

# 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:	«Наблюдаемые в стратосфере тренды в интенсивности полярного вихр
	и в амплитудах планетарных волн»
Исполни	гель Сявкаева Диана Наильевна (фамилия, имя, отчество)
Руководи	кандидат физико-математических наук, доцент (ученая степень, ученое звание)
	Ермакова Татьяна Сергеевна
T.C	(фамилия, имя, отчество)
	те допускаю» ций кафедрой
	(подпись)
	кандидат физико-математических наук, доцент
	, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,
	Анискина Ольга Георгиевна
	(фамилия, имя, отчество)
« 26 »	мая 2022 г.

Санкт–Петербург 2022

## Оглавление

Введение	3
1. Общие сведения	5
1.1.Полярный стратосферный вихрь	7
1.2. Внезапное стратосферное потепление	9
1.3. Планетарные волны	11
2. Исходные данные и причины климатической изменчивости	13
2.1. Индекс солнечной активности	14
2.2. Данные JRA	16
3. Полученные результаты	18
3.1. Случаи ВСП на высоте 30 – 45 км	18
4. Влияние ВСП на стратосферный полярный вихрь	40
5. Анализ стационарных планетарных волн	55
Заключение	
Список используемых источников	

#### Введение

Стратосфера — устойчивый слой атмосферы, простирающийся от тропопаузы вверх до высоты около 50 км. Устойчивость стратосферы обуславливается тем, что температура воздуха увеличивается с высотой до стратопаузы, которая является высотой температурной инверсии [1]. Тепло в стратосфере сохраняется благодаря поглощению озоном УФ излучения и инфракрасного излучения от тропосферы. Особенностями стратосферы также является низкое содержание водяного пара и в связи с этим практическое отсутствие облачности, не считая той, которая может образоваться при возникновение достаточно низкой температуры, конденсируя существующее небольшое количество водяного пара и образовывая ледяные кристаллы.

Процессы в стратосфере до сих пор не до конца изучены, но благодаря усовершенствованию получения данных с верхних слоев атмосферы, накапливается всё больше новой информация, которая подлежит дальнейшей обработке, изучению и анализу.

Целью данной выпускной квалификационной работы является оценка изменчивости интенсивности стратосферного полярного вихря и планетарных волн за холодные периоды (с ноября по апрель) с 1958 по 2020 гг.

Перед выполнением работы были поставлены следующие задачи:

- оценить изменчивость распределения температуры и зональной составляющей ветра в стратосфере;
- отследить изменения давления в центре стратосферного полярного вихря;
- выявить взаимосвязь между изменчивостью распределения температуры, зональной составляющей ветра и геопотенциальной высотой;
- оценить изменчивость стационарных планетарных волн с волновым числом 1 и 2.

Актуальность данной темы заключается в том, что процессы, происходящие в стратосфере, оказывают значительное влияние на изменение климата и ее дальнейшее исследование может дополнить знания о климате и причин его изменчивости.

#### 1. Общие сведения

Атмосфера Земли является компонентом климатической важным естественной системы. Усовершенствование знаний 0 изменчивости тенденциях температуры атмосферы имеет большое значение для лучшего понимания изменения климата и его причин. Поэтому для выявления и установления причин изменения климата и для проверки моделирования климатических моделей необходимы согласованные долгосрочные записи наблюдений основных климатических переменных  $(OK\Pi),$ таких как температура верхних слоев атмосферы.

Работа по изучению изменений атмосферной температуры и их факторов (АТС) осуществляется на протяжении длительного времени в рамках программы ВПИК «Стратосферно-тропосферные процессы и их роль в климате» (СПАРК). Эта деятельность внесла существенный вклад в оценку трендов стратосферной температуры, основанную на анализе наблюдений и моделирования, с регулярным участием в «Научных оценках разрушения озонового слоя», проводимых ВМО Программой Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП) [2].

Наблюдения с метеорологических спутников стали важным источником данных о верхних слоях атмосферы на протяжении более 40 лет, а радиозондовые измерения с метеозондов проводятся с 1950-х годов и ранее. Оценка долгосрочных изменений температуры на основе этих данным является сложной задачей, поскольку эти приборы в первую очередь были предназначены для наблюдений за погодой. Мониторинг климата требует более высокой точности [3] . Неопределенности, обусловленные такими факторами, как изменения приборов с течением времени, межспутниковые смещения, изменения в суточной выборке и другие модификации в сети наблюдений, требуют процедур гомогенизации и интеркалибрации для построения баз климатических данных.

Значительные усилия были приложены для согласования трендов атмосферной температуры  $\mathbf{c}$ разных наблюдательных [4]. Гомогенизированные данные радиозондирования [5] и калиброванные [6] микроволнового зондирования подтвердили тропосферное записи потепление и охлаждение стратосферы с середины двадцатого века. Было обнаружено, что в нижней и средней тропосфере тренды температуры в ходе независимых наблюдений И моделирований совпадают, различия сохраняются в верхней тропосфере и стратосфере [7]. Независимые данные наблюдений за температурой, полученные с помощью Блока стратосферного зондирования (SSU), свидетельствуют о значительных расхождениях, а также отличаются от модельных трендов [8].

Не смотря на то что вертикальный профиль трендов температуры является важным индикатором изменения климата [9], величина и вертикальная структура трендов часто зависят от деталей наборов данных и деталей гомогенизации [10] «ограничивая способность делать надежные последовательные выводы об истинных долгосрочных тенденциях». В Пятом оценочном отчете МГЭИК[10] отмечается, что это ключевая неопределенность: степень достоверности изменения тропосферного потепления вертикальной структуры может быть только средней или низкой. Оценки темпов потепления тропосферы включают оценки темпов потепления приземной температуры. Существует низкая достоверность в скорости и вертикальной структуре стратосферного охлаждения.

Несмотря на эти неопределенности, по-прежнему трудно объяснить наблюдаемую модель изменения температуры стратосферы и тропосферы без антропогенного воздействия [11].

В последние годы значительные усилия привели к дальнейшему улучшению усредненных по слоям температур по наблюдениям с помощью микроволнового зондирования [12]. Было создано несколько объединенных наборов спутниковых данных для предоставления непрерывных климатических

данных в стратосфере с 1979 г. по настоящее время [13]. Пересмотр и повторная обработка стратосферных наблюдений привело к повышению согласованности пересмотренных версий данных; однако некоторые различия остаются[14]. Тенденции стратосферной температуры из повторно обработанных наблюдений и из новых моделей SPARC CCMI, свидетельствуют о значительном улучшении согласованности между моделируемыми и наблюдаемыми трендами, в основном благодаря обновлениям спутниковых наблюдений. Диапазон смоделированных трендов был аналогичен диапазону моделей предыдущего поколения[15].

Результаты работы [16] подтвердили охлаждение стратосферы и увеличение температуры стратосферного с высотой; этот эффект обусловлен главным образом увеличением количества парниковых газов и модулируется изменением озонового слоя. Было обнаружено, что в верхней стратосфере и парниковые газы, и озон способствуют охлаждению, тогда как в средней стратосфере преобладают парниковые газы. В нижней стратосфере истощение озонового слоя было основным фактором похолодания до середины 1990-х годов. Наблюдаемые тенденции стратосферного охлаждения стали слабее примерно с 1998 г.[17], что отражает снижение содержания озоноразрушающих веществ и начало восстановления озонового слоя[18]

### 1.1.Полярный стратосферный вихрь

Полярный стратосферный вихрь образуется в стратосфере Арктического региона [19] примерно от 10 до 30 миль над Северным полюсом в зимнее время. Ветры расположены вокруг бассейна с очень холодным воздухом. При усилении ветра, воздух внутри будет более изолирован от самых теплых широт, поэтому он станет холоднее [20]. При температурах менее 200 К могут быть достигнуты условия для конденсации частиц полярных стратосферных облаков (ПСО). Известно, что ПСО играют важную роль в разрушении озона [19]. Достижение Арктическим полярным вихрем наибольшей силы и стабильности

приводит к смещению полярного струйного течения в тропосфере на север. В результате самый холодный воздух остается в Арктике. Когда вихрь ослабевает, начинает смещаться или затем отделяется, полярный струйный поток часто становится чрезвычайно волнистым, позволяя теплому воздуху проникать в Арктику, а полярному воздуху опускаться в средние широты [20].

В стратосфере тепловой режим имеет более выраженную сезонность, чем в тропосфере. Поскольку это в основном связано не с особенностями энергии взаимодействия атмосферы с активной поверхностью суши и океана, а с потоками лучистого тепла, испускаемым и поглощаемым термодинамически активными атмосферными примесями, особенно озоном[21].

Летом озон поглощает ультрафиолетовое излучение Солнца, что приводит к нагреву воздуха. Во время полярной ночи зимой воздух охлаждается длинноволновым излучением. В стратосфере, особенно на высотах 25-35 км, между зимой и летом возникают большие перепады температур. Это приводит к тому, что температурное поле от лета к зиме меняется на противоположное, уменьшаясь или увеличиваясь в высоких широтах в верхней стратосфере на 40-50°С или более.

В январе в высоких широтах наблюдается область холода из-за потери тепла стратосферой, которое она не может получить из-за отсутствия инфракрасного излучения. В низких широтах Северного полушария обнаружена полоса тепла, смещенная к северу над Тихим океаном. Однако основная область тепла захватывает приполярные районы Южного полушария, которые в январе непрерывно освещаются солнцем.

В июле, напротив, область тепла формируется над высокими широтами Северного полушария, а область холода — над высокими и средними широтами Южного полушария. Рассмотренные особенности температурного поля в стратосфере создают определенную структуру поля давления [22]. Поскольку геопотенциальная высота пропорциональна средней температуре слоя, область

тепла связана с областью высокого давления — антициклоническим циркумполярным вихрем, а область холода связана со стратосферным низким - область давления — циклонический циркумполярный вихрь [21].

Известно, что полярный вихрь не всегда оказывает свое влияние на зимнюю погоду в северных широтах, но если это произойдет, может случиться следующее: например, когда полярный вихрь обладает достаточной силой, полярное струйное течение может двигаться дальше на север и показывать более зональный поток с меньшей извилистостью. На первый взгляд это стабильное состояние стратосферы связано с более холодной, чем обычно, арктической и более мягкой, чем обычно, погодой в средних широтах. Арктическое колебание, которое отслеживает полушарный характер ветра и атмосферного давления часто бывает положительным [20].

#### 1.2.Внезапное стратосферное потепление

Впервые ВСП было обнаружено немецким метеорологом Ричардом Шерхагом в 1952 году. Советские метеорологи начали активно изучать ВСП в 60-70-е гг. За основу был взят анализ синоптических и сборно-кинепатических карт и типизация ВСП в зависимости от условий образования и локализации. Северные части Атлантики и Тихого океана были определены как регионы, в которых частота возникновения ВСП максимальна. В Южном полушарии ВСП возникают редко, так как наблюдаются небольшие контрасты между сушей и океаном [23].

Циркуляция арктической стратосферы зимой характеризуется сильной межгодовой изменчивостью, которая зависит в основном от распространения волновой активности из тропосферы. При этом стратосфера не только реагирует на распространение волн, но и может влиять на них, создавая, например, благоприятные условия для развития событий Внезапного стратосферного потепления (ВСП) [24] — важнейшие динамические явления арктической зимней стратосферы, во многом определяющие ее межгодовую

изменчивость. События ВСП сопровождаются повышением температуры полярной стратосферы, как правило, на 25–40 К в течение нескольких дней, ослаблением стратосферного полярного вихря, замедлением зональной циркуляции, а в некоторых случаях и изменением ее направления на противоположное. ВСП возникают за счет нелинейного взаимодействия планетарных волн, распространяющихся из тропосферы, и циркуляции стратосферы [25, 26]. Другим важным фактором являются гравитационные волны, которые способствуют возникновению и развитию ВСП [27, 28].

В течение нескольких недель, последовавших за стратосферным потеплением, полярное струйное течение часто принимает волнистую форму с глубокими впадинами и крутыми гребнями, которые могут оставаться почти неподвижными в течение нескольких дней. Точная природа взаимодействия — как полярное струйное течение "чувствует" возмущение полярного вихря и почему оно реагирует таким образом - до конца не изучена. Под хребтами высокого давления теплый воздух устремляется на север в некоторые районы Арктики, часто вызывая экстремальное таяние, в то время как полярный воздух заполняет впадины низкого давления, в результате чего зимние условия оказываются южнее, чем в среднем. Арктическое колебание часто переходит в отрицательную фазу [20].

По результатам анализа [23] было установлено, в качестве предиктора для прогнозирования потеплений можно использовать рост индекса орографического возбуждения в нижней тропосфере, так он начинается за несколько дней до ВСП. Также было выявлено, что образование блокирующих антициклонов или их эволюция в некоторых частях Северного полушария способствует развитию ВСП, причем потепление возникает после разрушения блокингов.

#### 1.3.Планетарные волны

Планетарные волны - это вертикально распространяющиеся возмущения, крупномасштабными которые определяются изменениями давления, Большая температуры, ветров состава. часть крупномасштабной изменчивости долготы в средней атмосфере обусловлена планетарными волнами. Они могут быть стационарными или перемещаться по долготе с периодами от нескольких дней до нескольких недель. Планетарные волны взаимодействуют с другими волнами и с фоновой атмосферой. Волны большой амплитуды могут способствовать быстрым изменениям ветра и температуры. Планетарные волны также играют определенную роль в воздействии стратосферных изменений на тропосферу[29].

Над Северным полушарием в зимний сезон струйный поток полярного фронта расположен над средними широтами (районы, расположенные между  $30^{\circ}$  и  $60^{\circ}$  северной широты), при этом скорость ветра колеблется от 193 до  $402^{\circ}$ км (от 120 до 250 миль) в час. Если циркуляция этого струйного течения сильная, полярный вихрь сохраняет примерно круглую форму с центром на Северном полюсе или очень близко нему. Колебания циркуляции струйного течения полярного фронта (называемые волнами Россби) атмосфере могут быть результатом поступления энергии, генерируемой контрастами температуры суши и океана, и воздуха, отклоняемого большими горными хребтами на пути струйного течения в стратосфере. Эти волны могут ослабить циркуляцию вокруг полярного вихря и сделать полярный вихрь более восприимчивым к распаду со стороны движущихся на север теплых воздушных масс и систем высокого давления. Распад полярного вихря может сместить часть основной области холодного климата арктического воздуха на юг на тысячи километров, что приведет к широкомасштабным «вспышкам холодного воздуха» или «волнам холода», которые могут снизить температуру воздуха до населенными районами Евразии или Северной опасного уровня над Америки.[30]

На основе исследований 1960-х годов был сделан вывод, что тропосферные планетарные волны и гравитационные волны, распространяться во внетропическую стратосферу и генерировать отложение который зонального импульса, может изменять стратосферную циркуляцию[31]. Планетарные волны играют важную роль в динамическом взаимодействии стратосферы и тропосферы, поскольку только сверхдлинные волны могут распространяться в стратосферу [32]. Изменения в стратосферных планетарных волнах могут повлиять на внезапное стратосферное потепление [33], стратосферный полярных вихрь[32], стратосферную температуру [34], циркуляцию Брюера-Добсона (ВD)[36] и перенос массы между стратосферой и тропосферой [34]. С другой стороны, стратосферные планетарные волны также влияют на тропосферу через соединение нисходящих волн [36]. В связи с этим изучение изменчивости стратосферной планетарной волны важно и необходимо для дальнейшего понимания взаимосвязи между стратосферой и тропосферой.

#### 2. Исходные данные и причины климатической изменчивости

Построение распределения метеорологических характеристик было выполнено по данным японского реанализа (Japanese 55-year Reanalysis). Данные использовались для холодного времени года в Северном полушарии с ноября 1958 г. по апрель 2020 г. Для дальнейшего анализа весь объем данных был разделен на 6 периодов, 5 из которых по 11 лет и один 7-летний : ноябрь 1958 г. - апрель 1969 г., ноябрь 1969 г. - апрель 1980 г., ноябрь 1980 г. - апрель 1991 г., ноябрь 1991 г. - апрель 2002 г., ноябрь 2002 г. — апрель 2013 г., ноябрь 2013 г. — апрель 2020 г.

При анализе зим использованных данных, отличие одного 11-летнего периода от другого может быть связано с тем, что спутниковые данные добавились В реанализ только c 1979 года, поэтому рассматриваемых периода (1958 г.- 1969 г., 1969 г.-1980 г.) могут отличаться от остальных, особенно на верхних модельных уровнях. Также на данные оказывает влияние климатическая изменчивость, которая включает в себя орбиты следующее: естественные изменения Земли, которые ΜΟΓΥΤ происходить во временных масштабах в тысячи лет. Естественные изменения на солнце, влияющие на количество поступающей солнечной радиации. Крупномасштабные извержения вулканов, при которых атмосферу выбрасывается большое количество пепла. Пепел может оставаться в атмосфере в течение нескольких месяцев или лет, отражая солнечный свет обратно в космос, что приводит к падению средней глобальной температуры поверхности. Изменения химического состава атмосферы (например, количества парниковых газов) – как естественные, так и вызванные деятельностью человека.

#### 2.1.Индекс солнечной активности

Говоря о климатической изменчивости, одной из причин которой является изменения солнечной активности, стоит упомянуть индекс солнечной активности 10,7 см (2800 МГц). Поток солнечного радиоизлучения на частоте 10,7 см (2800 МГц) является одним из наиболее широко используемых показателей солнечной активности. Его применение включает использование в качестве простого показателя уровня активности, в качестве косвенного показателя для других выбросов на Солнце или количеств, которые труднее получить.[38] Каждое значение F10.7 представляет собой измерение 10.7 полного излучения на длине волны СМ ОТ всех источников. присутствующих на солнечном диске, за 1-часовой период с центром в эпоху, указанную для значения. Эта величина на самом деле является плотностью потока, а не потоком, хотя ее принято называть потоком. Длины волн в районе 10 см лучше всего подходят для наблюдения за уровнем солнечной активности, поскольку солнечное излучение на этих длинах волн очень чувствительно к условиям в верхней хромосфере и в основании короны. Индекс F10.7 оказался очень полезным определения прогнозирования космической ДЛЯ И погоды. Поскольку это длинная запись обеспечивает климатологию солнечной активности за шесть солнечных циклов. Так как он исходит из хромосферы и солнечной короны, он отслеживает другие важные выбросы, образующиеся в областях атмосферы. Излучение тех же солнечной экстремального ультрафиолета (EUV), которое воздействует на ионосферу и изменяет верхние атмосферы, отслеживается индексом F10.7. Многие слои хорошо cультрафиолетовые излучения, воздействующие на стратосферу и озон, также коррелируют с индексом F10.7. Это измерение может быть выполнено надежно и точно с земли в любых погодных условиях, это очень надежный набор данных с небольшим количеством пробелов или проблем с калибровкой [39].

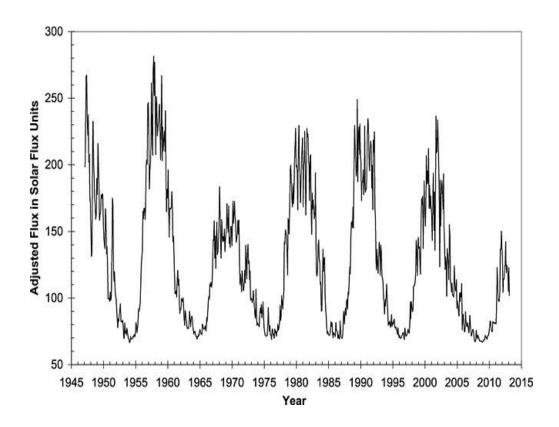


Рисунок 2.1.1 Среднемесячные значения F10,7 скорректированных (по шкале расстояний между Землей и Солнцем 1 а. е.) с 1947 года, по оси ординат — скорректированный поток в единицах солнечного потока (sfu), по оси абсцисс — время наблюдения(годы)[39].

Проанализировав график на рисунке 2.1.1. Можно сделать вывод о том, в конце 50-х годов начало 60-х наблюдалась высокая солнечная активность, а десятилетие 1960-х г. — 1970-х г. попадает в период слабой солнечной активности относительно других десятилетий. В период конца 70-х солнечная активность повысилась. Начиная с первой половины 80-х, 90-х и продолжаясь до конца 2000-х солнечная активность находилась на одном уровне, достаточно выше, чем в 60-х, но ниже, чем в 50-х. Низкая солнечная активность была в середине 80-х, конце 90-х и конце 2000-х, начале 2010-х. Поэтому разные десятилетия могут быть представлены разными зимами, опираясь на тот факт, что солнечная активность влияет на изменчивость климата.

#### 2.2. Данные JRA

Сравнивая выходные данные модели погоды или климата наблюдениями можно полагать, что выходные данные модели не только имеют регулярную привязку во времени и пространстве, но и являются полными. Доступность наблюдений зависит от охвата в пространстве и времени глобальных систем наблюдения, которые В включены: метеостанции, радиозонды, самолеты и приборы на борту спутников. Несмотря на это большое количество данных, охват не является полным, и качество данных может меняться со временем. Некоторая форма выбора и интерполяции данных или другая обработка могут привести наблюдения к единообразной форме, что является привлекательным c точки зрения анализа данных. математическая интерполяция может это сделать, но не дает никакой дополнительной информации, так как нефизична. В реанализе физические модели используются для предоставления дополнительной информации, что приводит к физически последовательному описанию.[40]

Реанализ объединяет наблюдения с модельными прогнозами, чтобы получить наилучшее представление о полной картине: климатических трендах, отдельных погодных явлениях и оценках не только исторически наблюдаемых переменных, таких как осадки, температура и давление, но также влажности почвы, верхних слоев атмосферы, ветры и вертикальная скорость в средней атмосфере. Наблюдения объединяются И модельные прогнозы использованием тех же методов усвоения данных, которые используются метеорологическими центрами по всему миру для проведения анализа или наилучшего предположения текущем глобальной состоянии метеорологической системы, чтобы инициализировать их прогнозы погоды[41].

Японский 55-летний реанализ (JRA-55) был разработан Японским метеорологическим агентством (JMA) с использованием Глобальной спектральной модели (GSM).[3] Целью являлось совершенствование

предыдущего 25-летнего реанализа (JRA-25), участниками которого являлись Японское метеорологическое агентство И Центральный научноисследовательский институт электроэнергетики (CRIEPI). В JRA-25 было обнаружено несколько недостатков. Период данного реанализа начинался с 1979 года, проблема в том, что он был коротким для изучения многодекадной изменчивости и изменения климата. В усовершенствованном реанализе JRA-55 данные включают в себя период с 1958 года, когда на масштабном уровне начались регулярные радиозондовые наблюдения. Значимыми недостатками JRA-25 являлись холодный уклон в нижней стратосфере, который сократился, и сухой уклон в бассейне Амазонки, который был смягчен. Улучшилась временная согласованность температуры. Всё это произошло благодаря в операционной системе ЈМА, в виде пересмотра схемы улучшениям длинноволнового излучения и внедрения четырехмерного анализа (4D-Var), и коррекции вариационного смещения (VarBC) для спутниковых излучений. Эти совершенствования значительно уменьшили погрешности модели, улучшили динамическую согласованность полей анализа и обработку спутниковых излучений.

#### 3. Полученные результаты

Для оценки интенсивности полярного вихря и планетарных волн в стратосфере были использованы данные японского реанализа JRA-55 по зональной компоненте ветра, температуре воздуха и геопотенциальной высоте в Северном полушарии за холодный сезон года в период с ноября по апрель 1958 г. до 2020 г. Данные были представлены в виде графиков с использованием интерактивной системы GrADS (Grid Analysis and Display System), предназначенной ДЛЯ анализа, визуализации обработки гидрометеорологических данных. Для анализа весь исследуемый период был разделен на шесть временных промежутков, 5 из которых по 11 лет и один – 7 лет.

#### 3.1. Случаи ВСП на высоте 30 − 45 км

В данном анализе рассмотрены случаи ВСП по графикам распределения среднезональной температуры на высоте 30 км и на северных широтах 77,5° -88,5° (такие широты выбраны для того, чтобы проанализировать большую область полярного региона) и среднезональной компоненте скорости ветра на высоте 45 км и на северной широте 62,5°. Из рекомендаций ВМО следует, что ВСП может быть двух типов: незначительное и значительное. При температура на любом уровне стратосферы незначительном потепление повысится не менее, чем на 25 градусов в течение недели, а при значительном потепление температура может вырасти на 30 градусов за неделю или меньше на уровне 10 гПа или ниже, при условиях выше уровня 10 гПа температура может вырасти на 40 градусов. Также при незначительном потепление скорость ветра в стратосфере может ослабевать, а при значительном потепление скорость ветра обращается, т.е. меняет свое направление с запада на восток. При значительных ВСП стратосферный полярный вихрь может расщепляться или смещаться.

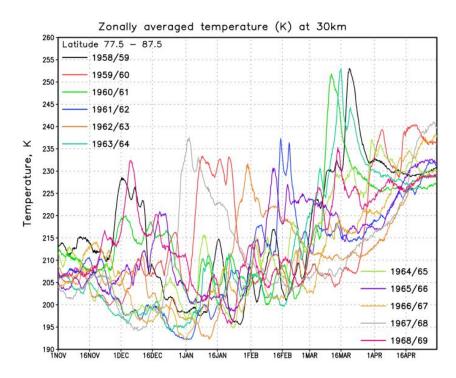


Рисунок 3.1.1 Среднезональное распределение температуры с ноября по апрель (1958 г. – 1969 г.), по оси ординат – температура (К), по оси абсцисс – время наблюдений (годы).

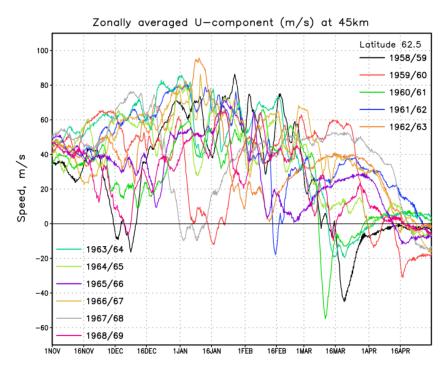


Рисунок 3.1.2 Среднезональное распределение зональной составляющей ветра с ноября по апрель (1958 г. – 1969 г.), по оси ординат – скорость и компонетны (м/с), по оси абсцисс – время наблюдений (годы).

В 1958 — 1959 гг. (рис 3.1.1) 6 марта наблюдался резкий, но непродолжительный «скачок» температуры, амплитуда составила 23 К. В это же время было обращение ветра (рис 3.1.2), после него зональная компонента ветра так и не поменяла свой знак, оставаясь отрицательной. Скорость составила -42 м/с. Максимальная скорость ветра 24 января 85 м/с и минимальная температура 196 К.

В 1959 — 1960 гг. (рис 3.1.1) было зафиксировано два «скачка». Первый произошел в период с 1 января по 1 февраля, что является довольно-таки продолжительным периодом, амплитуда была равна 30 К. Второй «скачок» случился 24 марта и продолжался до 1 мая, значение амплитуды составило 32 К. Зональная составляющая скорости ветра (рис 3.1.2) обратилась в ноль с 8 января по 8 февраля, скорость при обращении достигла -10 м/с, в дальнейшем скорость начала возрастать и к 1 апреля снова обратилась и оставалась отрицательной, 16 апреля было максимальное значение скорости при обращении равное — 30 м/с.

В 1960 – 1961 гг. (рис 3.1.1) значительный «скачок» произошел 4 марта и длился до 4 апреля. Амплитуда «скачка» равна 37 К. Обращение ветра (рис. 3.1.2) зафиксировано 8 марта, значение зональной составляющей ветра достигло -55м/с. Знак поменялся в положительную сторону 1 апреля.

В 1961 — 1962 гг. (рис 3.1.1) возник «скачок» с амплитудой 26 К, продолжительность с 10 февраля по 26 февраля. Обращение ветра (рис 3.1.2) было 14 февраля и уже 16 февраля вернулось к положительному значению. Скорость была равна — 20 м/с. Максимальная скорость 80 м/с, минимальная температура 193 К.

В 1962 – 1963 гг. (рис 3.1.1) наблюдался значительный скачок с амплитудой 40 К, продолжительностью с 14 января по 6 февраля. Обращение ветра (рис 3.1.2) за этот год было только после 16 апреля. В период с 8 января

по 14 января была зафиксирована максимальная скорость средней зональной составляющей ветра 95 м/с и минимальная температура 193 К.

В 1963 — 1964 гг. (рис 3.1.1)температурный «скачок» был с 8 марта по 1 апреля, его амплитуда равна 28 К. Обращение ветра (рис 3.1.2) зафиксировано 14 марта, зональная составляющая скорости ветра достигла значения -20 м/с. 1 апреля знак поменялся с отрицательного на положительный. Максимальная скорость ветра 85 м/с, минимальная температура 195 К.

В 1964 — 1965 гг. (рис 3.1.1) существенных «скачков» не происходило. Обращение зональной составляющей скорости ветра (рис 3.1.2) было только после 16 апреля. Максимальная скорость с 1 января по 4 января 80 м/с, минимальная температура 197 К.

В 1965 – 1966 гг. (рис 3.1.1) «скачок» температуры произошел в период с 24 января по 16 февраля, его амплитуда составила 32 К. Обращение ветра (рис 3.1.2) случилось только 14 апреля дойдя до значения – 10 м/с.

В 1966 — 1967 гг. (рис 3.1.1) не было зафиксировано значительных скачков температуры, а обращение ветра (рис 3.1.2) случилось только 16 апреля. 14 января максимальная скорость ветра достигла 85 м/с, 1 января минимальная температура была 193 К.

В 1967 – 1968 гг. (рис 3.1.1) температурный «скачок» был с 26 декабря до 4 января, его амплитуда составила 29 К. Обращение ветра (рис 3.1.2) наблюдалось с 1 января по 14 января, скорость достигла — 10 м/с. 18 апреля тоже случилось обращение ветра и скорость была равна -15 м/с. Температура в этот период постепенно увеличивалась с 16 марта до 1 мая, амплитуда 33 К.

В 1968 — 1969 гг. (рис 3.1.1) зафиксировано несколько «скачков» температуры. Первый произошел 28 ноября и длился до 14 декабря, его амплитуда равна 20 К. Обращение ветра возникло с 4 декабря по 8 декабря скорость достигла — 5 м/с. Второй «скачок» возник 20 февраля и продолжался

до 10 марта, амплитуда составила 22 К. Обращение ветра (рис 3.1.2) было 14 марта, скорость равна -10м/с. Дальнейшее обращение ветра было после 16 апреля и его скорость была -5 м/с.

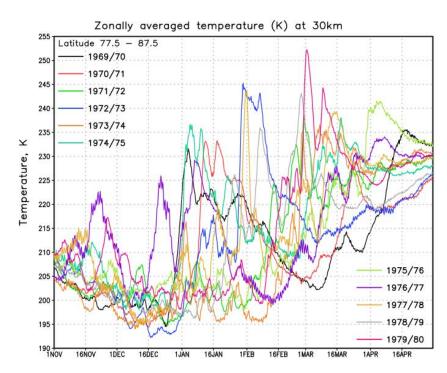


Рисунок 3.1.3 Среднезональное распределение температуры с ноября по апрель (1969 г. – 1980 г.) Аналогично рисунку 3.1.1.

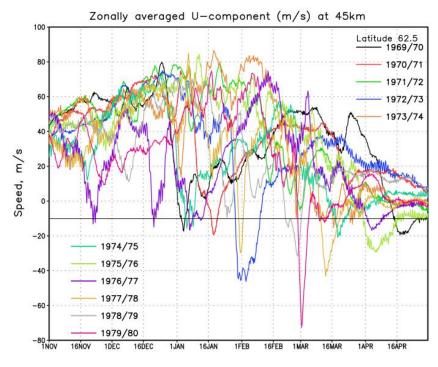


Рисунок 3.1.4 Среднезональное распределение зональной составляющей ветра

с ноября по апрель (1969 г. – 1980 г.). Аналогично рисунку 3.1.2.

В 1969 – 1970 гг. (рис 3.1.3) «скачок» произошел 24 декабря и длился до 8 января, амплитуда составила 37 К. Второе повышение температуры было уже не таким резким, началось оно 24 марта и продолжалось до 16 апреля, амплитуда равна 25 К. Обращение ветра (рис 3.1.4) было с 1 января по 8 января, далее ветер изменил знак с «-« на «+», скорость равна – 18 м/с. Второе обращение ветра было 12 апреля и знак ветра больше не менялся, скорость – 20 м/с. Максимальная скорость 80 м/с, минимальна температура 195 К.

В 1970 – 1971 гг. (рис 3.1.3) «скачок» температуры был со 2-го января по 24 января, амплитуда равна 33 К.Обращение ветра (рис 3.1.4) произошло до – 20 м/с с 16 января и длилось до 24 января, после этого скорость снова стала положительной

В 1971 — 1972 гг. (рис 3.1.3) был температурный «скачок» с амплитудой 19 К в период с 16 февраля по 26 февраля. 1 марта было обращение ветра (рис. 3.1.4), скорость равна — 2 м/с, после ветер снова сменил знак на положительный.

В 1972 — 1973 гг. (рис 3.1.3) значительный «скачок» температуры произошел 28 января и длился до 16 февраля, амплитуда температуры равна 37 К. Обращение ветра (рис. 3.1.4) началось 28 января и закончилось 12 февраля, скорость была равна — 45 м/с. Далее скорость ветра снова стала положительной.

В 1973 — 1974 гг. (рис 3.1.3) температурный «скачок» возник 26 февраля и продолжался до 3 марта, амплитуда равна 24 К. Ветер обратился (рис 3.1.4) с 6 марта по 28 апреля, скорость ветра равна — 18 м/с. В дальнейшем ветер снова стал положительным. 18 января максимальный ветер был равен 83 м/с, а минимальная температура в это время была равна 195 К.

В 1971 – 1975 гг. (рис 3.1.3) температурный «скачок» был зафиксирован в период с 28 декабря по 16 января, амплитуда температуры равна 31 К. Обращение ветра (рис 3.1.4) наблюдалось со 2-го января по 14 января, далее он

снова стал положительным. Второе обращение ветра случилось 14 марта, ветер достиг скорости -20 м/с и 4 апреля сменил знак на положительный.

В 1975 – 1976 гг. (рис 3.1.3) «скачок» температуры был с 26 марта по 8 апреля, амплитуда температуры 20 К. Обращение ветра (рис 3.1.4) произошло 30 марта и до мая знак зональной составляющей скорости ветра не изменился, скорость достигла — 28 м/с. Максимальный ветер 82 м/с, минимальная температура 200 К.

В 1976 — 1977 гг. (рис 3.1.3) наблюдалось несколько температурных «скачков». Первый из них случился в период с 12 декабря по 24 декабря, амплитуда температуры была 26 К. Второй «скачок» был с 30 декабря до 12 января, его амплитуда равна 23 К. Обращений ветра (рис 3.1.4) было несколько, наиболее продолжительное зафиксировано с 4 января по 16 января, скорость ветра достигла — 18 м/с, в дальнейшем ветер снова стал положительным. И с 1 апреля по май наблюдалось обращение, скорость ветра была — 18 м/с.

В 1977 — 1978 гг. (рис 3.1.3) первый температурный «скачок» произошел в период с 24 января по 3 февраля, амплитуда была равна 34 К. Второй «скачок» возник 8 марта и длился до 24 марта, его амплитуда температуры равна 26 К. Обращение ветра (рис 3.1.4) было с 28 января по 2 февраля, скорость достигала — 28 м/с. Второе обращение было с 10 марта по 18 марта, скорость составила — 42 м/с.

В 1978 — 1979 гг. (рис 3.1.3) было зафиксировано три температурных « скачка». Первый был с 17 января по 1 февраля, его амплитуда равна 23 К. Второй «скачок» наблюдался с 3 февраля по 15 февраля, амплитуда составила 23 К, следующий «скачок» появился в период с 17 февраля по 6 марта, амплитуда была равна 26 К Обращений ветра (рис 3.1.4) было два- с 24 января по 28 января, скорость — 8м/с и с 20 февраля по 1 марта, скорость достигала — 30 м/с.

В 1979 — 1980 гг. (рис 3.1.3) наблюдалось два «скачка». Первый появился 8 февраля и длился до 24 февраля, его амплитуда была равна 25 К. Второй возник 26 февраля и продолжался до 6 марта, амплитуда составила 29 К. Обращение ветра (рис 3.1.4) случилось 28 февраля и продолжалось до 22 марта, скорость достигала — 72 м/с. В дальнейшем скорость поменяла знак на положительный, но к 28 апреля снова обратилась в 0.

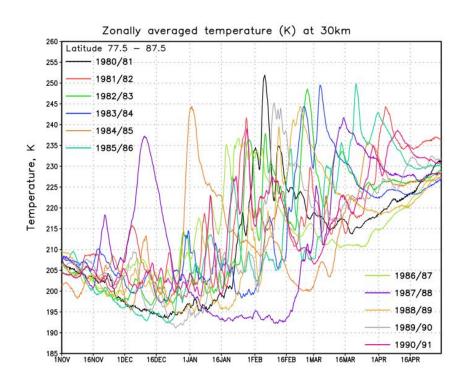


Рисунок 3.1.5 Среднезональное распределение температуры с ноября по апрель (1980 г. – 1991 г.). Аналогично рисунку 3.1.1

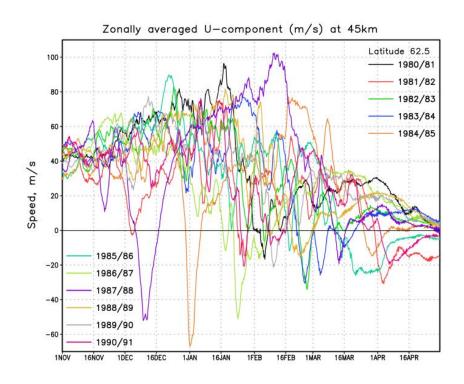


Рисунок 3.1.6 Среднезональное распределение зональной составляющей ветра с ноября по апрель (1980 г. – 1991 г.). Аналогично рисунку 3.1.2

В 1980 - 1981 гг. (рис.3.1.5) температурный «скачок» возник 22 января и длился до 8 февраля, его амплитуда составила 52 К. Обращение ветра (рис.3.1.6) было с 1 февраля до 8 февраля, скорость — 18 м/с, в дальнейшем ветер поменял знак на положительный и больше обращений не наблюдалось. Максимальная скорость ветра 95 м/с, минимальная температура в это время 197 К.

В 1981 - 1982 гг. (рис.3.1.5) наблюдалось несколько «скачков» температуры. Один их них возник 17 января и длился до 1 февраля, амплитуда была равна 40 К. Второй «скачок» наблюдался с 1 апреля по 14 апреля, амплитуда составила 20 К. Первое обращение ветра (рис.3.1.6) возникло 24 января и длилось до 28 января, скорость достигала — 15 м/с. Второе обращение ветра началось 28 марта и до мая знак скорости зональной составляющей ветра оставался отрицательным.

В 1982 - 1983 гг. (рис.3.1.5) зафиксировано 3 температурных «скачка». Первый с 24 января по 2 февраля, амплитуда равна 30 К. Второй «скачок» был со 2 февраля по 8 февраля, его амплитуда составила 26 К. Третий случился 18 февраля и продолжался до 6 марта, амплитуда равна 33 К. Обращение ветра (рис.3.1.6) с 4 по 6 февраля, скорость была равна -5 м/с. Еще одно обращение возникло с 24 февраля по 1 марта скорость была равна – 36 м/с.

В 1983 - 1984 гг. (рис.3.1.5) наблюдалось 2 «скачка». Первый был с амплитудой равной 37 К, его продолжительность с 16 февраля по 1 марта. Второй «скачок» был с 1 марта по 16 марта, амплитуда составила 20 К. Обращение ветра (рис.3.1.6) было с 18 февраля по 22 марта, скорость ветра достигала – 30 м/с.

В 1984 - 1985 гг. (рис.3.1.5) зафиксирован «скачок» появившийся 24 декабря и продлившийся до 10 января, амплитуда равна 48 К. Второй «скачок» возник 8 марта и продолжался до 6 апреля, амплитуда составила 32 К. Обращение ветра (рис.3.1.6) было зафиксировано с 28 декабря по 6 января, скорость ветра достигала -70 м/с.Второе обращение ветра наблюдалось с 24 марта по 4 апреля, скорость была равна — 15 м/с.

В 1985 - 1986 гг. (рис.3.1.5) было три температурных «скачка». Первый в период с 18 января по 26 января с амплитудой 20 К. Второй был с 10 февраля по 25 февраля, его амплитуда 29 К. Третий наблюдался с 1 марта по 10 марта с амплитудой 23 К. Обращений ветра (рис.3.1.6) было 2. С 16 февраля по 18 февраля, скорость -10 м/с. С 14 марта по май, скорость – 22 м/с.Максимальная скорость ветра равна 88 м/с, температура 193 К.

В 1986 - 1987 гг. (рис.3.1.5) «скачок» температуры наблюдался в период с 16 января по 8 февраля. Амплитуда равна 22 К. Обращение ветра (рис.3.1.6) возникло в эти же даты, скорость достигала – 50 м/с.

В 1987 - 1988 гг. (рис.3.1.5) «скачок» температуры зафиксирован в период с 1 декабря по 26 декабря, амплитуда 30 К. Второй «скачок» был с 4

марта до 18 марта, амплитуда составила 30 К. Было два обращения ветра (рис.3.1.6). С 4 декабря по 17 января со скоростью – 50 м/с. И еще одно с 10 марта по 16 апреля, скорость которого была – 20м/с. Минимальная температура 10 февраля равна 193 К, максимальная скорость ветра 101 м/с.

В 1988 - 1989 гг. (рис.3.1.5) «скачок» температуры был с 18 января по 1 февраля, амплитуда равна 24 К. Второй «скачок» был с 10 февраля по 16 февраля, амплитуда равна 27 К и снова произошел «скачок», который длился до 1 марта, его амплитуда составила 20 К. Обращение ветра (рис.3.1.6) произошло с 18 февраля по 1 марта, скорость равна – 15 м/с.

В 1989 - 1990 гг. (рис.3.1.5) температурный «скачок» наблюдался с 1 февраля по 16 февраля, амплитуда 45 К. Минимальная температура 192 К, максимальный ветер 78 м/с. Обращение ветра (рис.3.1.6) было с 8 февраля по 16 февраля, скорость – 20 м/с.

За 1990 - 1991 гг. (рис.3.1.5) было три температурных «скачка». Первый с 6 января по 16 января, амплитуда 24 К. Второй с 16 января по 24 января, амплитуда 27 К и третий с 24 января по 1 февраля, амплитуда 20 К. Обращение ветра (рис.3.1.6) было с 24 по 26 января, скорость — 20 м/с. Второе обращение было с 8 февраля по 16 февраля, скорость — 8 м/с. Третье обращение случилось 1 апреля и продолжалось по май, скорость равна — 20 м/с.

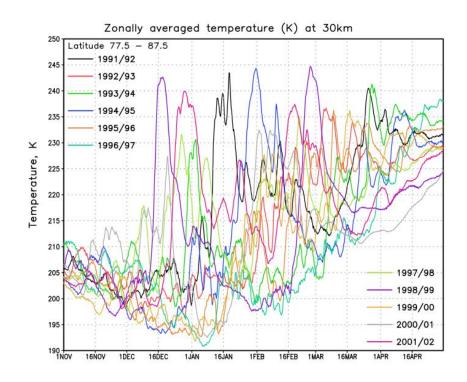


Рисунок 3.1.7 Среднезональное распределение температуры с ноября по апрель (1991 г. – 2002 г.). Аналогично рисунку 3.1.1

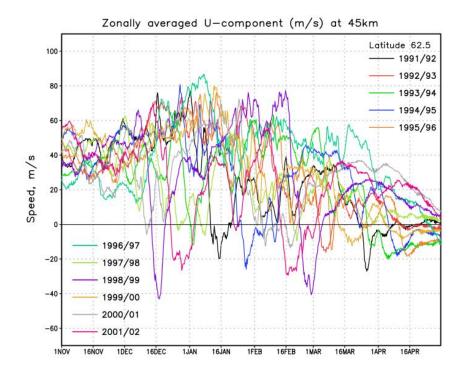


Рисунок 3.1.8 Среднезональное распределение зональной составляющей ветра с ноября по апрель (1991 г. – 2002 г.). Аналогично рисунку 3.1.2

В 1991 - 1992 гг. (рис. 3.1.7) «скачок» температуры возник 8 января и продолжался до 24 января, амплитуда 26 К. Второй «скачок» был с 8 марта по 28 марта, амплитуда 28 К. Обращение ветра (рис. 3.1.8) возникло 10 января и продолжалось до 18 января, скорость — 20 м/с. Второе обращение было с 24 марта по май, скорость — 25 м/с.

В 1992 - 1993 гг. (рис.3.1.7) не было значительных «скачков» температуры. Обращение ветра (рис. 3.1.8) было со 2-го марта по 10 марта, скорость – 18м/с.

В 1993 - 1994 гг. (рис.3.1.7) температурный «скачок» возник 24 декабря и продолжался до 6 января, его амплитуда составила 32 К. Второй произошел 4 марта и длился по 15 марта, амплитуда 23 К. Третий «скачок» возник 18 марта и продолжался до 1 апреля, амплитуда 22 К. Обращение ветра (рис. 3.1.8) случилось в период с 1 января по 4 января, скорость -10 м/с, следующее обращение возникло 26 марта и длилось до мая, скорость достигала – 20м/с.

В 1994 - 1995 гг. (рис.3.1.7) «скачок» температуры с амплитудой 45 К наблюдался в период с 12 января по 8 февраля. Второй «скачок» был с 16 марта по 26 марта, амплитуда 20 К. Обращение ветра (рис. 3.1.8) с 24 января по 12 февраля, скорость — 22 м/с. Следующее обращение ветра возникло с 4 апреля по май, скорость до — 19 м/с. Минимальная температура 194 К, максимальная скорость 80 м/с.

В 1995 - 1996 гг. (рис.3.1.7) температурный всплеск возник 14 февраля и продолжался до 24 февраля, амплитуда 24 К. Обращение ветра (рис. 3.1.8) 8 — 10 марта, скорость 17 м/с, второе обращение ветра с 15 апреля по май, скорость -20 м/с.

В 1996 - 1997 гг. (рис.3.1.7) температурный «скачок» не наблюдался. Обращение ветра (рис. 3.1.8) только в конце апреля , скорость — 10 м/с. Минимальная температура 191 К, максимальная скорость 82 м/с.

В 1997 - 1998 гг. (рис.3.1.7) наблюдалось 2 «скачка» температуры. Первый с 1 декабря по 16 декабря, амплитуда 20 К, второй с 16 декабря по 2 января, амплитуда 30 К. Наблюдались незначительные обращения ветра (рис. 3.1.8) со скоростью до – 5 м/с: 24 декабря, 8 января, 24 февраля.

В 1999 - 1999 гг. (рис.3.1.7) было два значительных «скачка» температуры. С 10 декабря по 24 декабря, амплитуда 40 К, второй с 16 февраля по 6 марта , амплитуда 45 К. Обращение ветра (рис. 3.1.8) с 15 декабря по 24 декабря, скорость — 41 м/с. Второе обращение с 24 февраля по 4 марта, скорость — 40 м/c.

В 1999 - 2000 гг. (рис.3.1.7) «скачок» температуры появился 10 марта и длился до 26 марта, амплитуда 23 К. Минимальная температура 192 К, максимальный ветер 80 м/c.

В 2000 - 2001 гг. (рис.3.1.7) «скачок» температуры возник 16 января и продолжался до 24 февраля, амплитуда равна 37 К. Обращение ветра (рис. 3.1.8) было с 1 февраля по 24 февраля, скорость – 12 м/с.

В 2001 - 2002 гг. (рис. 3.1.7) возник «скачок» температуры 15 декабря и длился до 12 января, амплитуда равна 42 К. Второй «скачок» возник 6 февраля и длился до 24 февраля, амплитуда 30 К. Обращение ветра (рис. 3.1.8) было с 24 декабря по 2 января, скорость — 22 м/с и второе обращение ветра случилось 15 февраля и длилось до 2 марта, скорость — 28 м/с.

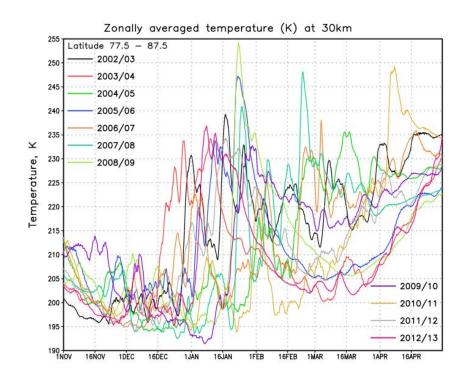


Рисунок 3.1.9 Среднезональное распределение температуры с ноября по апрель (2002 г. – 2013 г.). Аналогично рисунку 3.1.1.

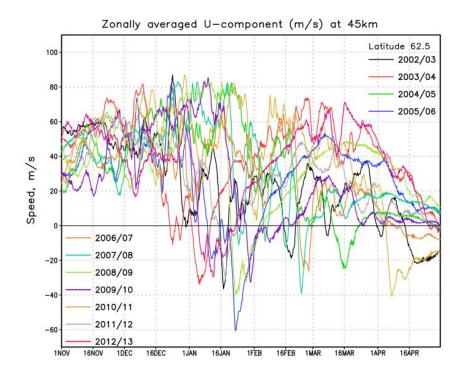


Рис. 3.1.10 Среднезональное распределение зональной составляющей ветра с ноября по апрель (2002 г. – 2013 г.). Аналогично рисунку 3.1.2.

В 2002 - 2003 гг. (рис.3.1.9) наблюдалось два температурных «скачка». Первый с 26 декабря по 8 января, амплитуда составила 33 К, второй возник с 15 января по 24 января, амплитуда 30 К. Обращение ветра (рис.3.1.10) с 16 января по 20 января, скорость — 38 м/с, второе обращение с 16 февраля по 24 февраля, скорость — 20 м/с, два незначительных обращений 8-10 марта и 1-4 апреля, скорость — 5 м/с, с 28 апреля по май, скорость — 20 м/с. 24 декабря максимальный ветер 85 м/с, минимальная температура 196 К.

В 2003 - 2004 гг. (рис.3.1.9) «скачок» был с 12 декабря по 16 января, амплитуда 37 К. Обращение ветра (рис.3.1.10) было с 22 декабря по 28 декабря со скоростью – 10 м/c и с 1 января по 12 января со скоростью – 35 м/c.

В 2004 - 2005 гг. (рис.3.1.9) температурный «скачок» зафиксирован с 24 января по 10 февраля, амплитуда 20 К и с 16 февраля по 8 марта, амплитуда равна 30 К. Обращение ветра (рис.3.1.10) было с 10 марта по 24 марта, скорость – 22 м/с. Максимальный ветер 80 м/с, температура 198 К.

В 2005 - 2006 гг. (рис.3.1.9) было два температурных «скачка». Первый с 6 января по 16 января, амплитуда 22 К, второй с 18 января по 1 февраля, амплитуда 20 К. Обращение ветра (рис.3.1.10) было с 8 января по 2 февраля, скорость — 60 м/c.

За 2006 - 2007 гг. (рис.3.1.9) было три «скачка» температуры с 28 декабря по 14 января, амплитуда 20 К, с 1 февраля по 10 февраля, амплитуда 22 К и с 18 февраля по 1 марта, амплитуда 27 К. Обращение ветра (рис.3.1.10) с 24 февраля по 1 марта, скорость — 22 м/с и с 8 апреля по май, скорость — 8 м/с.

В 2007 - 2008 гг. (рис.3.1.9) были зафиксированы значительные «скачки» температур с 18 января по 31 января с амплитудой 46 К, с 1 февраля по 8 февраля с амплитудой 30 К и с 20 февраля по 28 февраля с амплитудой 28 К. Обращение ветра (рис.3.1.10) с 22 января по 26 января, скорость — 10 м/с, с 6 февраля по 8 февраля, скорость — 8 м/с, с 15 февраля по 17 февраля, скорость —

12 м/с, с 24 февраля по 28 февраля, скорость — 40 м/с. Максимальная скорость 80 м/с, минимальная температура 194 К.

В 2008 - 2009 гг. (рис.3.1.9) значительный «скачок» температуры наблюдался с 14 января по 1 февраля, амплитуда 60 К. Обращение ветра (рис.3.1.10) было с 18 января по 4 февраля, скорость – 40 м/с.

В 2009 - 2010 гг. (рис.3.1.9) «скачок» температуры был с 8 января по 1 февраля, амплитуда равна 41 К. Обращение ветра (рис.3.1.10) было с 24 января по 15 февраля, скорость — 32 м/с. Максимальная скорость 81 м/с, минимальная температура 192 К.

В 2010 - 2011 гг. (рис.3.1.9) температурный «скачок» возник с 24 января по 8 февраля с амплитудой 30 К, второй «скачок» был с 1 апреля по 12 апреля с амплитудой 26 К. Обращение ветра (рис.3.1.10) было с 4 апреля по май, скорость — 40 м/с. Максимальная скорость 82 м/с, минимальная температура 195 К.

В 2011 - 2012 гг. (рис.3.1.9) наблюдался «скачок» температуры с 6 января по 28 января с амплитудой 24 К. Обращение ветра (рис.3.1.10) было с 16 января по 24 января, скорость — 30 м/с.

В 2012 - 2013 гг. (рис.3.1.9) «скачок» температуры был с 1 января по 18 января с амплитудой 40 К. Обращение ветра (рис.3.1.10) было с 4 января по 24 января, скорость — 30 м/c.

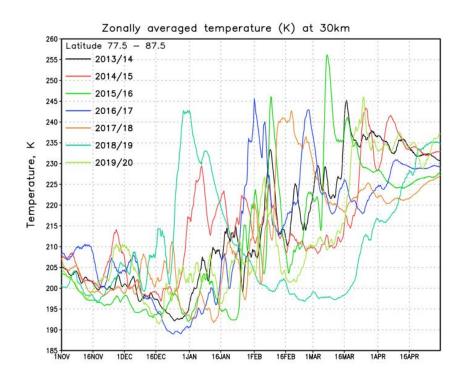


Рисунок 3.1.11 Среднезональное распределение температуры с ноября по апрель (1981 г. – 1991 г.). Аналогично рисунку 3.1.1.

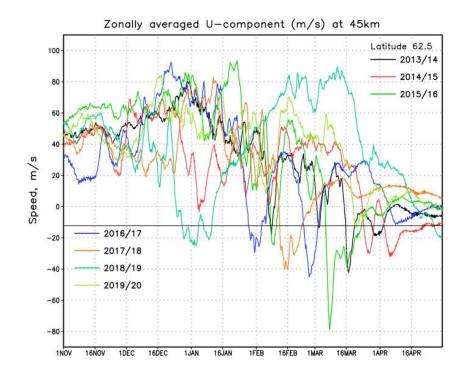


Рисунок 3.1.12 Среднезональное распределение зональной составляющей ветра с ноября по апрель (2014 г. – 2020 г.). Аналогично рисунку 3.1.1.

В 2013 - 2014 гг. (рис.3.1.11) «скачок» температуры был зафиксирован со 2-го февраля по 15 февраля, амплитуда равна 26 К.Второй был с 10 марта по 24 марта, амплитуда 23 К.Обращение ветра (рис.3.1.12) было 8-10 февраля со скоростью — 18 м/с, 1-4 марта со скоростью — 15 м/с и с 16 марта по май, скорость — 40 м/с. Максимальная скорость 80 м/с, минимальная температура 193 К.

В 2014 - 2015 гг. (рис.3.1.11) температурный «скачок» был в период с 24 декабря по 10 января, амплитуда 31 К. Второй «скачок» зафиксирован с 18 марта по 1 апреля, амплитуда 28 К. Обращение ветра (рис.3.1.12) было с 24 марта по май со скоростью -30 м/с.

В 2015 - 2016 гг. (рис.3.1.11) температурный «скачок» был с 24 января по 4 февраля с амплитудой 31 К и с 4 февраля по 17 февраля амплитуда «скачка» составила 41 К. Третий «скачок» был с 4 марта по 14 марта, амплитуда 42 К. Обращение ветра (рис.3.1.12) случилось 8 февраля и продолжалось по 12 февраля со скоростью - 22 м/с, с 4 марта по 4 апреля, скорость — 70 м/с. 18-24 января максимальная скорость ветра составила 90 м/с, минимальная температура 193 К

В 2016 - 2017 гг. (рис.3.1.11) температурный «скачок» был с 20 января по 8 февраля с амплитудой 45 К и с 24 февраля по 4 марта с амплитудой 23 К. Обращение ветра (рис.3.1.12) было с 22 января по 8 февраля со скоростью — 28 м/с, второе с 24 февраля по 2 марта со скоростью — 42 м/с и третье с 4 апреля по май со скоростью — 10 м/с. Минимальная температура с 18 по 26 декабря была равна 189 К, максимальная скорость ветра 90 м/с.

В 2017 - 2018 гг. (рис.3.1.11) температурный «скачок» был с 28 января по 4 февраля с амплитудой 23 К и с 8 февраля по 4 марта с амплитудой 31 К. Обращение ветра (рис.3.1.12) было с 12 февраля по 1 марта со скоростью — 40 м/с. Максимальная скорость 80 м/с, минимальная температура 192 К.

В 2018 - 2019 гг. (рис.3.1.11) температурный «скачок» был значительный с 22 декабря по 8 января, амплитуда составила 42 К. Обращение ветра (рис.3.1.12) случилось 25 декабря и продолжалось до 12 января со скоростью — 22 м/с и с второе было с 16 апреля по май, скорость — 20 м/с. С 8 по 16 марта максимальная скорость равна 88 м/с, минимальная температура 197 К.

В 2019 - 2020 гг. (рис.3.1.11) температурный «скачок» был с 1 февраля по 14 февраля с амплитудой 24 К и с 6 марта по 28 марта с амплитудой 36 К. Обращение ветра (рис.3.1.12) наблюдалось с 18 марта по 26 марта со скоростью – 12 м/с. 16 декабря максимальная скорость ветра была 82 м/с, а минимальная температура 192 К.

# Результаты случаев ВСП:

За первое 11-тилетие исследуемого периода (ноябрь - апрель 1958 г. – 1969 г.) было зафиксировано пять значительных ВСП и три незначительных ВСП. Средняя амплитуда значительных ВСП составила 34 градуса, а незначительных потеплений равна 28 градусов. Количество обращений ветра равно одиннадцати, средняя скорость за всё десятилетие составила – 21 м/с. Количество экстремально сильных состояний (состояние, при котором большие положительные скорости зональной составляющей ветра и низкие температуры) стратосферного полярного вихря равно четырем: в 1958 - 1959 гг., 1961 - 1962 гг., 1962 - 1963 гг., 1963 - 1964 гг.

Во втором 11-тилетие исследуемого периода (ноябрь - апрель 1969 г. – 1980 г.) зафиксировано пять значительных ВСП и шесть незначительных ВСП. Средняя амплитуда значительных ВСП составила 34 градуса, а незначительных потеплений равна 26 градусов. Обращение ветра за 11-тилетний период было 14 раз, средняя скорость при обращении составила — 26 м/с. Количество экстремально сильных состояний стратосферного полярного вихря равно трем: в 1969 - 1970 гг., 1973 - 1974 гг., 1975 - 1976 гг.

В третьем 11-тилетие исследуемого периода (ноябрь - апрель 1980 г. – 1991 г.) зафиксировано десять значительных ВСП и четыре незначительных ВСП. Средняя амплитуда значительных ВСП составила 38 градусов, а незначительных потеплений равна 27 градусов. Наблюдалось 19 случаев обращения ветра, средняя скорость равна — 24 м/с. Количество экстремально сильных состояний стратосферного полярного вихря равно трем: в 1980 - 1981 гг., 1985 - 1986 гг., 1987 - 1988 гг.

В четвертом 11-тилетие исследуемого периода (ноябрь - апрель 1991 г. – 2002 г.) зафиксировано восемь значительных ВСП и два незначительных ВСП. Средняя амплитуда значительных ВСП составила 38 градусов, а незначительных потеплений равна 27 градусов. Наблюдалось 15 случаев обращения ветра, средняя скорость равна — 18 м/с. Количество экстремально сильных состояний стратосферного полярного вихря равно трем: в 1994 — 1995 гг., 1996 - 1997 гг., 1999 - 2000 гг.

В пятом 11-тилетие исследуемого периода (ноябрь - апрель 2002 г. – 2013 г.) зафиксировано девять значительных ВСП и два незначительных ВСП. Средняя амплитуда значительных ВСП составила 39 градусов, а незначительных потеплений равна 27 градусов. Обращение ветра за 10-тилетний период было 21 раз, средняя скорость при обращении составила – 25 м/с. Количество экстремально сильных состояний стратосферного полярного вихря равно пяти: в 2002 - 2003 гг., 2004 - 2005 гг., 2007 - 2008 гг., 2009 - 2010 гг., 2010 - 2011 гг.

В шестом исследуемом периоде (ноябрь - апрель 2013 г. – 2020 г.) зафиксировано восемь значительных ВСП и два незначительных ВСП. Средняя амплитуда значительных ВСП составила 38 градусов, а незначительных потеплений равна 27 градусов. Обращение ветра за 11-тилетний период было 13 раз, средняя скорость при обращении составила – 28 м/с. Количество экстремально сильных состояний стратосферного полярного вихря равно

шести: в 2013 - 2014 г., 2015 - 2016 г., 2016 - 2017 г., 2017 - 2018 г., 2018 - 2019 гг., 2019 - 2020 гг.

#### Вывод:

- амплитуда ВСП первых двух исследуемых периодов ( 1958 г. 1969 г. и 1969 г. 1980 г.) на 4-5 градуса оказалась ниже по сравнению с амплитудой за остальные периоды;
- частота значительных ВСП возросла, незначительных уменьшилась по сравнению с первыми двумя периодами (1958 г. 1969 г. и 1969 г. 1980 г.);
- за весь период исследования обращения ветра случались чаще, чем случаи повышения температуры и могли возникать при повышении температуры ниже, чем на 25 градусов (значение для ВСП рекомендованное ВМО), большее количество (4 случая) таких явлений было зафиксировано в четвертом исследуемом периоде (1991 г. -2002 г.)
- количество экстремально сильных состояний стратосферного полярного вихря увеличилось за последние два периода наблюдений ( 2002 г. 2003 г. и 2013 г. 2020 г.)

# 4. Влияние ВСП на стратосферный полярный вихрь

Для того чтобы определить влияние ВСП на стратосферный циркумполярный вихрь было построено распределение геопотенциальных высот за исследуемый период. При ВСП может происходить вытягивание полярного вихря, смещение относительно центра или расщепление вихря. Построение распределения геопотенциальной высоты показывает форму, которую может принять вихрь. Для анализа использована осредненная геопотенциальная высота за выбранный период (ноябрь-апрель) каждого года начиная с 1958 г. Для анализа выбрано несколько уровней: 5 гПа, 20 гПа и 30 гПа (осреднение было по 11 лет, например, 1958-1969 г. и тд.)

Для примера рассмотрен случай влияния ВСП на полярный вихрь зимой 1962 — 1963 годов (рис.3.1.1). Данное ВСП считается значительным, так как повышение температуры составило 40°. Это внезапное потепление сказалось на расположении полярного вихря — он принял вытянутую форму, что хорошо заметно на уровне 20 гПа (рис.4.2, панель 5), на уровне 5 гПа (рис. 4.1, панель 5) это менее заметно.

Примером того, как незначительное ВСП может влиять на положение полярного вихря является 1969 - 1970 гг., амплитуда «скачка» температуры составила 25°. На рисунках 4.2 и 4.8 (панель видно, что произошло смещение центра полярного вихря. Можно предполагать, что на смещение повлияло обращение зональной составляющей ветра (рис.3.1.4) в этот год.

Самое высокое значение амплитуды температурного «скачка» за весь исследуемый период было в 2008 - 2009 гг. (рис 3.1.9) – 60 К, при этом наблюдалось и обращение среднезональной составляющей скорости ветра, скорость которой достигала – 40 м/с. Эти метеорологические характеристики отразились на положение полярного вихря (рис. 4.12), он вытянулся и его площадь в центре увеличилась до 60 ° с.ш., охватывая Западную-Сибирь. На

высоте 5 гПа (рис. 4.11) площадь центра полярного вихря была примерно до  $72^{\circ}$  с.ш.

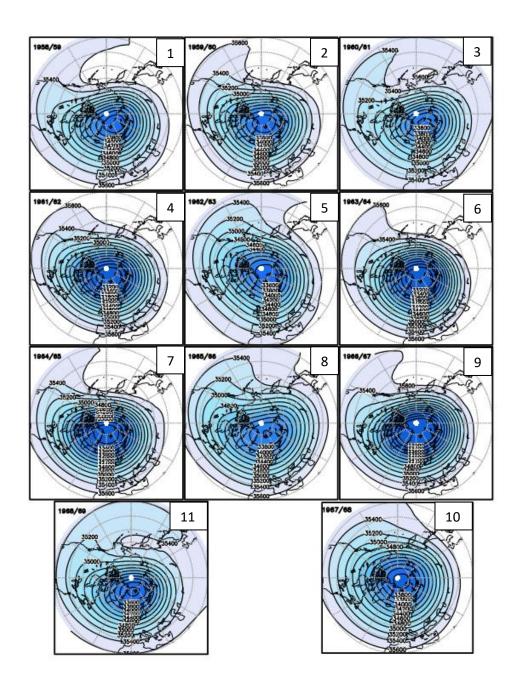


Рисунок 4.1 Геопотенциальная высота (гп.м) на уровне 5 гПа с ноября по апрель (1958 г. – 1969 г.).

- зима 1958/59 гг., 2 зима 1959/60 гг., 3 зима 1960/61 гг.,
- зима 1961/62 гг., 5 зима 1962/63 гг., 6 зима 1963/64 гг.,
- зима 1964/65 гг., 8 зима 1965/66 гг., 9 зима 1966/67 гг., 10 зима 1967/68 гг., 11 зима 1968/69 гг.

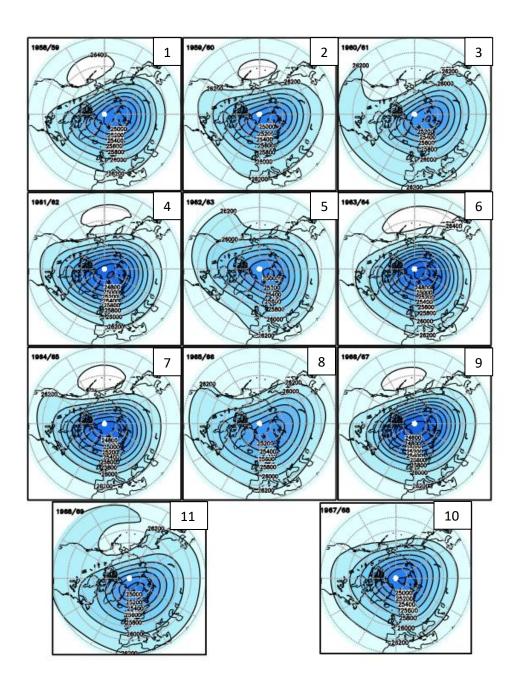


Рисунок 4.2 Геопотенциальная высота (гп.м) на уровне 20 гПа с ноября по апрель (1958 г. – 1969 г.). Аналогично рисунку 4.1.

Проанализировав высоту центра стратосферного полярного вихря, следует выделить следующее: за период 1959 г. – 1969 г. на уровне 5 гПа (рис. 4.1) наименьшее значение высоты центра полярного вихря было в 1966 - 1967 гг., значение которой составило 33000 гп.м. наибольшее значение геопотенциальной высоты над Арктическим регионом на этом уровне

наблюдается в 1958 — 1959 гг., 1959 - 1960 гг., 1960 - 1961 гг., 1962 - 1963 гг. она равна 33600 гп.м. На уровне 20 гПа (рис. 4.2) за этот же период наименьшая высота центра была тоже в 1966 - 1967 гг., значение которой составило 24600 гп.м. Наибольшее значение высоты центра полярного вихря на этом уровне отмечено в 1965 - 1966 г., составило 25200 гп. м.

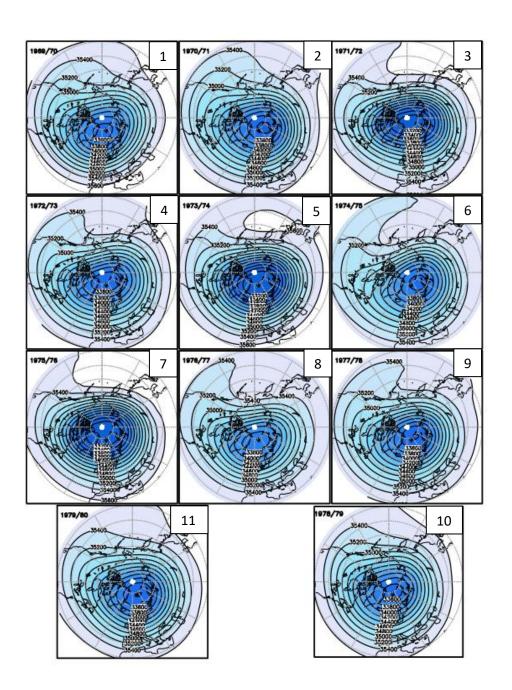


Рисунок 4.3 Геопотенциальная высота (гп.м) на уровне 5 гПа с ноября по апрель (1969г. – 1980 г.).

Аналогично рисунку 4.1 только для периода 1969 - 1980 гг.

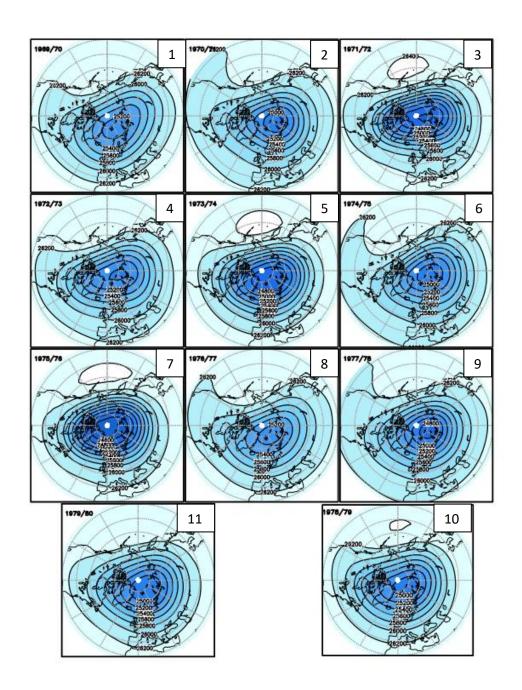


Рисунок 4.4 Геопотенциальная высота (гп.м) на уровне 20 гПа с ноября по апрель (1969 г. – 1980 г.).

Аналогично рисунку 4.1 только для периода 1969 - 1980 гг.

За период 1969 г. – 1980 г. на уровне 5 гПа (рис. 4.3) наименьшая высота центра полярного вихря была в 1971 - 1972 гг., в 1973 - 1974 г. и в 1975 - 1976 гг., значение которой составило 33200 гп.м. Самое больше значение высоты

центра над полярным регионом равно 33800 гп. м. за 1976 - 1977 гг. На уровне 20 гПа (рис. 4.4) за этот же период наименьшая высота центра была в 1971 - 1972 гг. и 1975 - 1976 гг., значение составило 24600 м. Самая большая высота центра стратосферного полярного вихря на этом уровне отмечена в 1969 - 1970 г., в 1976 - 1977 г. она равна 25200 гп. м.

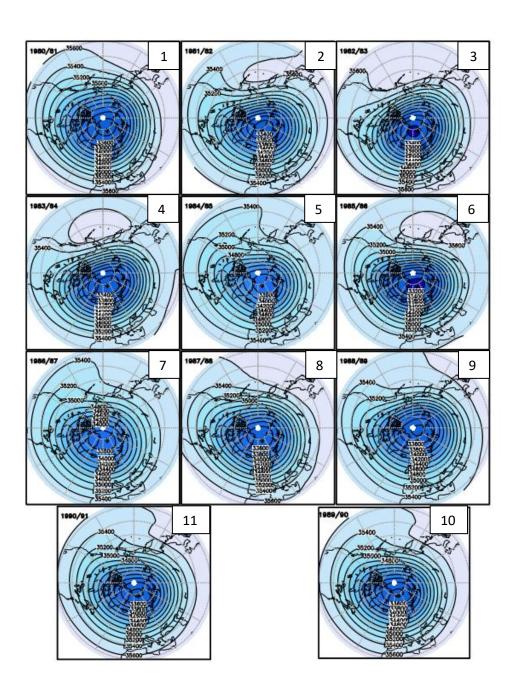


Рисунок 4.5 Геопотенциальная высота (гп.м) на уровне 5 гПа с ноября по апрель (1980г. — 1991 г.).

Аналогично рисунку 4.1 только для периода 1980 - 1991 гг.

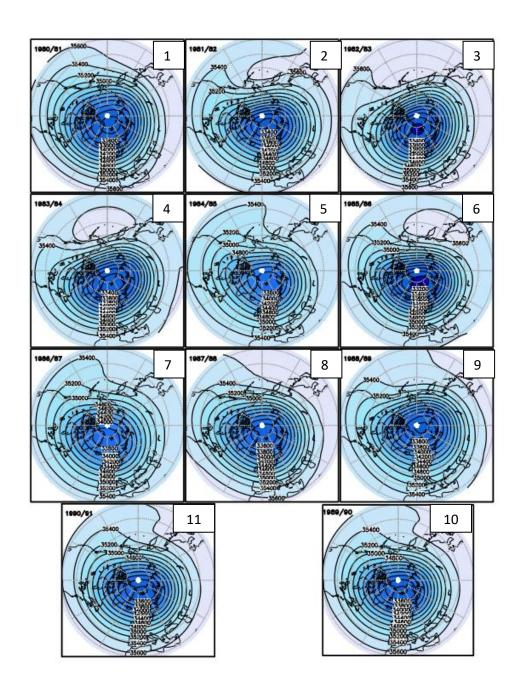


Рисунок 4.6 Геопотенциальная высота (гп.м) на уровне 20 гПа с ноября по апрель (1980 г. — 1991 г.). Аналогично рисунку 4.1 только для периода 1980 - 1991 гг.

За период 1980 г. — 1991 г. на уровне 5 гПа (рис. 4.5) наименьшая высота центра полярного вихря была в 1982 - 1983 гг., в 1985 - 1986 гг., значение которой составило 33200 гп. м. Самое больше значение высоты центра равно 33800 м. за 1984 - 1985 гг., 1986 - 1987 гг. На уровне 20 гПа (рис. 4.6) за этот

же период на наименьшая высота центра была в 1982 - 1983 гг., значение составило 24600 гп. м. Самая большая высота центра на этом уровне отмечена в 1984 - 1985 гг., 1986 - 1987 гг., она равна 25200 гп. м.

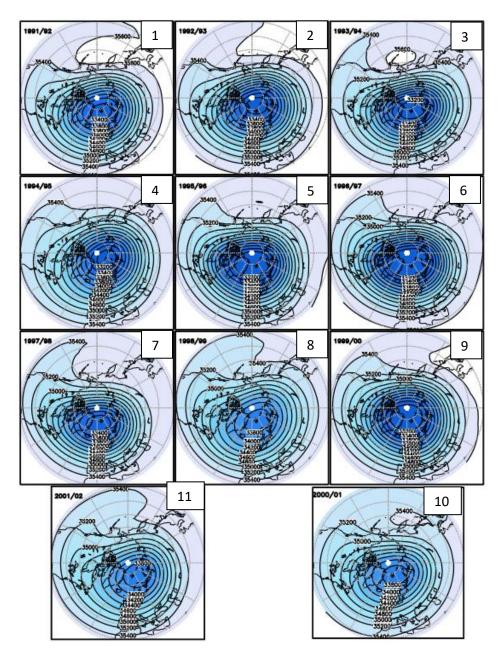


Рисунок 4.7 Геопотенциальная высота (гп.м) на уровне 5 гПа с ноября по апрель (1991 г. – 2002 г.).

Аналогично рисунку 4.1 только для периода 1991 - 2002 гг.

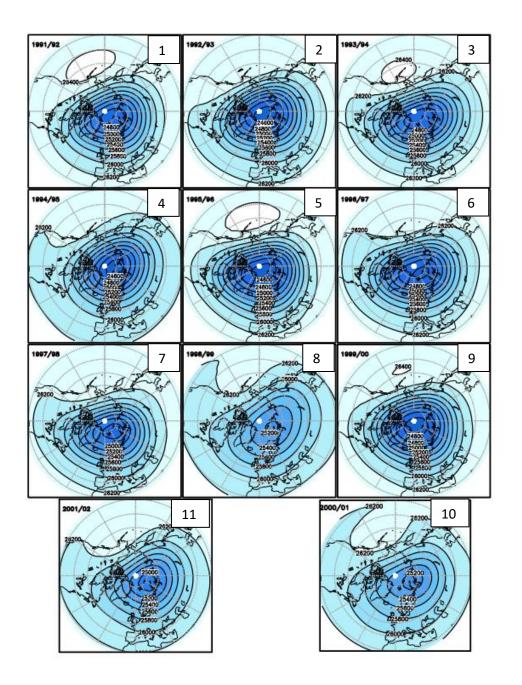


Рисунок 4.8 Геопотенциальная высота (гп.м) на уровне 20 гПа с ноября по апрель (1991 г. – 2002 г.).

Аналогично рисунку 4.1 только для периода 1991 - 2002 гг.

За период 1991 г. – 2002 г. на уровне 5 гПа (рис. 4.7) наименьшая высота центра полярного вихря была в 1992 - 1993 гг., 1993 - 1994 гг., 1994 - 1995 гг., 1995 - 1996 гг., 1996 - 1997 гг., 1999 - 2000 гг., значение которой составило 33200 гп. м. Самое больше значение высоты центра равно 33800 гп. м. за 1998 -

1999 гг., 1999 - 2001 гг., 2001 - 2002 гг. На уровне 20 гПа (рис. 4.8) за этот же период наименьшая высота центра была в 1992 - 1993 гг., 1994 - 1995 гг., 1995 - 1996 гг., 1996 - 1997 гг., 1999 - 2000 гг. значение высоты составило 24600 гп.м. Самая большая высота центра на этом уровне отмечена в 1998 - 1999 гг., в 2000 - 2001 гг., она равна 25200 гп. м.

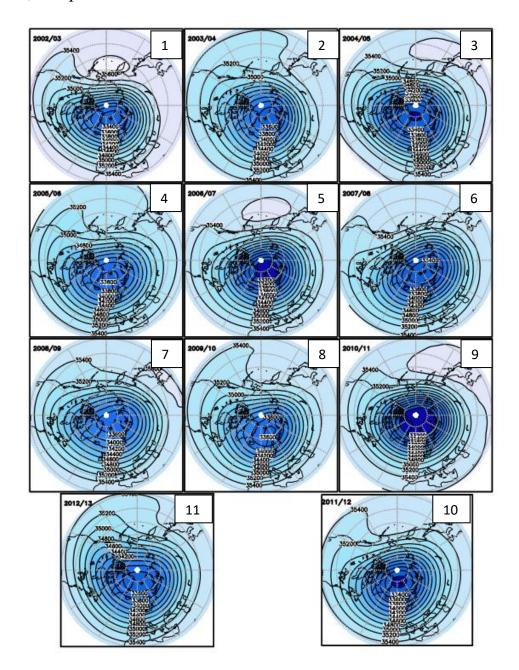


Рисунок 4.9 Геопотенциальная высота (гп.м) на уровне 5 гПа с ноября по апрель (2002 г. – 2013 г.).

Аналогично рисунку 4.1 только для периода 2002 - 2013 гг.

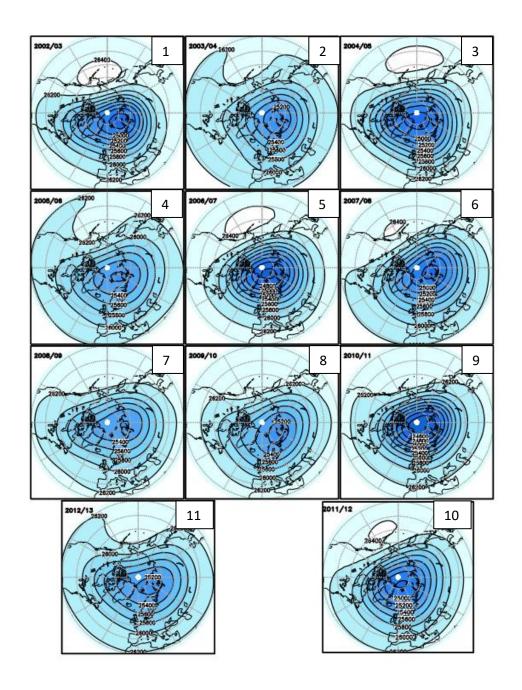


Рисунок 4.10 Геопотенциальная высота (гп.м) на уровне 20 гПа с ноября по апрель (2002 г. – 2013 г.).

Аналогично рисунку 4.1 только для периода 2002 - 2013 гг.

За период 2002 - 2013 гг. на уровне 5 гПа (рис. 4.9) наименьшая высота центра полярного вихря была в 2004 - 2005 гг., 2006 - 2007 гг., 2010 - 2011 гг., 2011 - 2012 гг., значение которой составило 33200 гп. м. Самое больше значение высоты центра равно 33800 гп. м. за 2008 - 2009 гг. На уровне 20 гПа

(рис. 4.10) за этот же период наименьшая высота центра была в 2006 - 2007 гг., 2010 - 2011 гг. значение составило 24600 гп.м. Самая большая высота центра на этом уровне отмечена в 2003 - 2004 гг., 2005 - 2006 гг., 2008 - 2009 гг., 2009 - 2010 гг., 2012 - 2013 гг., она равна 25200 гп. м.

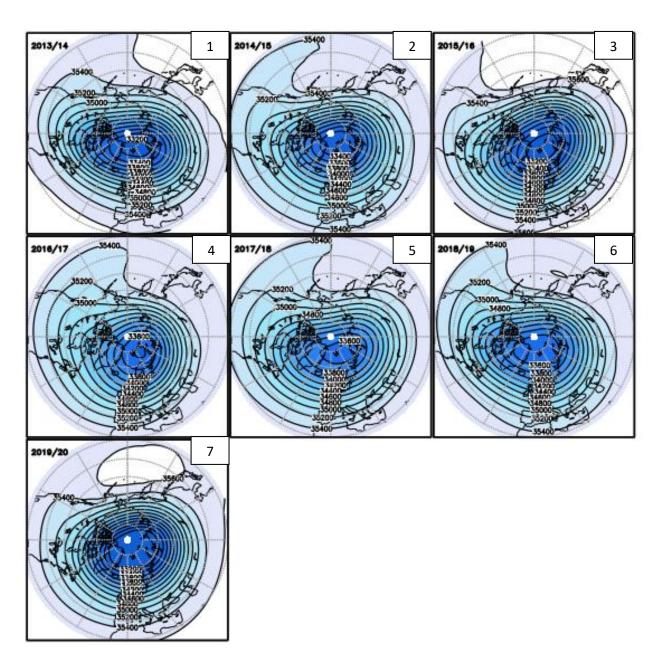


Рисунок 4.11 Геопотенциальная высота (гп.м) на уровне 5 гПа с ноября по апрель (2013 г. – 2020 г.).

Аналогично рисунку 4.1 только для периода 2013 - 2020 гг.

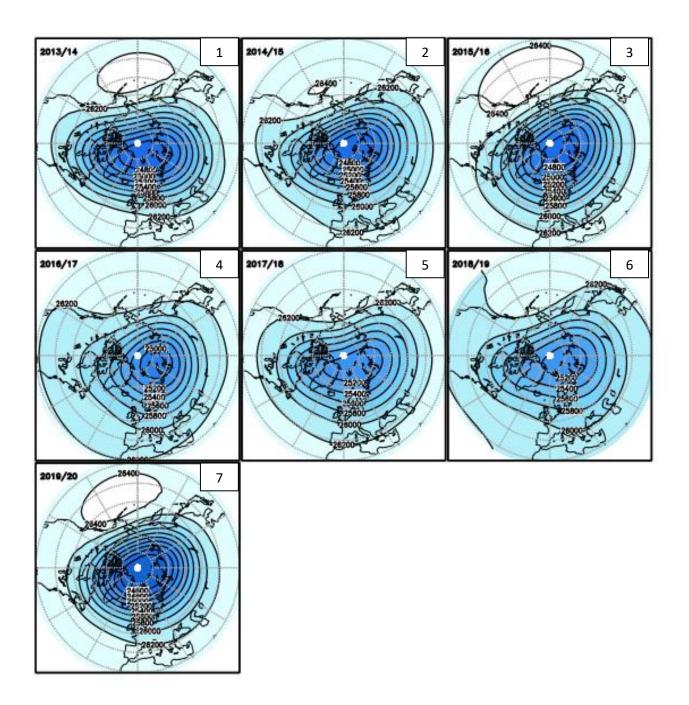


Рисунок 4.12 Геопотенциальная высота (гп.м) на уровне 20 гПа с ноября по апрель (2013 г. – 2020 г.).

Аналогично рисунку 4.1 только для периода 2013 - 2020 гг.

За период 2013 — 2020 гг. на уровне 5 гПа (рис. 4.11) наименьшая высота центра полярного вихря была зимой: 2013 - 2014 гг., 2015 - 2016 гг., 2019 - 2020 гг., значение которой составило 33200 гп. м. Самое больше значение высоты центра равно 33600 гп.м. за 2017 - 2018 гг., 2018 - 2019 гг. На уровне 20 гПа

(рис. 4.12) за этот же период наименьшая высота центра была в 2019 - 2020 гг. значение составило 24600 гп. м. Самая большое значение высоты центра на этом уровне отмечено в 2017 - 2018 гг., в 2018 - 2019 гг., она равна 25200 гп. м.

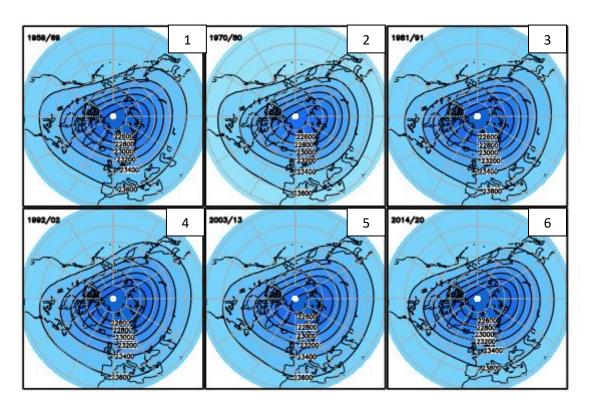


Рисунок 4.13 Геопотенциальная высота (гп.м) на уровне 30 гПа с ноября по апрель (1958 г. – 2020 г.).

1 – зима 1958 - 1969 гг., 2 – зима 1969 - 1980 гг., 2 – зима 1980 - 1991 гг.,

4 – зима 1991 – 2002 гг., 5 – зима 2002 – 2013 гг., 6 – зима 2013 – 2020 гг.

Анализируя рис. 4.13 можно отметить два периода: 1991 г. - 2002 г. (рис. 4.13, панель 4) и 2013 г. - 2020 г. (рис. 4.13, панель 6) так как на них заметно увеличение площади центра полярного вихря, которая сместилась на часть Западной Сибири до  $65^{\circ}$  с.ш. и часть Гренландии до  $75^{\circ}$  с.ш.

# Выводы:

— наибольшее давление в центре стратосферного полярного вихря за весь исследуемый период было зафиксировано зимой 1966 – 1967 гг. На

- уровне 5 гПа давление в центре составило приблизительно 7,5 гПа (33000 гп.м.). На уровне 20 гПа  $\approx 26,7$  гПа (24600 гп.м);
- чаще всего высокое давление наблюдалось за периоды 2002 2013 гг. и 2013 2020 гг. Количество случаев соответственно: 6 и 4. Давление на уровне 5 гПа составило  $\approx 7,3$  гПа (33200 гп.м.). Давление на уровне 20 гПа  $\approx 26,7$  гПа (24600 гп.м.);
- наименьшее давление на уровне 5 гПа в центре стратосферного полярного вихря составило  $\approx 6,6$  гПа (33800 гп.м) за весь исследуемый период, кроме двух: 1958 1969 гг. и 2013 2020 гг. в эти периоды давление было  $\approx 6,8$  гПа (33600 гп.м.). На уровне 20 гПа за все исследуемые периоды давление составило  $\approx 24,3$  гПа (25200 гп.м.);
- чаще всего низкое давление наблюдалось на уровне 5 гПа за периоды: 1958 1969 гг., 1969 1980 гг., 1991 2002 гг., количество случаев 3, в периоде 1958 1969 гг. давление  $\approx 6.8$  гПа (33600 гп.м.), в остальных периодах  $\approx 6.6$  гПа (33800 гп.м). На уровне 20 гПа в период 2002 2013 гг. зафиксировано 5 случаев, давление  $\approx 24.3$  гПа (25200 гп.м.);
- смещение центра стратосферного полярного вихря за 1991 г. 2002 г. и 2013 г. 2020 г. на уровне 30 гПа может быть обусловлено частыми ВСП за эти сроки наблюдений.

## 5. Анализ стационарных планетарных волн.

Для выполнения анализа была получена первая и вторая гармоники. Первой гармоникой при разложение является стационарная планетарная волна с волновым числом 1 (СПВ1), а вторая соответственно – с волновым числом 2 (СПВ2). Было проанализировано отклонение гармоник от климатических средних значений. Климат был рассчитан за весь анализируемый период холодного сезона с 1958 г. по 2020 г.

За холодный период 1958 — 1969 гг. (рис. 5.1, верхняя панель) в основном изменения, отклонения которых от 200 гп.м., наблюдались выше 5 км. (6 случаев). В начале марта можно отметить отклонение на 100 гп.м на уровне 25 км. За этот же промежуток времени отклонение на высоте 5 км. составило 200 гп.м. В конце декабря — начале января наблюдался период отрицательных значений, что говорит о слабой волновой активности, на уровне 15 км. отклонение составило — 200 гп.м., на уровне выше 5 км., отклонение было — 250 гп.м. Также были зафиксированы отклонения в конце января — начале февраля, -200 гп.м. на уровне 17 км. Итого: было 2 периода со слабой волновой активностью, максимальное отклонение, которых составило — 200 гп.м. на уровне 15-17 км.

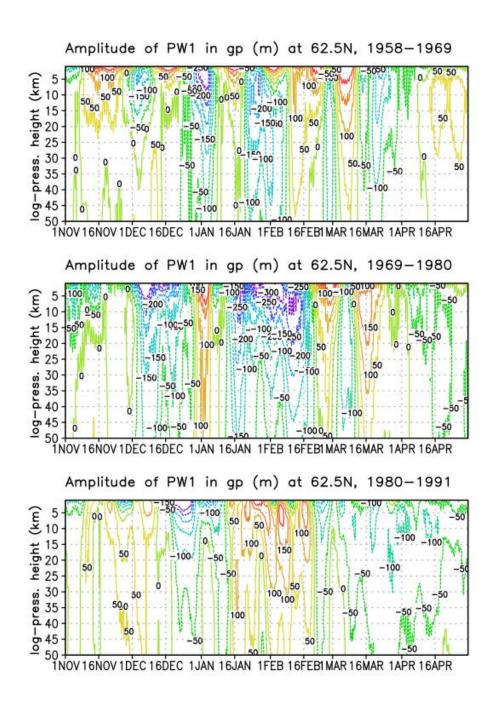


Рисунок 5.1 Амплитуда стационарной планетарной волны с волновым числом 1 с учетом климатической составляющей на высотах стратосферы за холодный период в Северном полушарии. Частота изолиний – 50 гп.м.Ось ординат – лог – изобарическая высота (км), ось абсцисс – время наблюдений (годы). Верхняя панель – 1958 – 1969 гг., средняя панель – 1969 – 1980 гг., нижняя панель 1981 – 1990 гг.

В 1969 г. – 1980 г. (рис.5.1, средняя панель) зафиксировано 2 периода слабой волновой активности. Первый отмечается с 1 по 24 декабря и его максимальное отклонение на 5 км составило – 300 гп.м, отклонения – 200 гп. достигли уровня 17 км. Период с 16 января по 16 февраля наиболее продолжительный. Отклонения – 200 гп.м. доходили до 30 км. Наибольшее отклонение было зафиксировано от 10 км и выше и составило – 300 гп.м. Зафиксировано 3 случая непродолжительных положительных отклонений, максимальное значение равно 200 гп.м и находится выше 10 км. На уровне 30 км значение отклонения составило 150 гп.м.

За период 1980 — 1991 гг. (рис.5.1, нижняя панель) не наблюдалось таких отрицательных значений, как в двух предыдущих периодах, максимальное отрицательное значение составило — 150 гп.м на уровне выше 5 км. С 16 января по 16 февраля исследуемого периода зафиксировано наибольшее отклонение от климатических средних значений, которое составило 150 гп.м на уровне 15 км.

За период 1991 — 2002 гг. (рис. 5.2, верхняя панель) таких отрицательных периодов, как за 1958 — 1969 гг. и 1969 — 1980 гг. не наблюдается. Максимальное отклонение составляет 200 гп.м и находится на уровне 20 км.

За 2002 — 2013 гг. (рис.5.2, средняя панель) наблюдается период положительных отклонений, его продолжительность с 1 декабря по 8 января, максимальное отклонение равно 200 гп. м на уровне 20 км,. Зафиксирован длинный период отрицательных значений (слабая волновая активность) с 16 января по 16 марта, минимальное отклонение составляет — 150 гп.м. С 1 по 16 апреля отклонения положительные отклонения с максимальным значением 150 гп.м. наблюдались выше уровня 5 км.

В период с 2013 г. по 2020 г., наблюдается в феврале и в марте отклонение на уровне 40 км. С максимальным значением 200 гп.м. Значительных отрицательных отклонений не наблюдается.

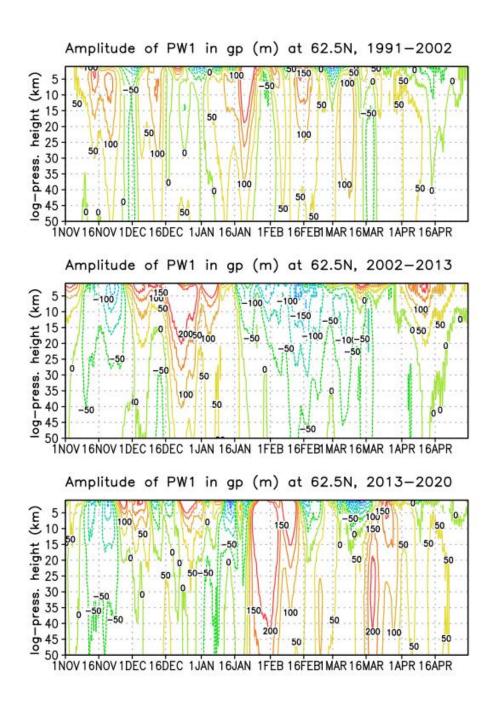


Рисунок 5.2 Амплитуда стационарной планетарной волны с волновым числом 1 с учетом климатической составляющей на высотах стратосферы за холодный период в Северном полушарии. Частота изолиний – 50 гп.м.Ось ординат – лог – изобарическая высота (км), ось абсцисс – время наблюдений (годы). Верхняя панель – 1991 – 2002 гг., средняя панель – 2002 – 2013 гг., нижняя панель 2013 – 2020 гг.

За холодный период 1958 — 1959 гг. (рис. 5.3, верхняя панель) были зафиксированы отрицательные отклонения, минимальное значение которых составило — 90 гп.м на уровнях 35 км. и 20 км. Также было одно единственное положительное отклонение на уровне 15 км, оно равно 60 гп.м.

В 1969 г. – 1980 г. (рис. 5.3, средняя панель) наблюдалось 3 коротких периода с отрицательными значениями, которые равны - 50 гп.м на разных уровнях. Положительное отклонение зафиксировано на высоте 20 км. и составляет 100 гп.м.

В 1980-1991 гг.(рис. 5.3, нижняя панель) положительное отклонение составило 150 гп.м на уровне от 10 км до 20 км

За зиму 1991 — 2002 гг. (рис. 5.4, верхняя панель) был зафиксирован отрицательный период с минимальным значением — 90 гп.м на уровне 20 км, единственное положительное отклонение составило 90 гп. м. на уровне выше 5 км.

В 2002 - 2013 гг. (рис. 5.4, средняя панель) наблюдались отрицательные периоды, отклонение составило -100 гп.м. на уровне 15 км.

В 2013 – 2020 гг. (рис. 5.4, нижняя панель) был период с положительными отклонениями, максимальное значение равно 150 гп.м. на уровне 20 км.

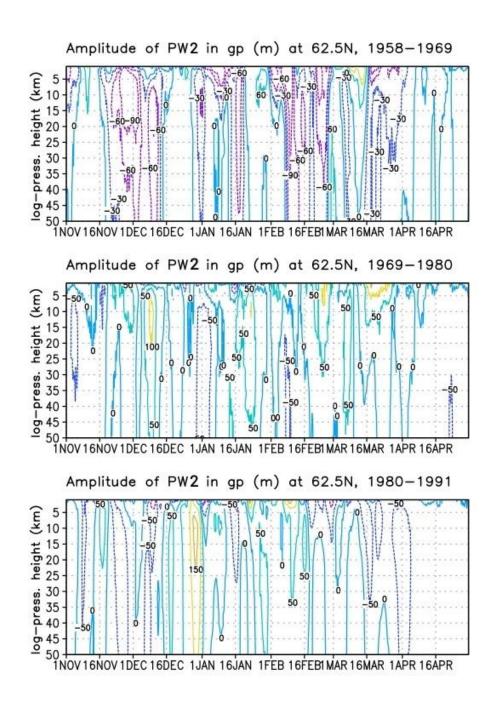


Рисунок 5.3 Амплитуда стационарной планетарной волны с волновым числом 2 с учетом климатической составляющей на высотах стратосферы за холодный период в Северном полушарии. Ось ординат – лог – изобарическая высота (км), ось абсцисс – время наблюдений (годы). Верхняя панель – 1958 – 1969 гг. (частота изолиний – 30 гп.м), средняя панель – 1969 – 1980 гг. (частота изолиний – 50 гп.м), нижняя панель – 1981 – 1990 гг. (частота изолиний – 50 гп.м).

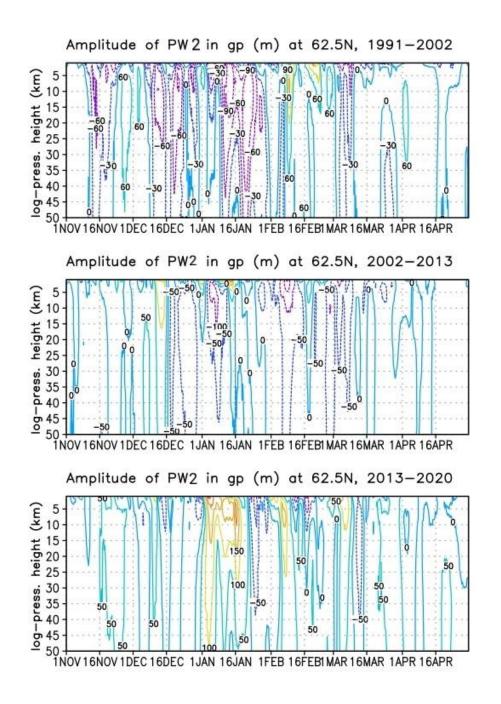


Рисунок 5.4 Амплитуда стационарной планетарной волны с волновым числом 2 с учетом климатической составляющей на высотах стратосферы за холодный период в Северном полушарии. Ось ординат — лог — изобарическая высота (км), ось абсцисс — время наблюдений (годы). Верхняя панель — 1991 — 2002 гг. (частота изолиний — 30 гп.м), средняя панель — 2002 — 2013 гг. (частота изолиний — 50 гп.м), нижняя панель 2013 — 2020 гг. (частота изолиний — 50 гп.м).

Проанализировав отклонение гармоник от климатических средних значений можно сделать следующий вывод:

- в период с 1969 1980 гг. наблюдалась слабая волновая активность СПВ1. Наибольшее отклонение было зафиксировано от 10 км и выше и составило 300 гп.м.
- сильная волновая активность СПВ1 зафиксирована в следующие периоды: 2002 2013 гг. и 2013 2020 гг. Максимальное отклонение за все периоды составило 200 гп.м,
- самое протяженное отклонение было за период 2013 2020 гг. от 40 км до 1 км
- количество отрицательных отклонений сократилось для СПВ1 по сравнению с первыми двумя периодами (1958 1969 гг. и 1969 1981 гг.)
- наибольшее количество периодов слабой волновой активности СПВ2 наблюдалось в периодах: 1958 1959 гг. и 1991 2002 гг.
- сильная волновая активность СПВ2 зафиксирована в 2013 2020 гг., отклонение составило 150 гп.м. от уровня 20 км и выше.

#### Заключение

С использованием данных реанализа JRA-55 в работе были рассмотрены и проанализированы холодные периоды (ноябрь – апрель) с 1958 года по 2020 год (весь исследуемый временной интервал был поделен на 6 периодов, первые пять из которых по 11 лет и последний 7лет) и сделаны следующие выводы:

- амплитуда ВСП первых двух исследуемых периодов (1958 г. 1969 г. и 1969 г. 1980 г.) на 4-5 градуса оказалась ниже по сравнению с амплитудой за остальные периоды;
- частота сильных ВСП возросла, слабых (рост температуры 25-30 К) уменьшилась по сравнению с первыми двумя периодами (1958 г. 1969 г. и 1969 г. 1980 г.);
- за весь период исследования обращения ветра случались чаще, чем случаи повышения температуры и могли возникать при повышении температуры ниже, чем на 25 градусов (значение для ВСП рекомендованное ВМО), большее количество (4 случая) таких явлений было зафиксировано в четвертом исследуемом периоде (1991 г. -2002 г.)
- количество экстремально сильных состояний стратосферного полярного вихря увеличилось за последние два периода наблюдений (2002 г. 2013 г. и 2013 г. 2020 г.);
- смещение центра стратосферного полярного вихря за 1991 г. 2002 г. и
  2013 г. 2020 г. на уровне 30 гПа может быть обусловлено частыми ВСП за эти периоды наблюдений;
- наибольшее давление в центре стратосферного полярного вихря за весь исследуемый период было зафиксировано зимой 1966 1967 гг. На уровне 5 гПа давление в центре составило приблизительно 7,5 гПа (33000 гп.м.). На уровне 20 гПа ≈ 26,7 гПа (24600 гп. м)

- чаще всего высокое давление наблюдалось за периоды 2002-2013 гг. и 2013-2020 гг. Количество случаев соответственно: 6 и 4. Давление на уровне 5 гПа составило  $\approx 7,3$  гПа (33200 гп.м.). Давление на уровне 20 гПа  $\approx 26,7$  гПа (24600 гп.м.)
- в период с 1969 1980 гг. наблюдалась слабая волновая активность СПВ1. Наибольшее отклонение было зафиксировано от 10 км и выше и составило 300 гп.м.
- сильная волновая активность СПВ1 зафиксирована в следующие периоды: 2002 2013 гг. и 2013 2020 гг. Максимальное отклонение за все периоды составило 200 гп.м,
- наибольшее количество периодов слабой волновой активности СПВ2 наблюдалось в периодах: 1958 1959 гг. и 1991 2002 гг.
- сильная волновая активность СПВ2 зафиксирована в 2013 2020 гг., отклонение составило 150 гп.м. от уровня 20 км и выше.

Отличие одного 11-летнего периода от другого может быть связано с тем, что спутниковые данные начали ассимилировать в реанализ только с 1979 года, поэтому первые два рассматриваемых периода (1958 г.- 1969 г., 1969 г.-1980 г.) могут отличаться от остальных, особенно на верхних модельных уровнях. Также на распределение исследуемых параметров может оказывать влияние естественное изменение климата.

## Список используемых источников

- 1. M.L. Brusseau, H.L. Bohn, in Environmental and Pollution Science (Third Edition), 2019
- 2. Maycock, A. C., and Coauthors, 2018: Revisiting the mystery of recent stratospheric temperature trends. *Geophys. Res. Lett.*, 45, 9919–9933, https://doi.org/10.1029/2018GL078035.
- 3. Trenberth, K. E., and Coauthors, 2013: Challenges of a sustained climate observing system. *Climate Science for Serving Society*, G. R. Asrar and J. W. Hurrell, Eds., Springer, 13–50.
- 4. Randel, W. J., A. K. Smith, F. Wu, C.-Z. Zou, and H. Qian, 2016: Stratospheric temperature trends over 1979-2015 derived from combined SSU, MLS and SABER satellite observations. *J. Climate*, 29, 4843–4859, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0629.1.
- 5. Haimberger, L., C. Tavolato, and S. Sperka, 2012: Homogenization of the global radiosonde temperature dataset through combined comparison with reanalysis background series and neighboring stations. J. Climate, 25, 8108–8131, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00668.1.
- 6. Zou, C.-Z., M. Gao, and M. D. Goldberg, 2009: Error structure and atmospheric temperature trends in observations from the Microwave Sounding Unit. J. Climate, 22, 1661–1681, https://doi.org/10.1175/2008JCLI2233.1.
- 7. Lott, F. C., P. A. Stott, D. M. Mitchell, N. Christidis, N. P. Gillett, L. Haimberger, J. Perlwitz, and P. W. Thorne, 2013: Models versus radiosondes in the free atmosphere: A new detection and attribution analysis of temperature. J. Geophys. Res. Atmos., 118, 2609–2619, https://doi.org/10.1002/jgrd.50255.
- 8. Thompson, D. W. J., and Coauthors, 2012: The mystery of recent stratospheric temperature trends. *Nature*, 491, 692–697, https://doi.org/10.1038/nature11579.
- 9. Santer, B. D., and Coauthors, 2013: Human and natural influences on the changing thermal structure of the atmosphere. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 110, 17 235–17 240, https://doi.org/10.1073/pnas.1305332110

- 10. Hartmann, D. L., and Coauthors, 2013: Observations: Atmosphere and surface. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, T. F. Stocker et al., Eds., Cambridge University Press, 159–254.
- 11. Lott, F. C., P. A. Stott, D. M. Mitchell, N. Christidis, N. P. Gillett, L. Haimberger, J. Perlwitz, and P. W. Thorne, 2013: Models versus radiosondes in the free atmosphere: A new detection and attribution analysis of temperature. J. Geophys. Res. Atmos., 118, 2609–2619, https://doi.org/10.1002/jgrd.50255.
- 12. Zou, C.-Z., M. D. Goldberg, and X. Hao, 2018: New generation of U.S. satellite microwave sounder achieves high radiometric stability performance for reliable climate change detection. Sci. Adv., 4, eaau0049, https://doi.org/10.1126/sciadv.aau0049.
- 13. Randel, W. J., A. K. Smith, F. Wu, C.-Z. Zou, and H. Qian, 2016: Stratospheric temperature trends over 1979-2015 derived from combined SSU, MLS and SABER satellite observations. J. Climate, 29, 4843–4859, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0629.1.
- 14. Seidel, D. J., and Coauthors, 2016: Stratospheric temperature changes during the satellite era. J. Geophys. Res. Atmos., 121, 664–681, https://doi.org/10.1002/2015JD024039.
- 15. Karpechko, A. Y., A. C. Maycock, M. Abalos, H. Akiyoshi, J. M. Arblaster, C. I. Garfinkel, K. H. Rosenlof, and M. Sigmond, 2019: Stratospheric ozone and climate. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018. Global Ozone Research Monitoring Project 58, WMO, accessed 21 December 2019, http://eprints.whiterose.ac.uk/142289.
- 16. Maycock, A. C., and Coauthors, 2018: Revisiting the mystery of recent stratospheric temperature trends. Geophys. Res. Lett., 45, 9919–9933, https://doi.org/10.1029/2018GL078035.
- 17. Randel, W. J., L. Polvani, F. Wu, D. E. Kinnison, C.-Z. Zou, and C. Mears, 2017: Troposphere-stratosphere temperature trends derived from satellite data compared with ensemble simulations from WACCM. J. Geophys. Res. Atmos., 122, 9651–9667, https://doi.org/10.1002/2017JD027158.

- 18. Solomon, S., and Coauthors, 2017: Mirrored changes in Antarctic ozone and stratospheric temperature in the late 20th versus early 21st centuries. J. Geophys. Res. Atmos., 122, 8940–8950, https://doi.org/10.1002/2017JD026719.
- 19. A.A. Cheremisin, A.V. Kushnarenko, V.N. Marichev, S.V. Nikolashkin, P.V. Novikov., 2014: Arctic polar stratospheric vortex and clouds. http://www.scert.ru/f/219/MainPart/Podnebesnyh.pdf
- 20. Rebecca Lindsey, Understanding the Arctic polar vortex, 2021. https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/understanding-arctic-polar-vortex
- 21. N. V. Podnebesnykh, V. P. Gorbatenko, I. I. Ippolitov, 2007: Large-scale atmospheric circulation over Western Siberia, UDC 551.515. http://www.scert.ru/f/219/MainPart/Podnebesnyh.pdf
- 22. M.A. Volkova, I.V. Kuzhevskaya: Climatology. Theoretical and applied aspects [Electronic resource]: educational and methodical complex; TSU, 2011.https://www.ggf.tsu.ru/content/faculty/structure/chair/meteorology/publications/ Климатология/text/51.html
- 23. О.С.Кочеткова, В.И. Мордвинов, М.А. Руднева Анализ факторов, влияющих на возникновение стратосферных потеплений // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 8 С. 719-726.
- 24. Baldwin, M.; Birner, T.; Brasseur, G.; Burrows, J.; Butchart, N.; Garcia, R.; Geller, M.; Gray, L.; Hamilton, K.; Harnik, N.; et al. 100 Years of Progress in Understanding the Stratosphere and Mesosphere. *Meteorol. Monogr.* 2019, *59*, 27.1–27.61.
- 25. Matsuno, T. A dynamical model of stratospheric sudden warming. J. Atmos. Sci. 1971, 28, 1479–1494.
- 26. Pogoreltsev, A.; Savenkova, E.; Aniskina, O.; Ermakova, T.; Chen, W.; Wei, K. Interannual and intraseasonal variability of stratospheric dynamics and stratosphere-troposphere coupling during northern winter. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015, *136*, 187–200.

- 27. Albers, J.R.; Birner, T. Vortex Preconditioning due to Planetary and Gravity Waves prior to Sudden Stratospheric Warmings. *J. Atmos. Sci.* **2014**, *71*, 4028–4054.
- 28. Ern, M.; Trinh, Q.; Kaufmann, M.; Krisch, I.; Preusse, P.; Ungermann, J.; Zhu, Y.; Gille, J.; Mlynczak, M.; Russell, J., III; et al. Satellite observations of middle atmosphere gravity wave absolute momentum flux and of its vertical gradient during recent stratospheric warmings. *Atmos. Chem. Phys.* **2016**, *16*, 9983–10019.
- 29. A.K.Smith, J.Perlwitz Middle Atmosphere | Planetary Waves https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00229-2
  - 30. Интернет-ресурс: https://www.britannica.com/science/polar-vortex
- 31. Charney, J. G., & Drazin, P. G. (1961). Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. Journal of Geophysical Research, 66(1), 83–109. https://doi.org/10.1029/JZ066i001p00083
- 32. Hu, D., Guan, Z., Tian, W., & Ren, R. (2018). Recent strengthening of the stratospheric Arctic vortex response to warming in the central North Pacific. Nature Communications, 9(1), 1697. https://doi.org/10.1038/s41467-018-04138-3
- 33. Li, Y., Tian, W., Xie, F., Wen, Z., Zhang, J., Hu, D., & Han, Y. (2017). The connection between the second leading mode of the winter North Pacific sea surface temperature anomalies and stratospheric sudden warming events. Climate Dynamics, 51(1-2), 581–595. https://doi.org/10.1007/s00382-017-3942-0
- 34. Hu, D., Tian, W., Xie, F., Shu, J., & Dhomse, S. (2014). Effects of meridional sea surface temperature gradients on stratospheric temperature and circulation. Advances in Atmospheric Sciences, 31(4), 888–900. https://doi.org/10.1007/s00376-013-3152-6
- 35. Holton, J. R., Haynes, P. H., Mcintyre, M. E., Douglass, A. R., Rood, R. B., & Pfister, L. (1995). Stratosphere-troposphere exchange. Reviews of Geophysics, 33(4), 403–439. https://doi.org/10.1029/95RG02097
- 36. Lubis, S. W., Silverman, V., Matthes, K., Harnik, N., Omrani, N. E., & Wahl, S. (2017). How does downward planetary wave coupling affect polar

- stratospheric ozone in the Arctic winter stratosphere? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(3), 2437–2458. https://doi.org/10.5194/acp-17-2437-2017
- 37. Yi Han, Lei Wang, Wenju Fu, Haitao Zhou, Tao Li, Ruizhi Chen, Machine Learning-Based Short-Term GPS TEC Forecasting During High Solar Activity and Magnetic Storm Periods, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 10.1109/JSTARS.2021.3132049, 15, (115-126), (2022).
- 38. Интернет-ресурс: https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radio-emissions
- 39. Tapping K.F. (2013), The 10.7 cm solar radio flux (F10.7), Space Weather, 11, 394-406, doi: 10.1002/swe.20064.
- 40. Peter Thejll, Hans Gleisner (2015). Reanalysis data. (PDF) Reanalysis data (researchgate.net)
- 41. Slivinski, L. C. (2018). Historical Reanalysis: What, how, and why? Journal of Advances in Modeling EarthSystems, 10, 1736–1739. https://doi.org/10.1029/2018MS001434