Влияние квазидвухлетних колебаний на динамические процессы и их представление в моделях.

2.1 Квазидвухлетние колебания

Квазидвухлетние колебания (КДК) - одно из самых загадочных и завораживающих природных явлений имеет необычный период ~ 28 месяцев и характеризуется чередованием западного и восточного направлений ветра, распространяющихся вниз от верхней к нижней стратосфере. КДК также является одной из наиболее важных межгодовых переменных в атмосфере и оказывает динамическое влияние на глобальную циркуляцию от тропосферы до мезосферы, от тропиков до полюсов. Он также модулирует распределение химических компонент, таких как озон и метан, и влияют на возникновение тропических циклонов над тропическими океанами [8].

На рис.1 представлен высотно-временной разрез восточной и западной фаз КДК за 40 лет. Как мы видим, на разных высотах наблюдается разная фаза квазидвухлетних колебаний.

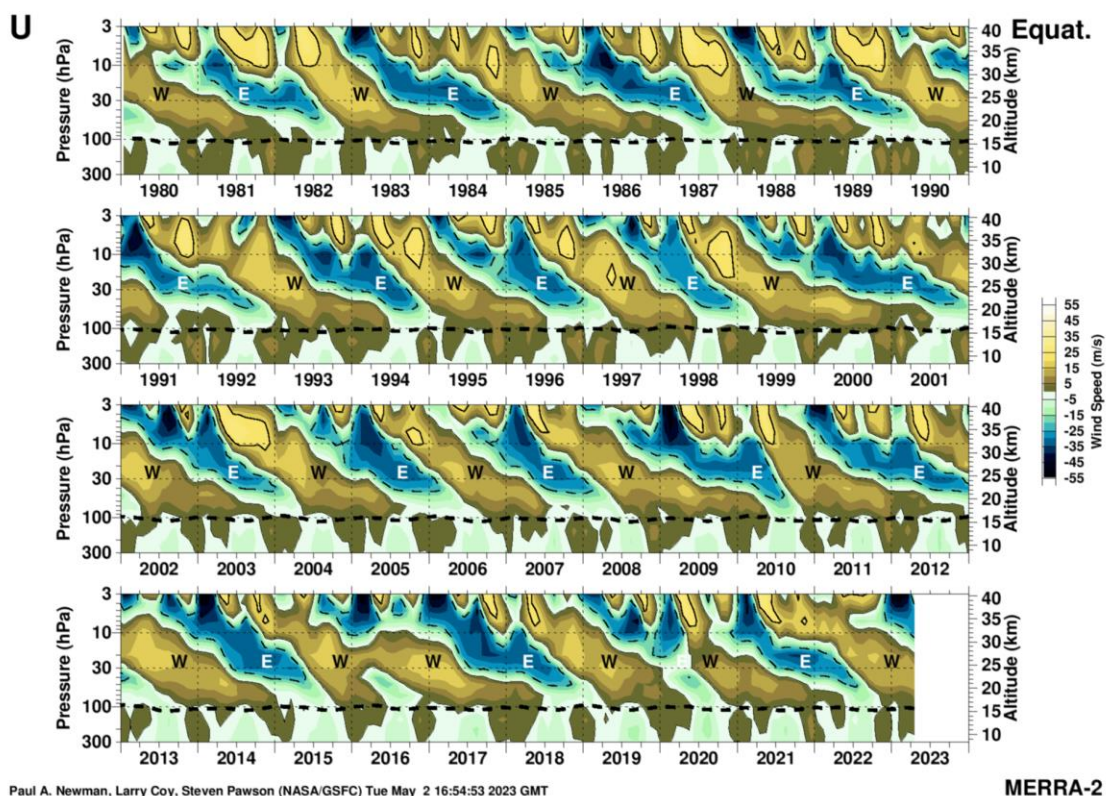


Рисунок 1 — высотно-временное распределение фаз квазидвухлетних колебаний за период 1980-2023 гг. по данным реанализа MERRA-2.

За последние несколько десятилетий был разработан ряд теорий, объясняющих КДК. Теперь хорошо известно, что он обусловлен взаимодействием волновых потоков волн, распространяющихся вверх из тропосферы. Были некоторые споры относительно типа волн, о которых идет речь, т.е. крупномасштабных гравитационных волн Россби и волн Кельвина и/или мезомасштабных внутренних гравитационных волн. В настоящее время признано, что для генерации достаточно большого вертикального потока импульса для приведения в действие КДК должны присутствовать потоки гравитационных волн. КДК был довольно успешно смоделирован с использованием одномерных моделей, в которых волны взаимодействуют со средним потоком, но межволновые взаимодействия игнорируются [9].

Квазидвухлетние колебания связаны с явлением Эль-Ниньо, которое воздействует на амплитуды планетарных волн в тропосфере.

Внезапное стратосферное потепление, сопровождающееся быстрым ростом температуры полярной стратосферы (до 70 градусов за несколько дней) является одним из интереснейших явлений-побочных результатов взаимодействия тропосферы и стратосферы. Как показали последние исследования, внезапные стратосферные потепления могут быть вызваны не только проникновением из тропосферы планетарных волн, но и некоторыми другими явлениями. Например, восточная фаза квазидвухлетнего колебания может вызвать внезапное стратосферное потепление.

В экваториальной зоне на высотах выше 35 км существует шестимесячный цикл экваториальной циркуляции с западными ветрами в переходные сезоны. Через примерно 27 месяцев западные потоки этого цикла проникают в среднюю стратосферу, возбуждая западные потоки квазидвухлетних колебаний. Образовавшийся таким образом зональный перенос постепенно распространяется вниз со скоростью примерно равной 1 км в месяц. Средняя продолжительность квазидвухлетнего цикла составляет 26 месяцев на высоте 23 км, где прослеживаются наибольшие амплитуды. Ближе к тропикам и выше 35 км амплитуда колебаний убывает, уступая место амплитуде годового периода. Исследования 1963-1965 годов показали, что размеры горизонтального распространения квазидвухлетних колебаний тесно взаимосвязаны с сезонными характеристиками стратосферной циркуляции обоих полушарий.

Вэб показал, что в периоды весеннего и осеннего равноденствия наблюдается проникновение ультрафиолетовых лучей в толщу верхней атмосферы. Ученый заключил, что именно это является причиной возникновения меридионального градиента температуры, существующего по обе стороны от экватора. Существование такого градиента обуславливает возникновение западных ветров в верхней стратосфере [10].

Квазидвухлетние колебания имеют связь с меридиональной циркуляцией атмосферы. Например, западный ветер, спускающийся в стратосфере тропиков, может отклонять движения воздуха в сторону экватора, из чего следует нагревание тропопаузы. Но во внетропических широтах приводит к охлаждению тропопаузы. Генерируемые орографией и разницей нагрева между материками и океанами, планетарные волны проникают в стратосфере и влияют на среднезональный поток и температуру средней атмосферы [11]. В результате исследований было доказано, что квазидвухлетние колебания могут смоделировать ветер и конвекцию в верхней тропосфере. Западные КДК могут привести к росту конвективных облаков в результате отклонения антициклонических вихрей, а восточные КДК приводят к увеличению диаметра облаков.

Так, важной особенностью циркуляции верхней экваториальной стратосферы является проникание мезосферных западных ветров. Это проникание (или опускание) можно назвать периодическим процессом, т. к. он осуществляется регулярно в переходные сезоны. Иными словами, периодические колебания в стратосфере вызваны сезонной сменой циркуляции в высоких умеренных широтах.

Цикличность метеорологических характеристик и циркуляции внетропических широт была обнаружена до открытия квазидвухлетних колебаний. Связь между КДК и цикличностью помогают понять колебания течений в стратосфере и в общей циркуляции атмосферы. Западные ветры нижней экваториальной стратосферы представляют собой узкое изолированное кольцо, постоянно существующее в слое 20—25 км [10]. Благодаря наличию квазидвухлетних колебаний в стратосфере эти западные ветры эволюционируют по вертикали.

При такой циркуляции в экваториальной стратосфере присутствует цикличность переносов в обоих полушариях, которая длится один год

(восточный перенос сменяется западным и наоборот). В тропической зимней стратосфере преобладает антициклон, а в стратосфере умеренных широт – циркумполярный циклонический вихрь. В летней стратосфере распространяется циркумполярный антициклонический вихрь во всем полушарии. Данная циркуляция показывает связь квазидвухлетних колебаний с муссонной сменой внетропических широт и отражает глобальную сезонную циркуляцию атмосферы, как в северном, так и в южном полушариях.

Любая связь между экваториальным КДК и внетропической атмосферой должна рассматриваться в контексте сезонного цикла изменчивости внетропической стратосферы. По сравнению с тропосферой зональная циркуляция во внетропической стратосфере характеризуется гораздо более сильным сезонным циклом с фактическим изменением направления ветров в зимний и летний периоды. В зимний сезон стратосфера высоких широт охлаждается, образуя глубокий, сильный западный вихрь. Сильные западные ветры сменяются восточными с усилением солнечного нагрева весной и летом. В обоих полушариях плавно изменяющийся сезонный цикл, описанный выше, изменяется под воздействием планетарных волн Россби, которые частично вызваны контрастами суши и моря и рельефом поверхности. Эти волны распространяются вертикально и меридионально в зимнюю стратосферу, но при средних восточных ветрах летнего полушария они затухают [12].

Северное полушарие имеет гораздо больший контраст между сушей и морем и более крупные горные хребты, чем южное, что приводит к большей амплитуде планетарных волн. Следовательно, северная зимняя стратосфера, как правило, гораздо больше подвержена планетарным волнам, чем южная зимняя стратосфера. Волны большой амплитуды могут быстро разрушить северный полярный вихрь даже в середине зимы, заменяя западные ветры восточными в высоких широтах и вызывая резкое потепление полярной

стратосферы. Такие события называются внезапными стратосферными потеплениями. Переход от западного направления ветра к восточному весной обычно происходит в сочетании с планетарным волновым событием и называется финальным внезапным стратосферным потеплением. В северном полушарии сроки финального стратосферного потепления сильно варьируются и, как правило, приходится на март или апрель. На юге финальное стратосферное потепление наступает в ноябре и декабре, с меньшей межгодовой изменчивостью.

Переход от зимней циркуляции к весенней, летней и осенней в низких широтах сохраняет движение восточных ветров и восточного потока в стратосфере в целом, а также для смены КДК цикличности с западной на восточную.

2.2 Численные модели для воспроизведения КДК

Была обнаружена связь между распространением планетарных волн и влиянием на генерацию квазидвухлетних колебаний. К колебаниям имеют отношение волны Кельвина и Россби, инерционно-гравитационные волны и гравитационные волны. Их зональные длины обуславливают влияние на квазидвухлетние колебания [13]. Если зональная длина мала, то волны будут захватываться на высотах, в которых они сформировались, что в результате не оказывает существенного влияния на колебания.

С 1960-х годов XX столетия интерес к исследованию квазидвухлетних колебаний поспособствовал попыткам воспроизвести КДК с помощью численных моделей. Так как фазы квазидвухлетнего колебания характеризуются потоком волновой активности из стратосферы в тропосферу, то были разработаны модели, рассматривающие такое волновое влияние.

Например, численная модель Линдсена-Холтона показывала, как возбуждаются колебания благодаря распространяющемуся вверх спектру волн. Связь волн гравитации со средним зональным потоком дает толчок для возникновения квазидвухлетних колебаний. Результатом моделирования было получение восточного и западного ветра, который распространяется вниз. А вследствие улучшения модели была получена связь формирования колебаний с нелинейным распространением экваториальных волн с зональным ветром. Такое взаимодействие обусловлено планетарными волнами Россби и Кельвина [14].

Белмонт и Дарт пытались смоделировать КДК в продольно-симметричной атмосфере. Результатом их работы стало понимание того, как влияет сила Кореолиса на колебания. Так, вращающий момент способен уменьшить амплитуды ветровых колебаний при отдалении от Экватора.

Модель Пламба генерирует колебания при взаимодействии двух равных по длине и амплитуде гравитационных волн и среднего потока. При поднимании этих волн их скорость падает, пока волны не затухнут по достижении зоны сдвига. Если эта зона опустится, это приведет к разрушению ветра западного направления на низких уровнях. При вертикальном перемещении вверх волны западного направления на более высокие уровни атмосферы, на которых генерируются западные ветры. Восточный ветер генерируется похожим образом. Отсюда был сделан вывод о том, что период квазидвухлетних колебаний обратно пропорционален потоку импульса.

Трехмерная механистическая модель, созданная Такахаши и Бовиллом в 1992 году, в которой волны Кельвина и гравитационные волны Россби были вытеснены на нижней границе, хорошо отражает КДК в нижней стратосфере. Однако амплитуды волн Кельвина и, в частности, гравитационных волн Россби были значительно сильнее наблюдаемых

значений. Этот результат добавил доказательств того, что необходим гораздо более широкий спектр волн.

Трудности при численном моделировании КДК возникают, когда необходимо смоделировать волны, генерирующие данные колебания. Наибольшие трудности представляют волны гравитации мелкого масштаба, которые возникают в результате глубокой конвекции. Ожидается, что улучшенное представление процессов, управляющих КДК, приведет к улучшению прогнозов колебаний и их последствий [15].

Многие климатические модели в настоящее время способны имитировать колебания, подобные КДК, но с систематическими ошибками, включая слабую амплитуду в самых нижних слоях стратосферы. Улучшение представления о КДК в моделях является сложной задачей из-за неопределенностей в наблюдениях и в понимании волн, которые управляют колебаниями. Климатические модели прогнозируют будущее ослабление амплитуды КДК. Хотя КДК исторически был очень предсказуем, с 2016 года его регулярный цикл дважды прерывался по причинам, которые пока не совсем понятны.

Улучшение представления КДК в моделях является сложной задачей из-за неопределенностей в наблюдениях и в понимании волн, которые управляют колебаниями. Климатические модели прогнозируют будущее ослабление амплитуды КДК.

Благодаря моделям удалось понять, что западный поток является менее устойчивым, интенсивным и продолжительным. Различия в характеристиках этих ветровых потоков в стратосфере заключается в циркуляции тропической зоны. Так, при потоках одного направления господствуют циклоны, а при потоках другого – антициклоны (западный и восточный потоки).

3. Принципы деления квазидвухлетних колебаний на фазы

Считается, что глобальный эффект КДК зависит от его фазы и структуры. Однако существующие определения фазы и силы КДК остаются неоднозначными. Предыдущие исследования рассматривали тропические зональные ветры на 70, 50, 45, 40, 30, 20, и/или 10 гПа, не принимая во внимание характеристику распространения КДК в экваториальной стратосфере. Разделив эволюцию КДК на несколько фаз, а не только на две (западную и восточную), можно получить более глубокое представление о динамике КДК, особенно ее глобальных последствиях.

Понимание фаз КДК (западной или восточной) важно для изучения их влияния и оперативного применения. Однако, существующие средства определения состояния и силы КДК остаются неоднозначными. Предыдущие исследования рассматривали экваториальные зональные ветры на 70, 50, 45, 40, 30, 20, и 10 гПа. Холтон и Тан (1980) определили фазу КДК, используя экваториальный зональный ветер на высоте 50 гПа [8]. Впоследствии в многочисленных исследованиях использовался уровень 50 гПа для определения фаз КДК.

Существуют множество путей деления КДК на фазы. Например, метод, предложенный Фридрихом и Уоллесом (1993), который основан на разложении колебаний экваториального зонального потока с использованием эмпирического анализа ортогональных функций [16]. Это разложение в основном аналогично анализу Фурье, однако, вместо использования синусоид этот подход использует базисные функции, определенные из анализируемых полей. Это позволяет обнаруживать крупномасштабные пространственно-временные закономерности, которые не обязательно представлены волнами. Эмпирический анализ ортогональных функций более объективен по сравнению с классическим одноуровневым индексом КДК, поскольку позволяет изучать вертикальную эволюцию изменений ветра в определенных диапазонах высот. Более того, благодаря

сохранению ортогональности во времени и пространстве, эмпирический анализ ортогональных функций обеспечивают оптимальную декомпозицию необработанных данных.

Определение фазы КДК проводится на разных высотах. Например, Данкертон и Болдуин (1991) использовали экваториальный зональный ветер на высоте 40 гПа в Сингапуре для представления амплитуды и фазы КДК. Они также исследовали связанные с КДК потоки планетарных волн Элиассена-Пальма зимой. В других исследованиях также использовался экваториальный зонально-средний зональный ветер на высоте 40 гПа (Рузмайкин и др., 2005). Наиболее интенсивный сигнал КДК наблюдался на уровне около 30 гПа [17], поэтому экваториальные зональные ветры со средним значением на уровне 30 гПа также часто используются.

Некоторые исследования также рассматривали максимальную амплитуду КДК на уровне около 20 гПа или 30 км [18] и использовали экваториальные зональные ветры на этих уровнях. Фаза КДК также определяется зональными ветрами на уровне 10 гПа [19].

В некоторых исследованиях рассматривалась особенность КДК вертикального сдвига зонального ветра в экваториальной нижней стратосфере, где в качестве индекса КДК использовался экваториальный вертикальный зональный сдвиг ветра на разных уровнях, таких как экваториальный сдвиг ветра от 10 до 70 гПа [20], экваториальный зональный сдвиг ветра от 30 до 50 гПа [21], средняя по тропикам (10° южной широты - 10° северной широты) зональная разница ветров от 30 до 70 гПа [22].

Существует несколько определений фазы КДК, так как экваториальные западные и восточные ветры периодически распространяются от верхней стратосферы до нижней стратосферы. Поэтому при исследовании влияния КДК на внетропическую циркуляцию следует учитывать чувствительность выбранного определения фазы КДК.

Некоторые исследования показали, что сильные сигналы КДК внетропического Северного полушария могут быть обнаружены при рассмотрении экваториального КДК на уровне около 40 гПа, в то время как сигналы Южного полушария могут быть получены с использованием уровня, близкого к 25 гПа [23]. Для извлечения эволюции КДК на протяжении полного цикла в других исследованиях использовались эмпирическая ортогональная функция (EOF) и многоточечная декомпозиция сингулярных значений в частотной области [24]. Эти методы позволяют получить различные фазы КДК.

С увеличением доступных типов наблюдений и углублением исследований внетропического влияния КДК, становится все более очевидной причинно-следственная связь между КДК и внетропической зимней стратосферной циркуляцией [25].

КДК - одно из наиболее важных и интересных явлений в средней атмосфере, привлекающее внимание исследователей. Однако определение индекса КДК все еще вызывает неоднозначность. Для определения фаз КДК использовались экваториальные зональные ветры на различных уровнях атмосферы (70, 50, 45, 40, 30, 20 и 10 гПа), а также зональный сдвиг ветра. Однако существующие определения игнорируют характеристики распространения и периодичности КДК. Обычно фаза КДК на определенном уровне длится около 12 месяцев. Это означает, что при рассмотрении фазы КДК на одном уровне игнорируются ее распространение и эволюция.

Кроме того, низкий индекс КДК на определенном уровне не всегда указывает на низкую амплитуду КДК в текущий момент. Возможно, индекс не учитывает пик скорости ветра КДК, который может наблюдаться на другом уровне. Учитывая, что КДК является распространяющимся и периодическим явлением, его разделение только на две фазы - это слишком упрощенный подход. Хорошим примером более сложного разделения

является колебание Мэддена-Джулиана (МЮ) в атмосферной науке. МЮ имеет 8 или более фаз, в то время как КДК обычно разделяется только на две фазы.

Анализ КДК с большим количеством фаз позволил бы лучше понять его влияние на различные аспекты атмосферы. Например, влияние КДК на среднезональную температуру в субтропических и полярных регионах в зимний и летний сезоны. Также стоит учесть влияние КДК на тропическую конвекцию, активность тропических циклонов и внетропическую циркуляцию. Разделение КДК на большее количество фаз помогло бы лучше понять эти влияния.

Исследование неравномерного распределения фаз КДК в разные периоды также помогло бы лучше понять десятилетнюю изменчивость взаимосвязи между КДК и полярным вихрем, а также возможные модуляции солнечным циклом и изменениями в стратосферной циркуляции и взаимодействии стратосферы и тропосферы.

КДК оказывает динамическое влияние на глобальную циркуляцию от тропосферы до мезосферы, а также на распределение химических компонентов и генезис тропических циклонов. Более подробное определение фаз КДК, учитывающее распространение и другие характеристики, позволило бы лучше понять динамический механизм глобального влияния этого удивительного явления.

4. Данные, используемые в работе

Реанализ MERRA-2

Для анализа прошлых погодных условий и создания долговременных климатических данных широко используется методика, называемая реанализ.

Реанализ является процессом ассимиляции метеорологических данных, полученных из архивных наблюдений. Он объединяет данные с помощью различных источников, таких как метеорологические станции, радиозонды и спутники с прогностическими моделями, чтобы создать непрерывные трехмерные поля метеорологических величин на протяжении длительного временного периода. Реанализ может формировать наборы данных для различных типов метеорологических переменных, таких как температура воздуха, атмосферное давление, осадки, влажность, облачность, скорость ветра и другие.

В ходе работы были использованы данные реанализа MERRA-2.

MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2) - это один из наиболее широко используемых глобальных реанализных наборов данных о погоде и климате, разработанный Управлением глобального моделирования и ассимиляции НАСА (GMAO) для исследований климатических условий нашей планеты. MERRA-2 является обновленной версией исходного реанализа MERRA и использует усовершенствованную версию модели GEOS (Годдардовская система наблюдения Земли).

Работа над реанализом MERRA-2 началась в июне 2014 года, а завершилась в середине 2015 года. Реанализ MERRA-2 охватывает период с 1980 года по настоящее время и обновляется регулярно. MERRA-2 использует GEOS-5.12.4, которая предоставляет улучшенные методы ассимиляции данных по сравнению с MERRA. Важным компонентом в нем является также схема анализа статистической интерполяции точек сетки (GSI).

В отличие от MERRA, все наборы данных MERRA-2 предоставляются на одной и той же горизонтальной сетке. MERRA-2 предоставляет выходные данные на сетке долготы и широты размером $0,625^{\circ} \times 0,5$ [26].

Однако, в отличие от MERRA, версия модели GEOS-5, на которой основан MERRA-2, вычисляет все поля на сетках с приблизительным разрешением $50 \text{ км} \times 50 \text{ км}$. Чтобы упростить использование данных для пользователей, распределенные наборы данных пространственно интерполируются на сетку широты и долготы.

5. Анализ полученных результатов

5.1. Анализ направления зонального ветра за 42 года для выявления восточной и западной фаз КДК

В начале работы было произведено деление каждого месяца за период с 1980 по 2022 годы на восточные и западные фазы КДК. Для этого использовались данные о направлении зонального ветра на экваторе в стратосфере на высоте 30 гПа.

Далее были выбраны зимние месяцы, для которых определены восточные и западные фазы по годам (табл. 1).

Декабрь		Январь		Февраль	
West	East	West	East	West	East
1980	1981	1981	1980	1981	1980
1982	1983	1983	1982	1983	1982
1985	1984	1986	1984	1985	1984
1987	1986	1988	1985	1986	1987
1990	1988	1991	1987	1988	1989
1992	1989	1993	1989	1991	1990
1994	1991	1995	1990	1993	1992
1997	1993	1998	1992	1995	1994
1999	1995	1999	1994	1997	1996
2001	1996	2000	1996	1999	1998
2004	1998	2002	1997	2000	2001
2006	2000	2007	2001	2002	2003
2008	2002	2009	2003	2004	2005
2010	2003	2011	2004	2007	2006

2013	2005	2014	2005	2009	2008
2015	2007	2016	2006	2011	2010
2016	2009	2017	2008	2014	2012
2018	2011	2019	2010	2016	2013
2019	2012	2021	2012	2017	2015
2020	2014		2013	2019	2018
2022	2017		2015	2021	2020
	2021		2018		2022
			2020		
			2022		

Таблица 1 — распределение лет для зимних месяцев с
наблюдавшимися восточными и западными фазами КДК.

5.2 Разница между зональным ветром восточного и западного направлений.

На представленных ниже графиках показаны разницы зонального ветра для декабря (Рисунок 2), января (Рисунок 3) и февраля (Рисунок 4). Значения западного ветра отнимались от значений восточного. Там, где значения отрицательные, преобладал западный ветер. А там, где положительные — восточный.

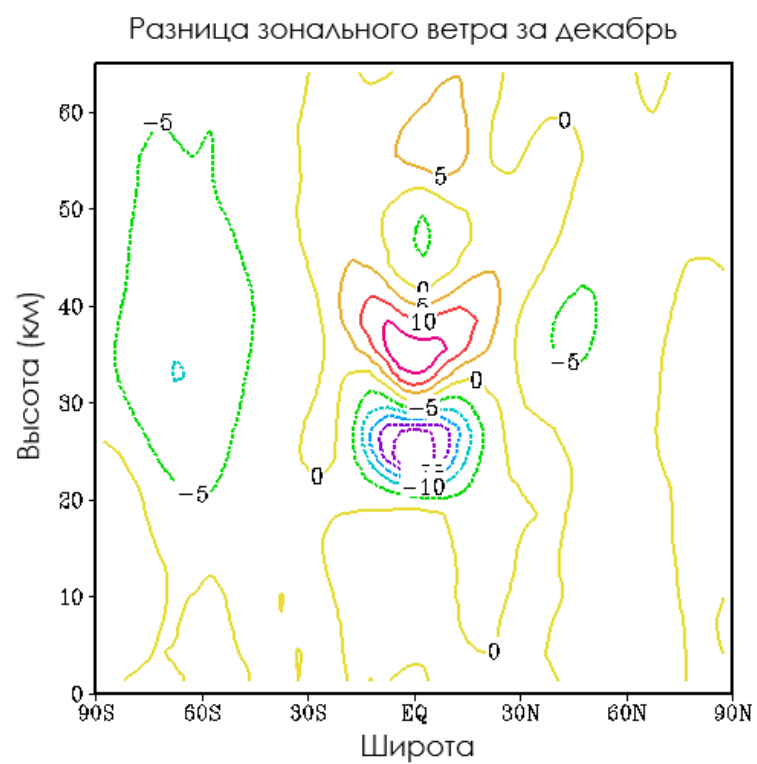


Рисунок 2 — Разница зонального ветра за декабрь

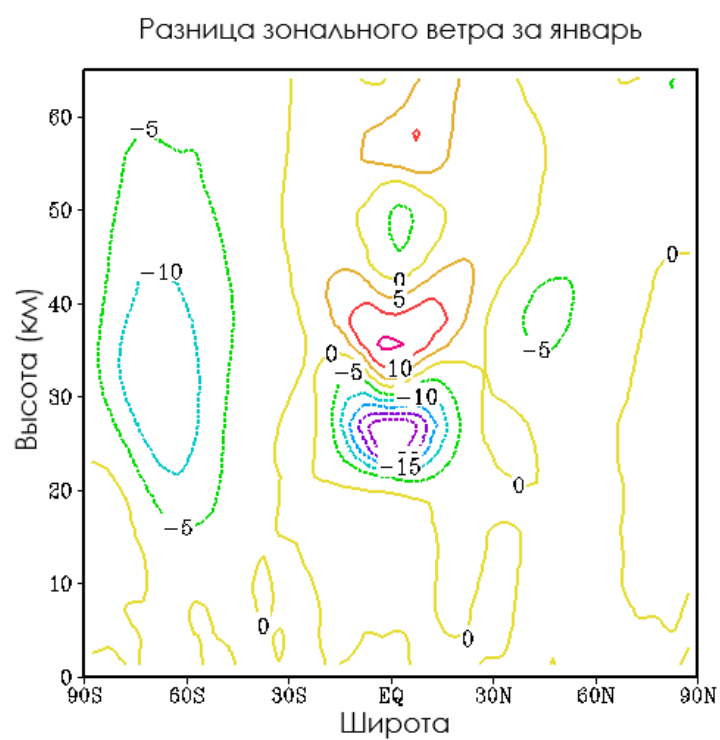


Рисунок 3 — Разница зонального ветра за январь

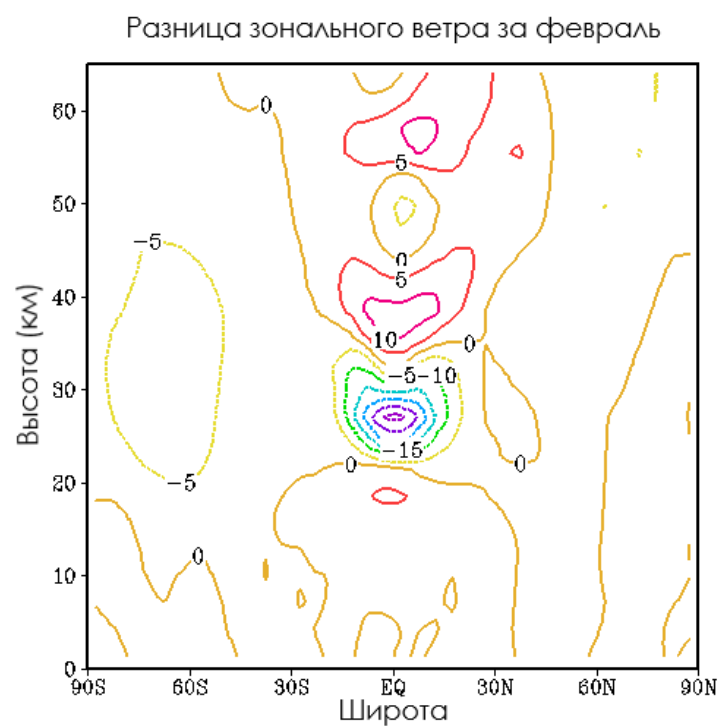


Рисунок 4 — Разница зонального ветра за февраль

5.3 Анализ амплитуд СПВ в высотно широтном разрезе за западную и восточную фазы КДК

Данные MERRA-2 для начала интерполировались на регулярную сетку, в которой 36 точек по широте, 64 точки по долготе, 23 уровня, что соответствует высотам от поверхности земли до уровня 64 км. Данные подходят для работы, потому что охватывают стратосферу. По времени эти данные имеют трехчасовой период.

В ходе работы были использованы данные о геопотенциальной высоте реанализа MERRA-2 за период 1980-2022 годы для вычисления амплитуд стационарной планетарной волны (СПВ) для восточной и западной фаз КДК. Так как динамический режим зимней стратосферы большей частью определяется волновой активностью, то для анализа использовалась характеристика геопотенциальной высоты, потому что именно в этой характеристике очень хорошо видно, как распространяются волны.

Далее к данным был произведен гармонический анализ по долготе. В результате были получены СПВ с зональным волновым числом $m=1$, $m=2$, $m=3$, $m=4$. В виду того, что максимальные значения амплитуд и изменчивости имеет волна с волновым числом $m=1$, то рассмотрена была только она. Был выполнен анализ изменчивости этой волны отдельно для восточной и западной фаз КДК в зимние месяцы.

На представленном ниже высотно-широтном распределении амплитуд для восточной фазы КДК в декабре (Рисунок 5) можно видеть, как распределяются амплитуды СПВ с высотой и широтой. Максимум амплитуды для восточной фазы КДК в декабре составляет 1300 гп. м (геопотенциальный метр) и наблюдается севернее 60° с.ш. на высоте 50 км. Можно также наблюдать зону сгущения севернее 30° с.ш. и выше 15 км. Волны проникают выше уровня 60 км, выше стратосферы.

Волны со слабой амплитудой проникают в нижнюю тропосферу в обоих полушариях. Минимальное значение амплитуды составляет 100 гп. м.

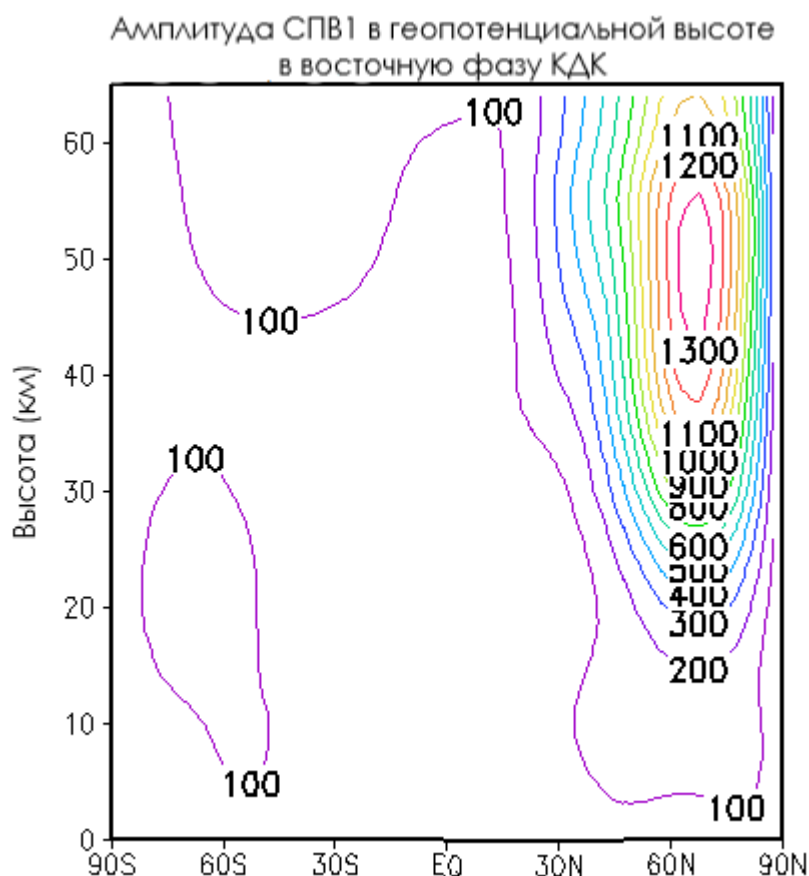


Рисунок 5 — высотно-широтное распределение значения амплитуды стационарной планетарной волны в геопотенциальной высоте для декабря за годы с наблюдающейся восточной фазой КДК.

На высотно-широтном распределении амплитуд для западной фазы КДК в декабре (Рисунок 6) максимум амплитуд СПВ так же, как и в восточную фазу, расположен на высоте 50 км и 60° с.ш. Значение максимума составляет 1200 геопотенциальных метров. Основная зона сгущения также наблюдается севернее 30 градусов северной широты и выше 15 км. Волны проникают выше уровня стратосферы в мезосферу.

СПВ слабой амплитуды проникают в нижнюю тропосферу в обоих полушариях. Однако в южном полушарии амплитуды волн западной фазы КДК выше, чем в восточную фазу. Центр амплитуд со значением 200 гп. м расположен на высоте 20 км 70 градусов южной широты.

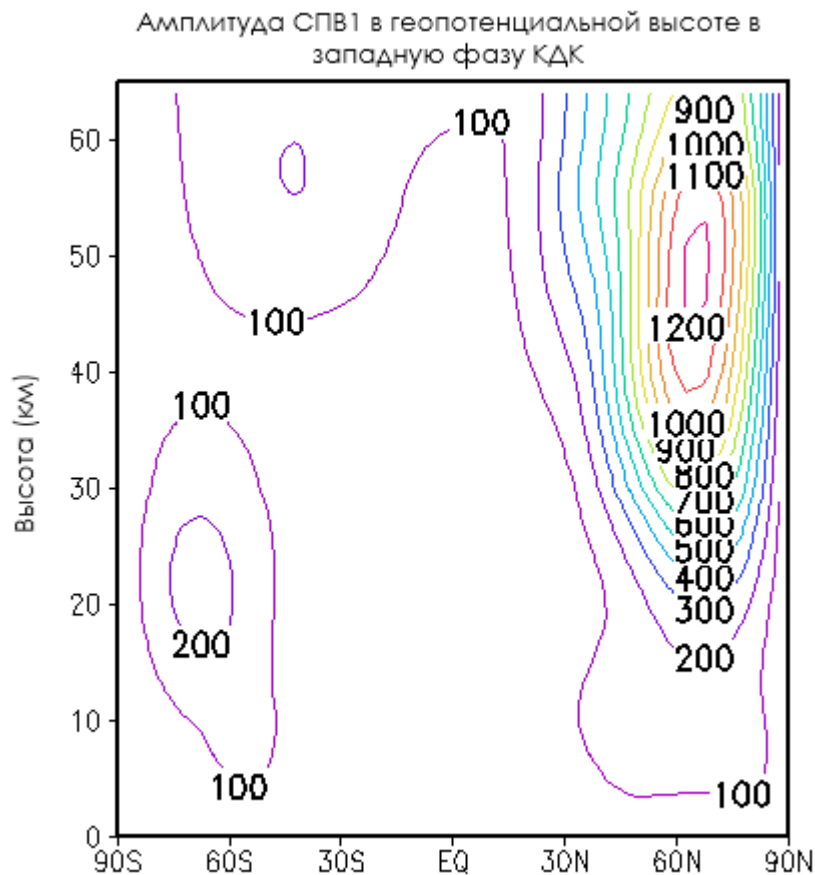


Рисунок 6 — высотно-широтное распределение значения амплитуды стационарной планетарной волны в геопотенциальной высоте для декабря за годы с наблюдающейся западной фазой КДК.

Для января распределения амплитуд в восточную фазу КДК (Рисунок 7) и в западную фазу КДК (Рисунок 8) выглядят почти так же, как и распределения амплитуд для декабря. Зоны сгущения тоже наблюдаются в средних и высоких широтах с высоты примерно 15 км. Значения амплитуд в центрах для обоих месяцев одинаковые.

Единственным отличием является наличие центра в высоких широтах южного полушария в западную фазу КДК в декабре. В январе таких значений не наблюдается.

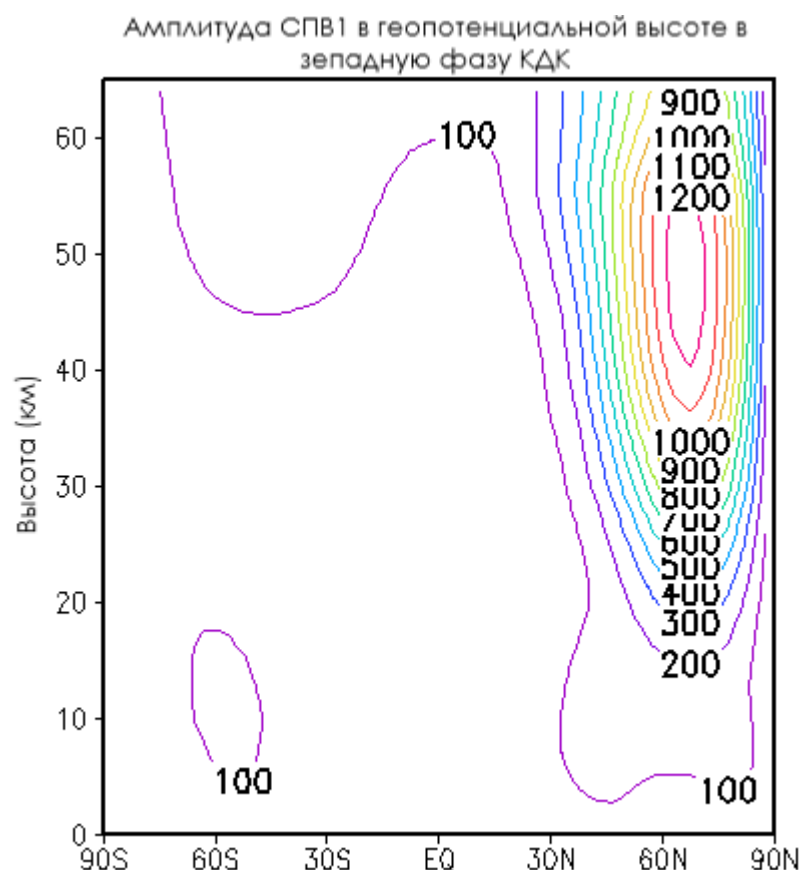


Рисунок 8 — высотное-широтное распределение значения амплитуды стационарной планетарной волны в геопотенциальной высоте для января за годы с наблюдающейся западной фазой КДК.

Для февраля значения амплитуд СПВ для восточной фазы КДК (Рисунок 9) и западной фазы КДК (Рисунок 10) отличаются от значений за декабрь и январь. Амплитуды этих волн меньше и являются примерно одинаковыми для восточной и западной фаз КДК. Значение в центре достигает значения 1000 гп. м.

Зона сгущения наблюдается севернее 40° с.ш. и распространяется вверх с высоты 15 км.

Волны слабой амплитуды тоже достигают тропосферы.

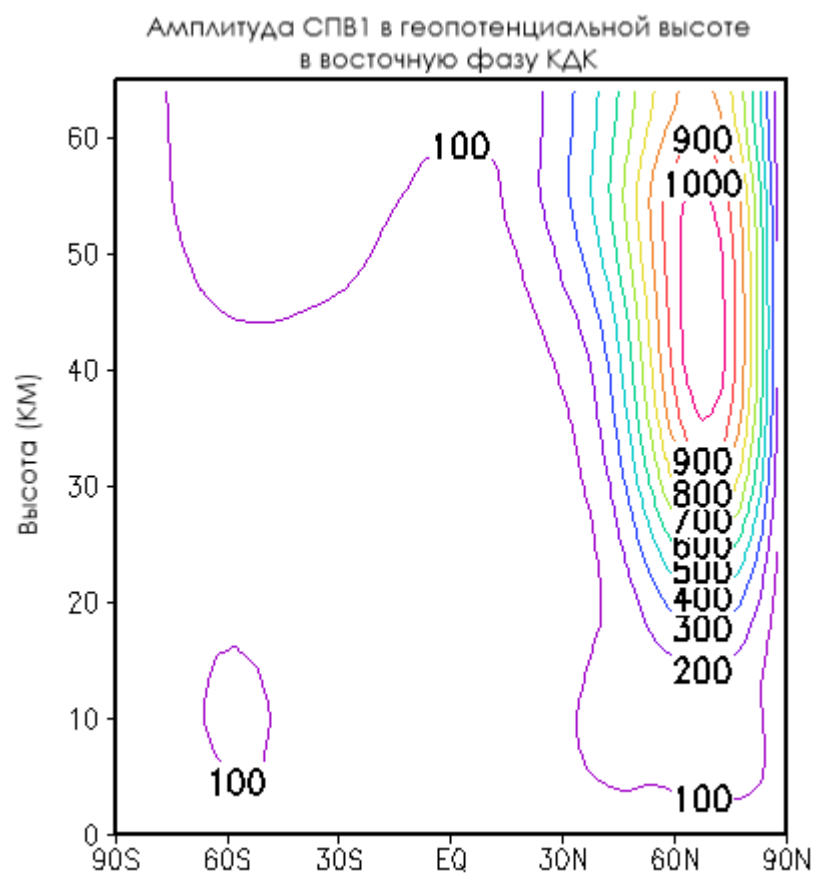


Рисунок 9 — Высотно-широтное распределение значения амплитуды стационарной планетарной волны в геопотенциальной высоте для февраля за годы с наблюдающейся восточной фазой КДК.

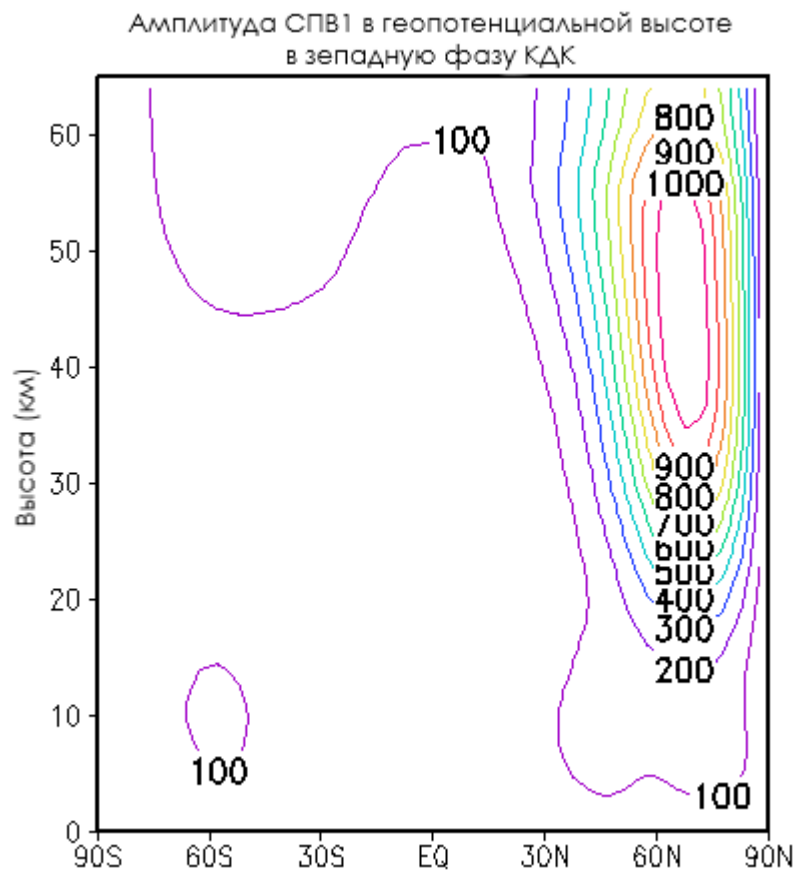


Рисунок 10 — высотно-широтное распределение значения амплитуды стационарной планетарной волны в геопотенциальной высоте для февраля за годы с наблюдающейся западной фазой КДК.

Распределение амплитуд является очень схожим для каждого зимнего месяца. Оно не дает выявить каких-либо особых отличий, поэтому были проведены дополнительные расчеты, позволяющие оценить разницу между влиянием фаз КДК, а также посмотреть изменение условий внутри каждой фазы.

5.4 Анализ разницы амплитуд между восточной и западной фазами КДК за месяц

Для декабря (Рисунок 11) основная разница амплитуд между восточной и западной фазами КДК наблюдается в средних широтах. Так как значения амплитуды в западную фазу отнимались от значений амплитуды в восточную фазу, то для центров с отрицательными значениями наблюдалась западная фаза КДК. Значит в этих местах амплитуда СПВ в западную фазу сильнее, чем в восточную.

На 60° с.ш. можно наблюдать переход от отрицательных значений к положительным. Самая максимальная положительная разница для восточной фазы расположена примерно на 70° с.ш. и высоте 40 км. Судя по графику, СПВ восточной фазы проникают выше верхнего уровня стратосферы, тогда как наиболее активны СПВ западной фазы КДК до высоты 45 км, а их максимум наблюдается на высоте 40 км и 45° с.ш..

Можно назвать центры отрицательных и положительных значений разницы амплитуд своеобразным диполем, который ориентирован по широте. Волны западной фазы наиболее активны в средних широтах до высоты 45 км. Также присутствует небольшое превышение волн западной фазы над восточной фазой выше 50 км от 10 до 30 градусов северной широты. Можно наблюдать еще один центр отрицательных значений в южном полушарии на высоте 25 км и 70° с.ш. Что-то позволяет проникать СПВ в верхнюю тропосферу и стратосферу в высоких широтах южного полушария в западную фазу КДК декабря.

Получается, что самая сильная волновая активность в восточную фазу КДК наблюдается в высоких широтах

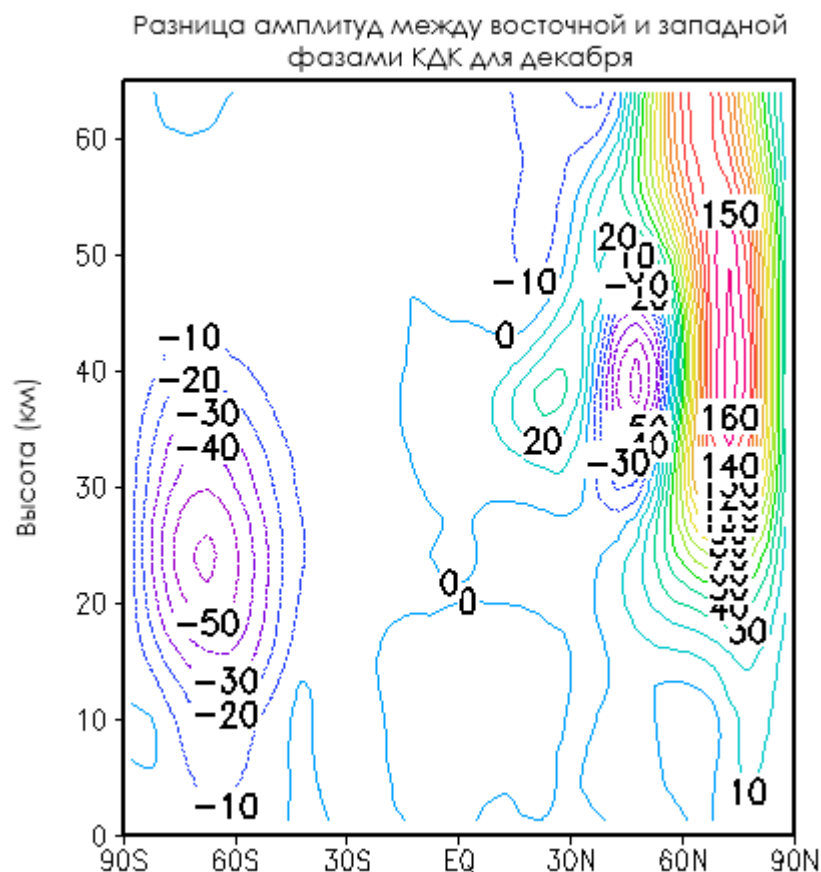


Рисунок 11 — разница средних значений амплитуд между восточной и западной фазами КДК для декабря.

Январь похож на декабрь (Рисунок 12), так как там тоже присутствует этот диполь. Но, в отличие от разницы за декабрь значения амплитуд за разные фазы ниже. К тому же максимальные значения амплитуды СПВ западной фазы КДК проникают вверх выше 60 км, тогда как амплитуды СПВ восточной фазы остаются внизу и не поднимаются выше 55 км.

Фазы отрицательных и положительных значений развернуты по высоте, обе фазы наблюдаются и в средних и в высоких широтах. Переход между этими фазами наблюдается на широте 45.

Максимальное положительное значение наблюдается примерно на высоте 35 км, что ниже, чем для декабря. А максимум отрицательных значений находится на высоте 53-55 км, что выше, чем для декабря.

Для января можно сделать вывод, что наиболее активные СПВ для восточной фазы КДК наблюдаются в средних и высоких широтах северного полушария до высоты примерно 55 км. А волны западной фазы активнее волн восточной фазы в средних и высоких широтах с высоты 40 км и выше стратосферы.

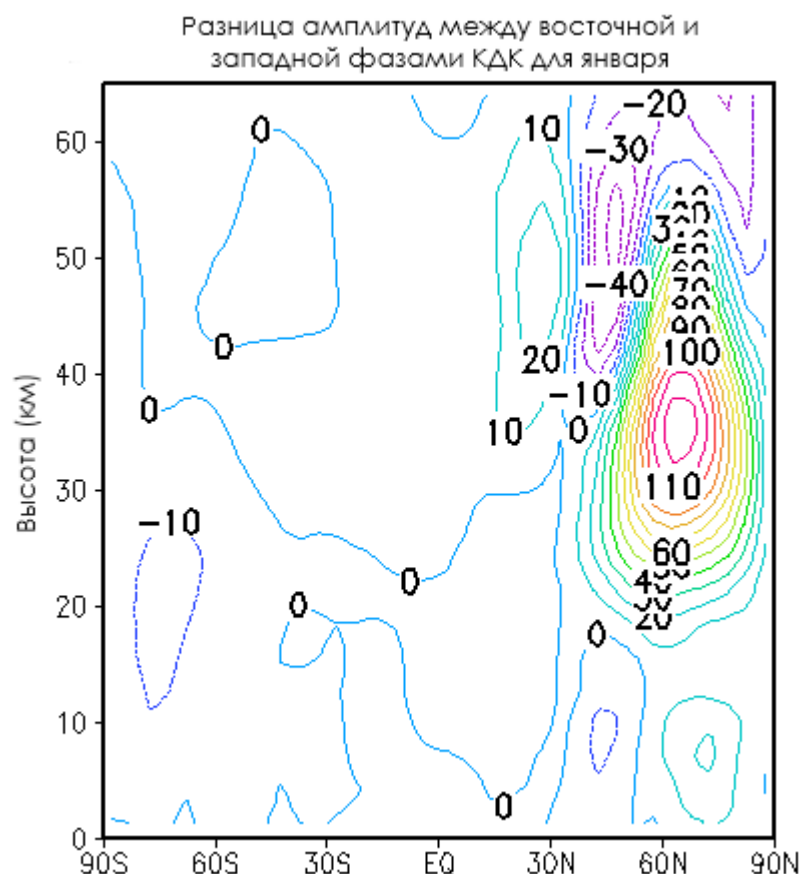


Рисунок 12 — разница средних значений амплитуд между восточной и западной фазами КДК для января.

Для февраля картинка совершенно отличается (Рисунок 13). Здесь можно увидеть два центра отрицательных значений (западная фаза КДК). Первый центр расположен на высоте примерно 27 км и 80° с.ш. Второй — на высоте примерно 50 км и 60° с.ш., к тому же значение в центре на 10 единиц меньше первого. Получается, для западной фазы КДК в феврале, амплитуды

СПВ в высоких широтах имеют более высокие значения, чем в восточную фазу.

Для положительных значений (восточная фаза КДК) можно наблюдать, что центр расположен выше уровня 60 км и уходит за тропопаузу. А зона положительных значений расположена по всему северному полушарию от высоты примерно 40 км и простирается вверх, как бы огибая отрицательные центры. Также можно наблюдать небольшой положительный центр на высоте 30 км и 50 ° с.ш. Получается СПВ для восточной фазы КДК наиболее активны в верхней стратосфере и выше ее уровня по всему северному полушарию.

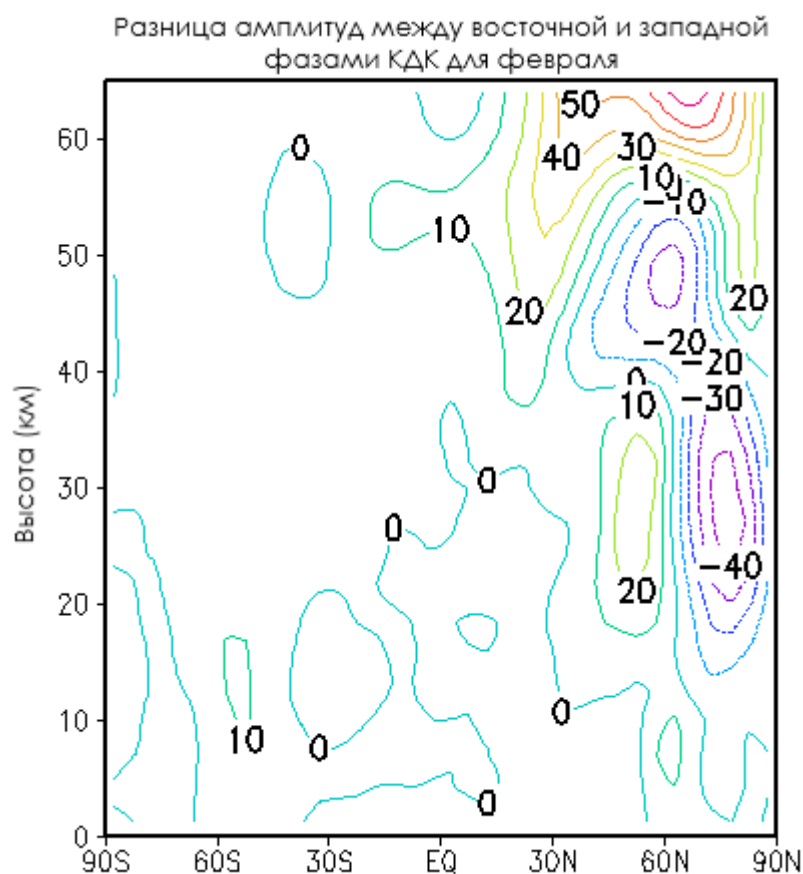


Рисунок 13 — разница средних значений амплитуд между восточной и западной фазами КДК для февраля.

5.5 Анализ среднеквадратичного отклонения (СКО) амплитуд СПВ и вариативности СКО

Для того чтобы оценить изменчивость условий внутри каждой фазы за месяц было рассчитано СКО и его вариативность. Для начала были определены средние амплитуды для восточной и западной фазы за каждый месяц. Графики средних амплитуд для зимних месяцев визуально не отличаются от графиков в разделе 5.2. Графики для восточной и западной фазы в декабре, январе и феврале показаны на рисунках 14-19 соответственно.

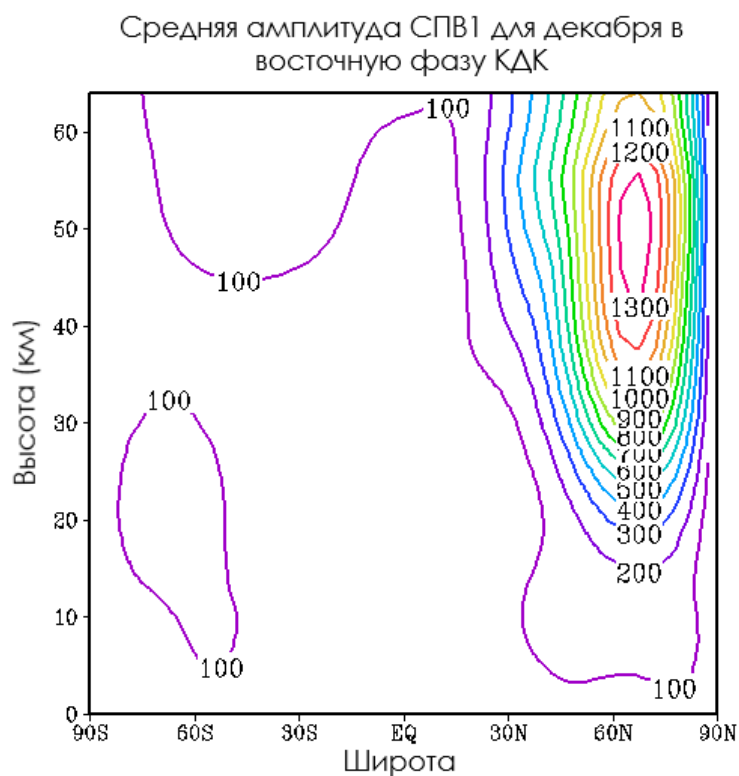


Рисунок 14 — средние амплитуды СПВ для восточной фазы КДК в декабре

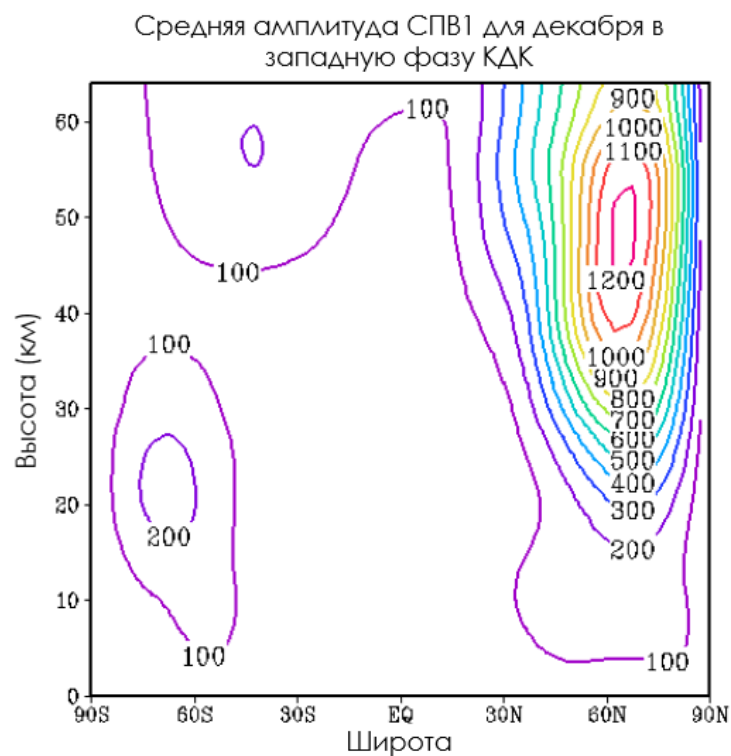


Рисунок 15 — средние амплитуды СПВ для западной фазы КДК в
декабре

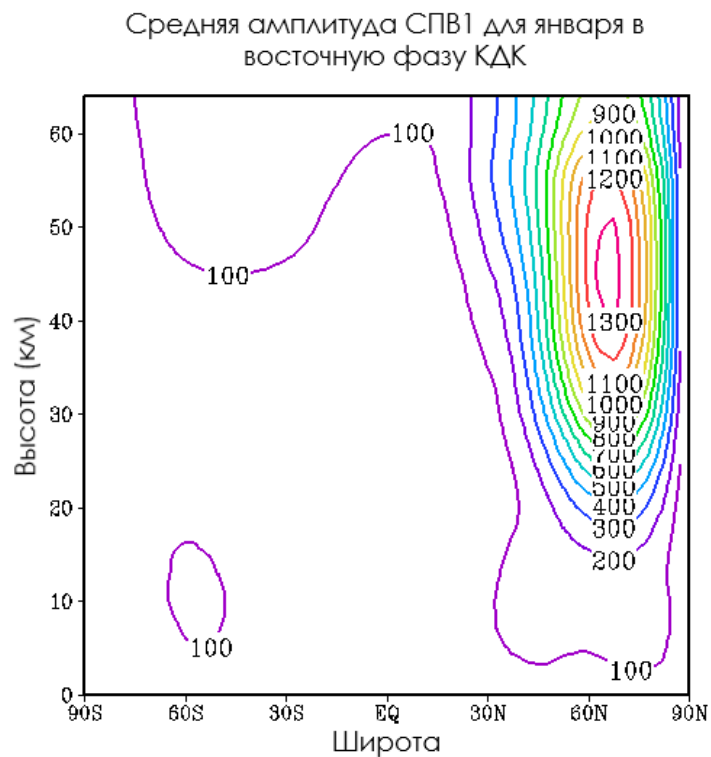


Рисунок 16 — средние амплитуды СПВ для восточной фазы КДК в
январе

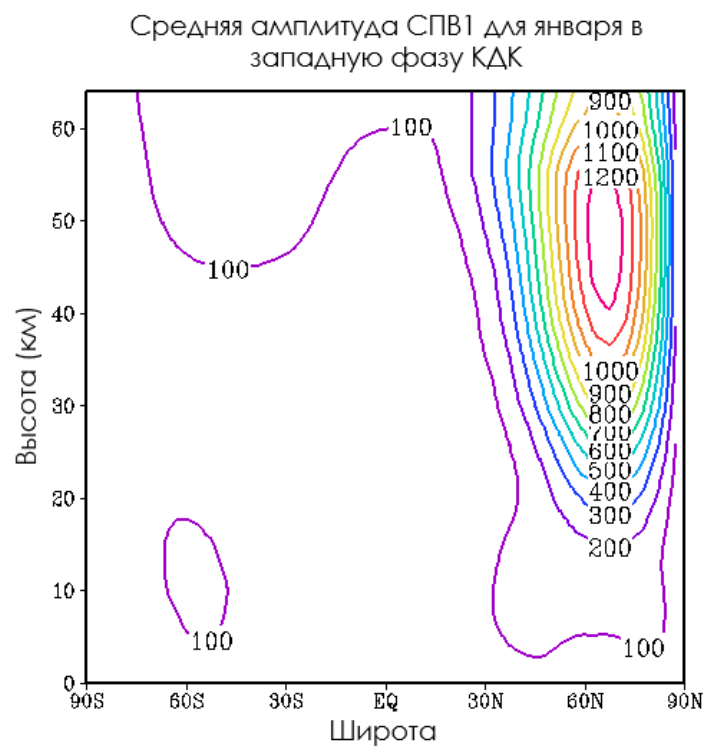


Рисунок 17 — средние амплитуды СПВ для западной фазы КДК в январе

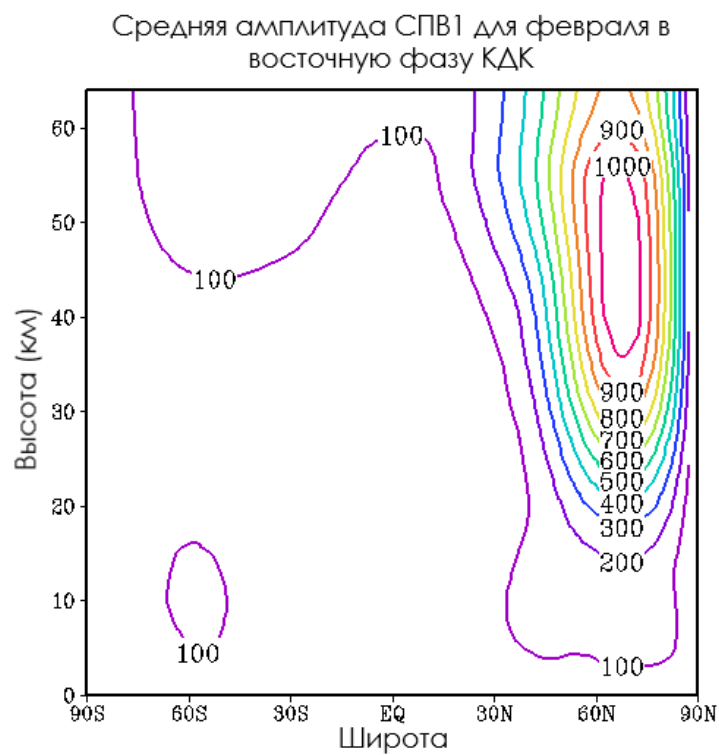


Рисунок 18 — средние амплитуды СПВ для восточной фазы КДК в феврале

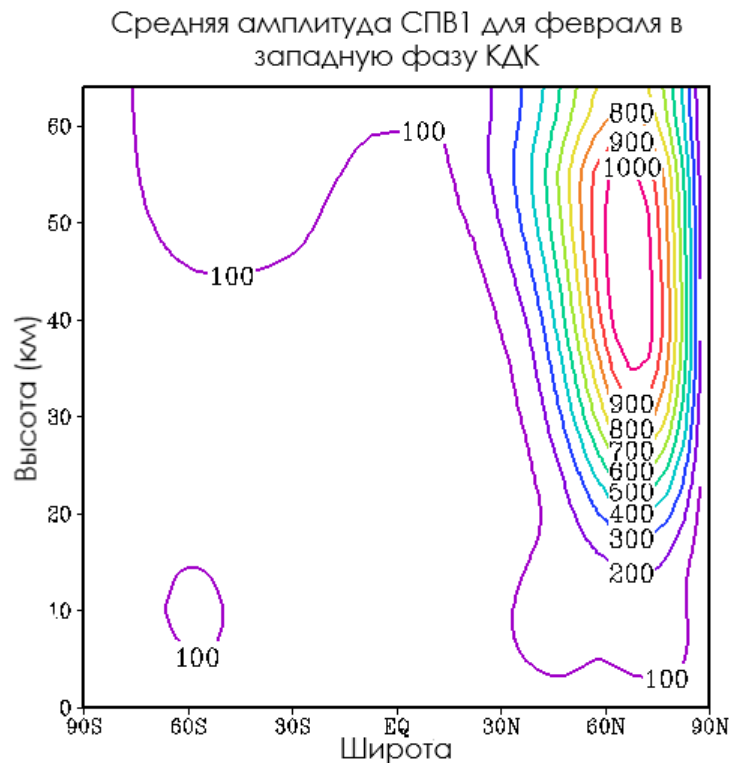


Рисунок 19 — средние амплитуды СПВ для западной фазы КДК в
феврале

Необходимо понять, как сильно изменяются условия в каждой фазе КДК. На представленных ниже графиках показаны распределения СКО для амплитуд СПВ в восточную (Рисунок 20) и западную (Рисунок 21) фазы КДК. Можно заметить, что среднеквадратичное отклонение максимальное для зон максимальных средних амплитуд. Самое большое значение СКО для восточной фазы КДК составляет 550 гп. м и наблюдается на высоте 55 км и 65° с.ш., а максимальное значение средних амплитуд СПВ расположено на высоте 50 км. Для западной фазы значение СКО составляет 500 гп. м и наблюдается на такой же высоте и широте, что и СКО для восточной фазы. Однако максимальное значение средних амплитуд СПВ в западную фазу КДК расположено на высоте примерно 48 км.

Минимальное значение СКО наблюдается там, где амплитуды СПВ невелики. Получается межгодовая изменчивость здесь слабая.

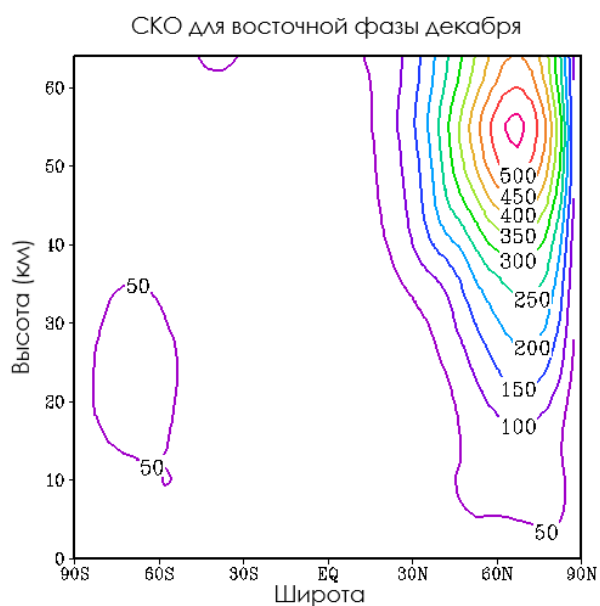


Рисунок 20 — значение среднеквадратичного отклонения амплитуд СПВ для восточной фазы КДК в декабре

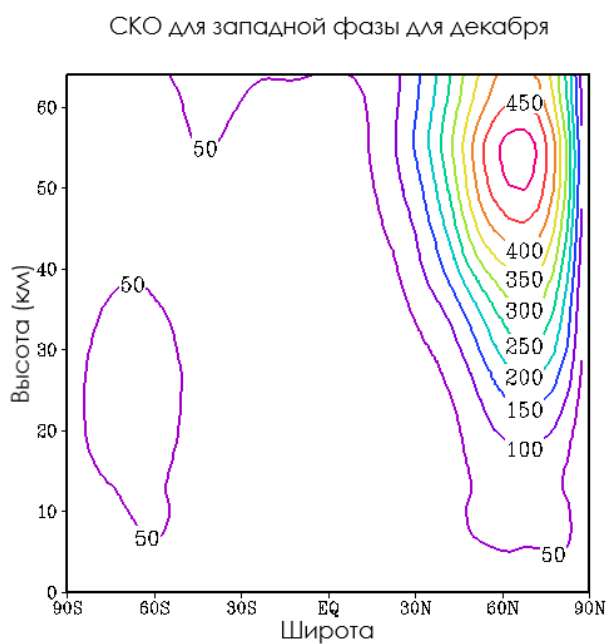


Рисунок 21 — значение среднеквадратичного отклонения амплитуд СПВ для западной фазы КДК в декабре

Среднеквадратичное отклонение отвечает за вариативность, то есть, как сильно условия меняются внутри одной фазы от года к году. На графиках ниже представлено изменение СКО для декабря в восточную (Рисунок 22) и западную (Рисунок 23) фазы КДК.

Значение изменчивости в зоне максимальных значений амплитуд СПВ для восточной фазы составляет 350 гп. м и наблюдается на высоте примерно 50 км и 60° с.ш. Этот максимум вариативности наблюдается немного ниже и южнее, чем максимальное значение СКО. А для западной фазы значение изменчивости составляет 400 гп. м. Максимум вариативности расположен ниже, примерно на высоте 45 км и 65° с.ш. Положение максимума изменчивости СКО для западной фазы ниже, чем максимум значения среднего СКО. Отсюда следует, что расшатанность системы СПВ больше для западной фазы, а, следовательно, волны, которые наблюдаются в средних и высоких широтах в верхней стратосфере, имеют более непредсказуемый характер, чем волны восточной фазы КДК.

Чем меньше вариативность, тем условия стабильнее. Получается, что при восточной фазе КДК в декабре волны средних и высоких широт всегда имеют большую предсказуемость, чем волны западной фазы.

Вариативность СКО для декабря в восточную фазу КДК

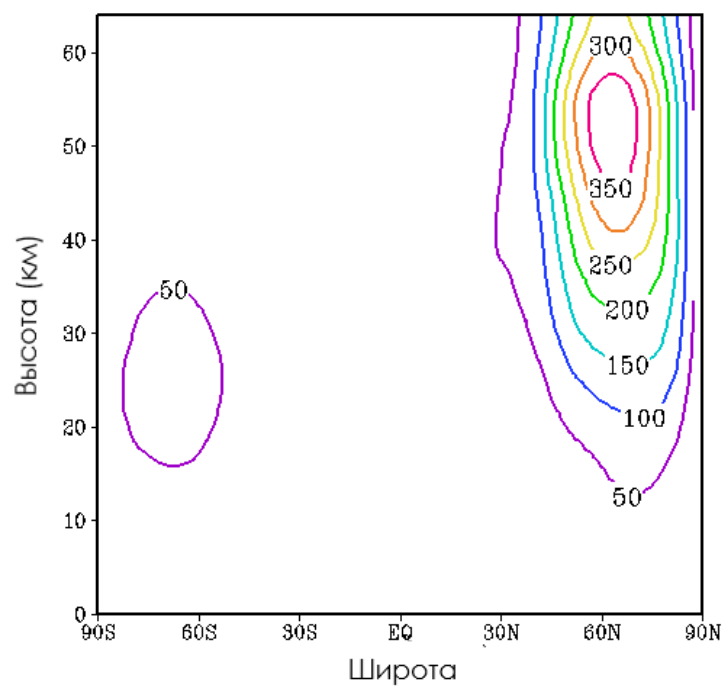


Рисунок 22 — изменение СКО для восточной фазы КДК в декабре

Вариативность СКО для декабря в западную фазу КДК

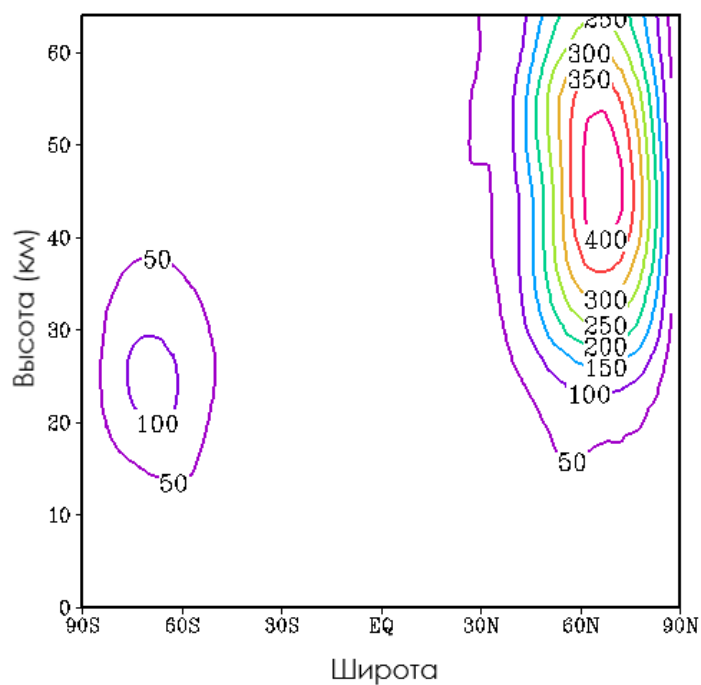


Рисунок 23 — изменение СКО для западной фазы КДК в декабре

Похожая картина наблюдается для вариативности изменчивости СКО в январе для западной и восточной фаз КДК. Графики для значения СКО амплитуд СПВ в восточную и западную фазы колебаний изображены на Рисунке 24 и Рисунке 25 соответственно.

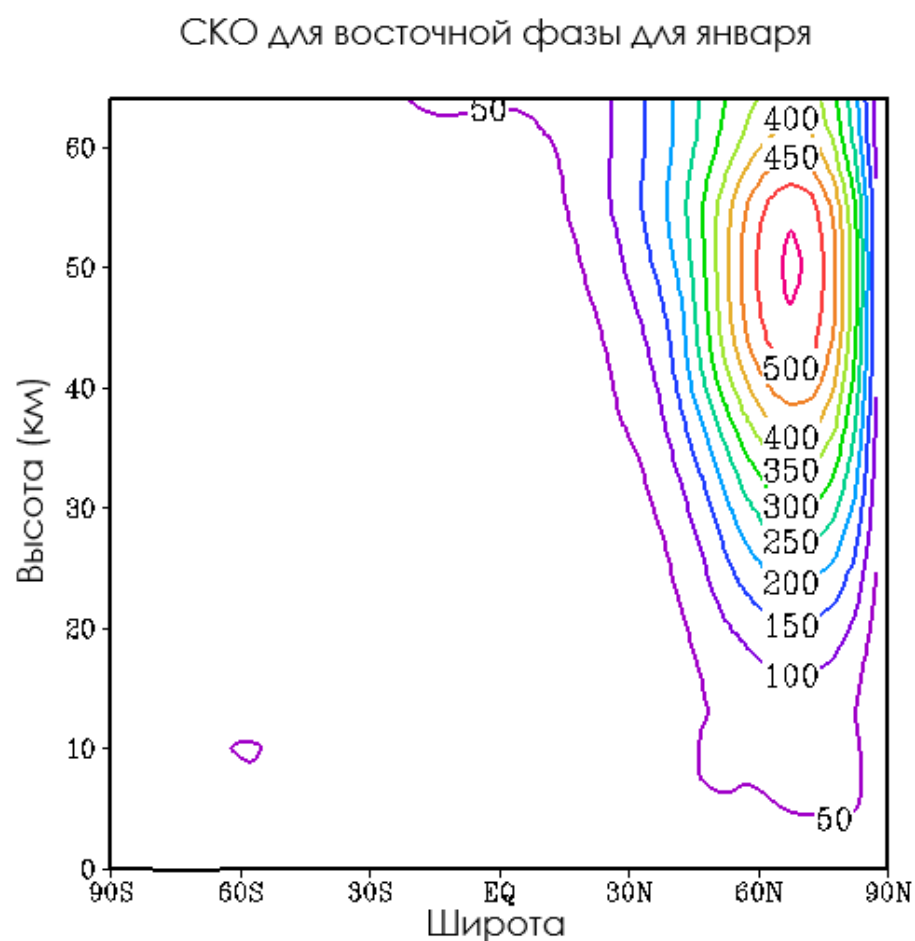


Рисунок 24 — значение среднеквадратичного отклонения амплитуд СПВ для восточной фазы КДК в январе

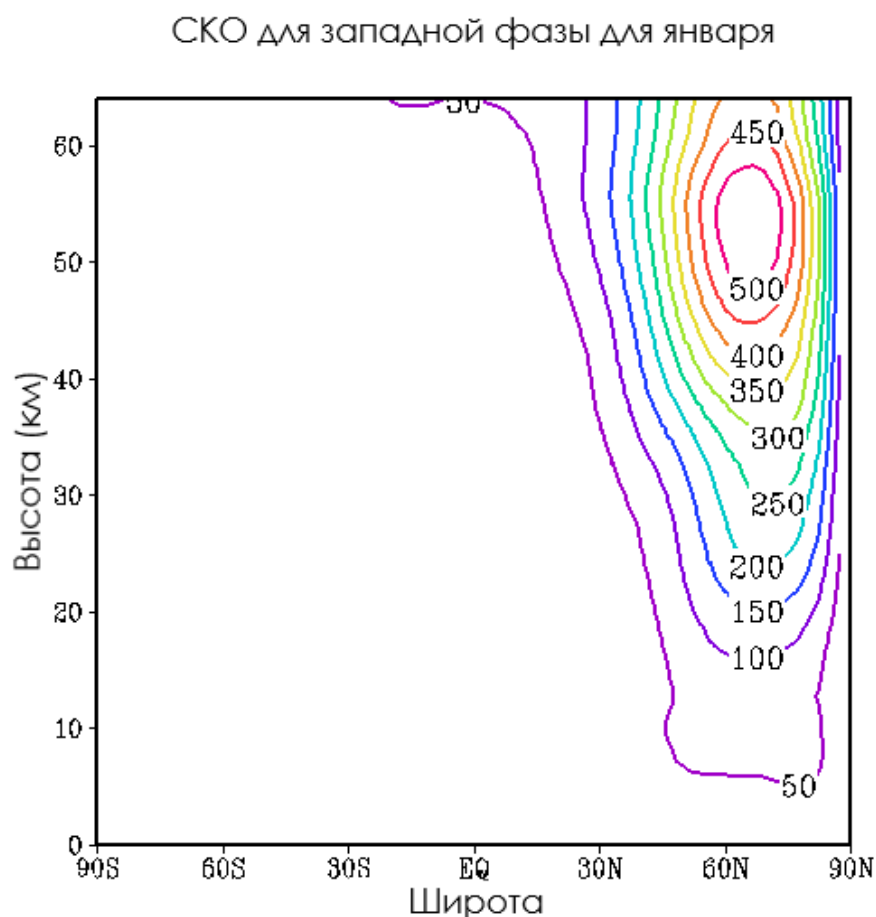


Рисунок 25 — значение среднеквадратичного отклонения амплитуд
СПВ для западной фазы КДК в январе

Максимальное среднее значение среднеквадратичного отклонения составляет 550 гп. м и расположено на уровне 55 км и 65° с.ш. Однако максимальное среднее СКО со значением 500 гп. м при восточной фазе КДК находится на высоте 45 км той же широты.

Для западной фазы КДК среднеквадратичное отклонение имеет максимум на высоте примерно 53 км и 65° с.ш. Оно так же смещено вверх по сравнению с максимальным значением амплитуды СПВ, которое находится на высоте 45 км.

Можно сделать вывод о том, что межгодовая изменчивость растет вместе со значениями амплитуд и достигает своего максимума на высотах, где волны имеют меньшие амплитуды.

Вариативность изменения СКО в январе для восточной (Рисунок 26) фазы и западной (Рисунок 27) фазы КДК похожа на вариативность декабря.

Вариативность СКО для января в восточную фазу КДК

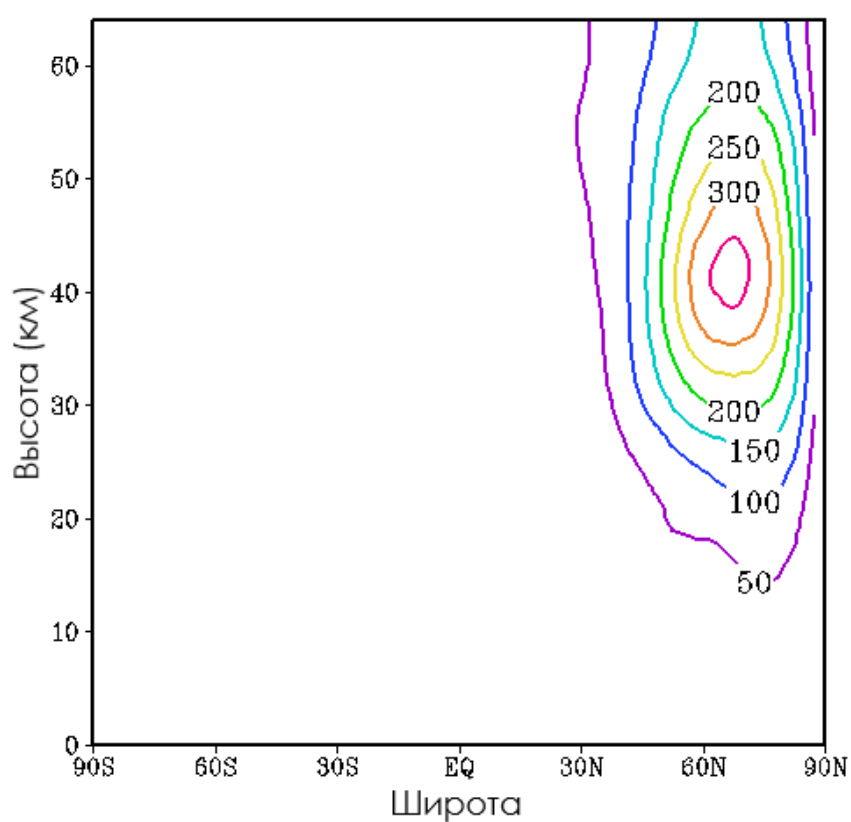


Рисунок 26 — изменение СКО для восточной фазы КДК в январе

Вариативность СКО для января в западную фазу КДК

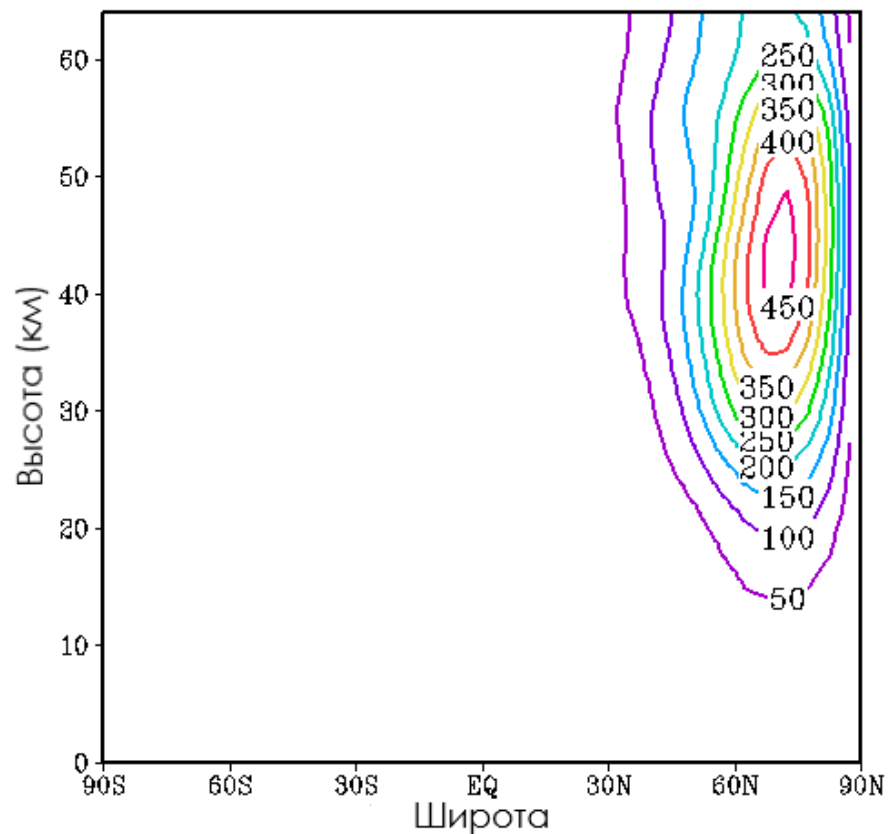


Рисунок 27 — изменение СКО для западной фазы КДК в январе

Значение максимума изменчивости СКО для восточной фазы КДК составляет 350 гп. м на высоте 40 км 65° с.ш. Максимальное значение СКО расположено на 15 км выше.

Для западной фазы максимальное значение изменчивости составляет 450 гп. м на высоте примерно 42 км и 70° с.ш. Максимум СКО наблюдался на высоте 53 км и 65 ° с.ш.

Для января расшатанность системы СПВ и непредсказуемость волновой активности так же, как и для декабря, больше в западную фазу КДК. В январе это значение изменчивости выше, чем в декабре. Значит волны имеют более непредсказуемый характер.

Для восточной фазы КДК в январе условия всегда стабильнее, так как вариативность изменчивости меньше. Волны имеют большую предсказуемость.

Февраль отличается от вышеописанных месяцев. Его максимальные средние значения СКО для восточной (Рисунок 28) фазы и западной (Рисунок 29) фазы КДК практически одинаковые.

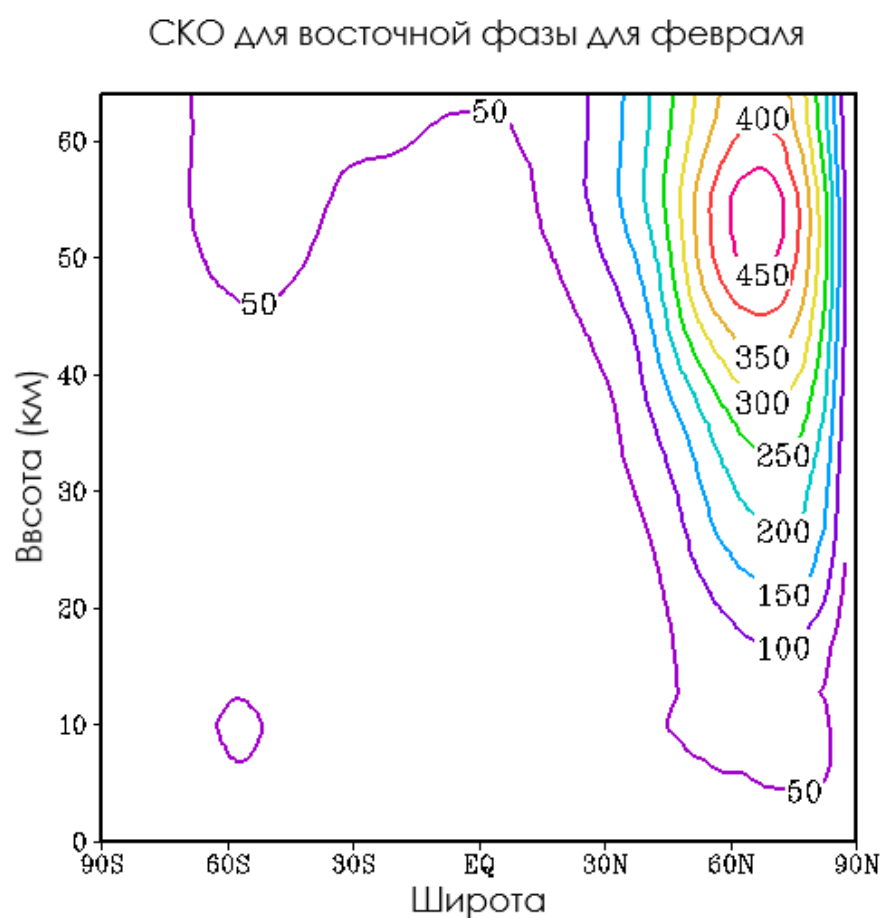


Рисунок 28 — значение среднеквадратичного отклонения амплитуд СПВ для восточной фазы КДК в феврале

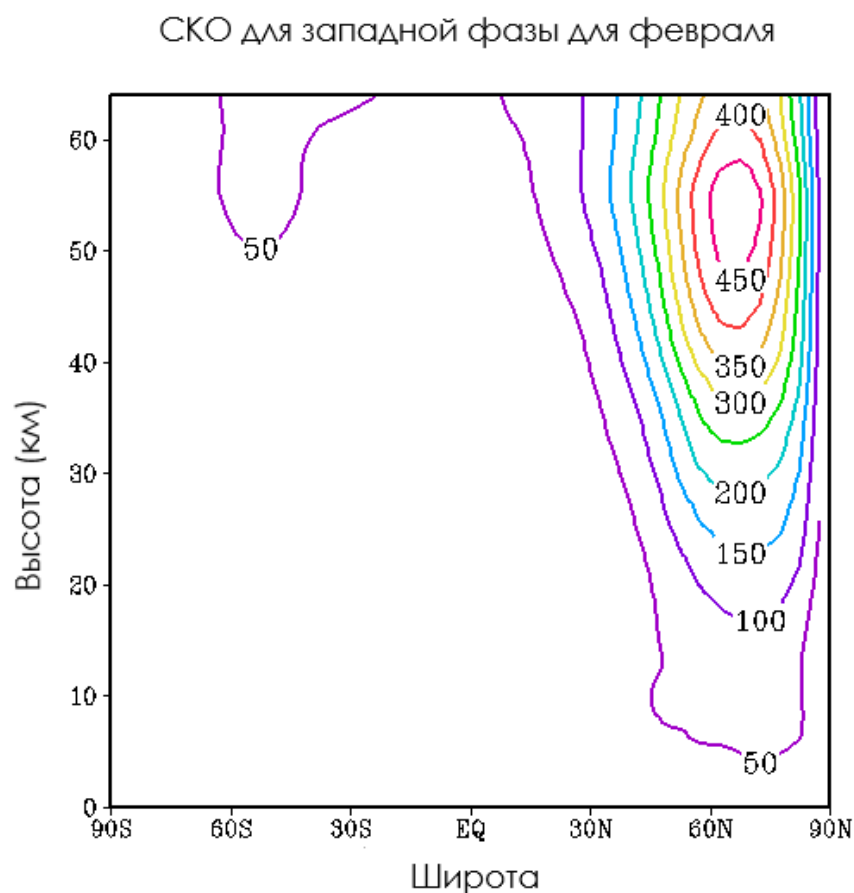


Рисунок 29 — значение среднеквадратичного отклонения амплитуд СПВ для западной фазы КДК в феврале

Максимальные значения СКО в обе фазы составляют 450 гп. м. Однако в восточную фазу высота максимума СКО примерно 54 км, а в западную фазу примерно 50 км. Межгодовая изменчивость для февраля меньше, чем для других двух месяцев.

Вариативность изменения СКО для восточной и западной фаз КДК представлена на Рисунке 30 и Рисунке 31 соответственно.

Вариативность СКО для февраля в восточную фазу КДК

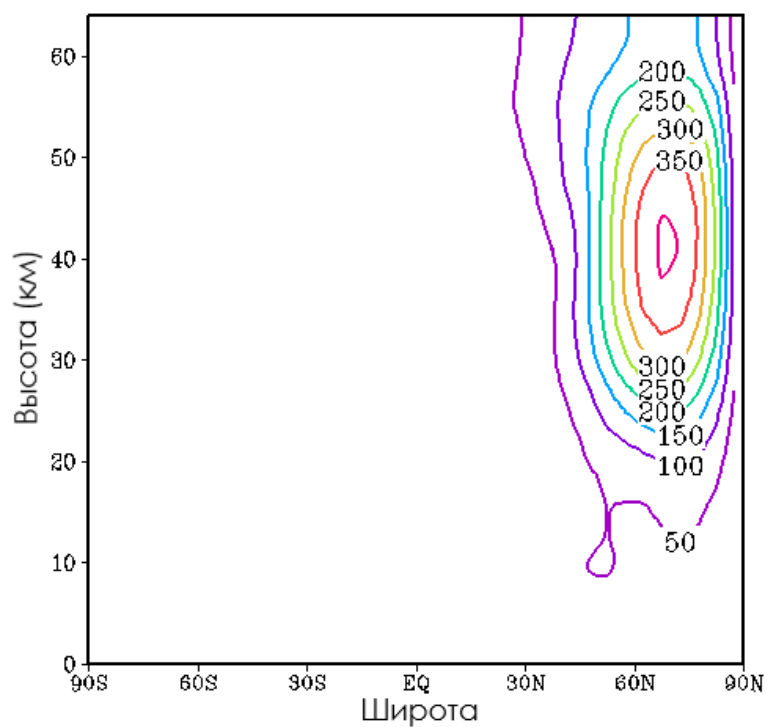


Рисунок 30 — изменение СКО для восточной фазы КДК в феврале

Вариативность СКО для февраля в западную фазу КДК

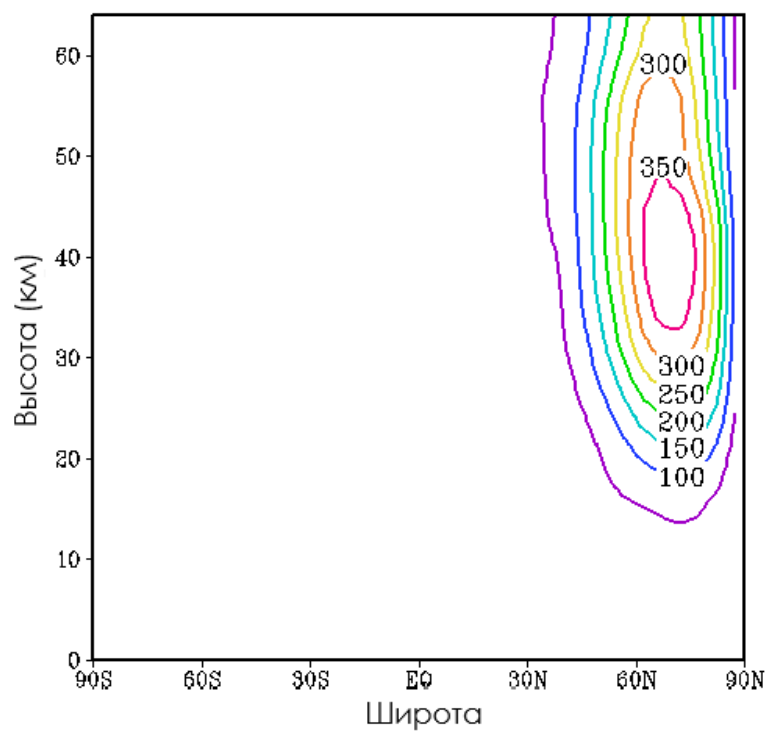


Рисунок 31 — изменение СКО для западной фазы КДК в феврале

Для восточной фазы КДК вариативность изменчивости имеет максимальное значение 400 гп. м на высоте 40 км и 70° с.ш. Этот максимум вариативности наблюдается на 14 км ниже, чем максимальное значение СКО. Для западной фазы значение изменчивости составляет 350 на высоте 40 км и 70° с.ш. Положение максимума вариативности изменчивости СКО ниже на 10 км, чем максимум значения среднего СКО.

Получается, что в феврале более непредсказуемые волны в верхней стратосфере в средних и высоких широтах наблюдаются в восточную фазу КДК. Расшатанность системы для восточной фазы больше, чем для западной фазы.

Меньшую вариативность имеют волны западной фазы КДК. Здесь наблюдаются более предсказуемые волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ВЫВОДЫ.

В ходе работы были проанализированы амплитуды СПВ зимних месяцев за период с 1980 по 2022 годы. Значения амплитуд были получены в результате применения гармонического анализа к полю данных геопотенциальной высоты по долготе, полученных из реанализа MERRA-2.

В ходе работы выполнили:

- 1) Построение высотно-широтного разреза распределения амплитуд, разниц амплитуд, СКО амплитуд СПВ;
- 2) Анализ изменения амплитуд в зависимости от фазы КДК;
- 3) Анализ разницы амплитуд между восточной фазой и западной фазой КДК;
- 4) Анализ среднеквадратичного отклонения амплитуд СПВ и вариативности СКО.

Анализ данных показал, что фаза КДК существенно влияет на амплитуду волн, которые наблюдаются в зимний период в средних/высоких широтах.

Наиболее благоприятные условия для распространения волн наблюдаются в декабре и январе. Значения амплитуд в эти месяцы самые большие. Однако самым непредсказуемым месяцем является январь.

Для января наиболее активные СПВ для восточной фазы КДК наблюдаются в средних и высоких широтах северного полушария до высоты примерно 55 км. А волны западной фазы активнее волн восточной фазы в средних и высоких широтах с высоты 40 км и выше стратосферы.

Несмотря на эти условия, наиболее непредсказуемый характер имеют волны западной фазы КДК в январе. Самая большая изменчивость наблюдалась в этот же месяц. При восточной фазе КДК волны имеют

максимальную среднюю амплитуду, значение которой составляет 1300 гп. м. При западной фазе КДК волны имеют среднюю амплитуду со значением 1200 гп. м.

В разные фазы КДК в январе волны имеют разную внутрисезонную изменчивость. Максимальное значение изменчивости для восточной фазы и западной фазы составляет 350 гп. м и 450 гп. м соответственно. Такой фактор необходимо учитывать при моделировании, изучении стратосферы и ее динамики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. M.P. Baldwin, L.J. Gray, T.J. Dunkerton, K. Hamilton, P.H. Haynes, W.J. Randel, J.R. Holton, M.J. Alexander, I. Hitora, T. Horinouchi, D.B.A. Jones, J.S. Kinnnersley, C. Marquardt, K. Sato, M. Takahashi. The quasi-biennial oscillation. Copyright 2001 by the American Geophysical Union
2. Reed, R. J., A tentative model of the 26-month oscillation in tropical latitudes, Q. J. R. Meteorol. Soc., 90, 441–466, 1964
3. Ebdon, R. A., and R. G. Veryard, Fluctuations in equatorial stratospheric winds, Nature, 189, 791–793, 1961.
4. Maruyama, T., Large-scale disturbances in the equatorial lower stratosphere, J. Meteorol. Soc. Jpn., 45, 196–199, 1967
5. Holton, J. R., and R. S. Lindzen, An updated theory for the quasi-biennial cycle of the tropical stratosphere, J. Atmos. Sci., 29, 1076–1080, 1972
6. Gray, L. J., and J. A. Pyle, A two-dimensional model of the quasi-biennial oscillation in ozone, J. Atmos. Sci., 46, 203–220, 1989
7. Dunkerton, T. J., The role of gravity waves in the quasibiennial oscillation, J. Geophys. Res., 102, 26,053–26,076, 1997.
8. Ke Wei, Wen Chen, Jiao Ma, Ting Wang, Necessity of Standardizing the Definition of QBO Phases, 11-13, 2021.
9. Lucy Campbell, A Theory for the Quasi-biennial Oscillation Based on Gravity Wave Breaking and Saturation, 6, 2000.
10. Кац А.Л. Циркуляция в стратосфере и мезосфере. Гидрометеорологическое издательство. Ленинград, 1968, с.120
11. Диденко К.А, Ермакова Т.С, Погорельцев А.И, Ракушина Е.В. Климатическая изменчивость стратосферно-тропосферных взаимодействий, наблюдаемая в последние десятилетия // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2021. Т. 37. №4. С.160
12. Charney, J. G., and P. G. Drazin, Propagation of planetaryscale disturbances from the lower into the upper atmosphere, J. Geophys. Res., 66, 83–109, 1961.

13. Hua Lu, Dora Pancheva, Plamen Mukhtarov, Ingrid Cnossen. QBO modulation of traveling planetary waves during northern winter. *Journal of geophysical research*, 2012
14. Хайруллина Г.Р, Астафьева Н.М. Квазидвухлетние колебания в атмосфере Земли. Москва, 2011. С.16
15. James A. Anstey, Scott McManus Osprey, Joan Alexander, Mark P. Baldwin, Impacts, processes and projections of the quasi-biennial oscillation 3-8, 2022
16. A. V. Koval, N. M. Gavrilov, A. I. Pogoreltsev , and K. K. Kandieva, Dynamical Impacts of Stratospheric QBO on the Global Circulation up to the Lower Thermosphere 6-7, 2022,
17. Mann ME, Park J, Oscillatory spatiotemporal signal detection in climate studies: A multi-taper spectral domain approach. *Advances in Geophysics*, 1999
18. Ebdon RA Quasi-Biennial Oscillation and Its Association with Tropospheric Circulation Patterns. *Meteorological Magazine* 282-297, 1975
19. Bushell AC, Anstey JA, Butchart N, Kawatani Y, Osprey SM, Richter JH, Serva F, Braesicke P, Cagnazzo C, Chen CC, Chun HY, Garcia RR, Gray LJ, Hamilton K, Kerzenmacher T, Kim YH, Lott F, McLandress C, Naoe H, Scinocca J, Smith AK, Stockdale TN, Versick S, Watanabe S, Yoshida K, Yukimoto S, Evaluation of the Quasi-Biennial Oscillation in global climate models for the SPARC QBO-initiative. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020
20. Pang X, Wu H, Relationship between Vertical Shear of Zonal Wind in Equatorial Lower Stratosphere and ENSO Variability. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* 62-68. (in Chinese), 2002
21. Attard HE, Lang AL, The Impact of Tropospheric and Stratospheric Tropical Variability on the Location, Frequency, and Duration of Cool-Season Extratropical Synoptic Events. *Monthly Weather Review* 147(2), 2019

22. Wang L, Wang L, Chen W, Huangfu J, Modulation of winter precipitation associated with tropical cyclone of the western North Pacific by the stratospheric Quasi-Biennial oscillation. *Environmental Research Letters* 16(5), 2021
23. Baldwin MP, Dunkerton TJ, Quasi-biennial modulation of the southern hemisphere stratospheric polar vortex. *Geophysical Research Letters* 3343-3346, 1998
24. Wallace JM, Panetta RL, Estberg J, Representation of the Equatorial Stratospheric QuasiBiennial Oscillation in EOF Phase Space. *Journal of the Atmospheric Sciences* 1751-1762, 1993
25. Holton, J. R., and H.-C. Tan, The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb, *J. Atmos. Sci.*, 37, 2200–2208, 1980.
26. MERRA-2: File Specification, 2016