



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)

2. На тему: «Взаимодействие внетропической стратосферы с тропосферой в Северном
полушарии»

Исполнитель Булатникова Анастасия Андреевна
(фамилия, имя, отчество)

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

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой


(подпись)

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

« 4 » июня 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. ЦИРКУЛЯЦИЯ В СТРАТОСФЕРЕ И ТРОПОСФЕРЕ	5
1.1 Циркуляция в стратосфере	5
1.2. Циркуляция в тропосфере	6
1.3 Стратосферно-тропосферные взаимодействия	8
1.3.1 Стратосферно-тропосферный обмен.....	8
1.3.2 Влияние стратосферы на тропосферную погоду и климат.....	11
1.4 Понятие внетропической стратосферы и ее взаимодействие с тропосферой.....	13
Глава 2. ВНЕЗАПНЫЕ СТРАТОСФЕРНЫЕ ПОТЕПЛЕНИЯ	15
2.1 Механизмы развития ВСП	18
2.2 Алгоритм идентификации и классификации ВСП	19
2.3 Процессы происходящие при ВСП	20
2.4 Реанализ MERRA-2.....	21
Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	23
3.1 Построение норм геопотенциальных высот.	23
3.2 Стандартное отклонение	28
3.3 Корреляционный анализ.....	33
3.4 Коэффициенты корреляции 30 дней от центральной даты ВСП	40
Заключение	Ошибка! Закладка не определена.
Список литературы	Ошибка! Закладка не определена.

Используемые сокращения

СТО – стратосферно-тропосферный обмен

КДК – квазидвухлетнее колебание

ВСП – внезапное стратосферное потепление

CDO – оператор климатических данных

ЦД – центральная дата

Введение

Земная атмосфера представляет собой тонкую плёнку толщиной менее 200 км. Без неё наша планета была бы такой же безжизненной, как другие небесные тела окружающего нас космического пространства.

Атмосферу земли принято делить на несколько слоев в зависимости от их характеристик и свойств. В основном, атмосфера делится на пять слоев: тропосфера, стратосфера, мезосфера, термосфера и экзосфера. Мы рассмотрим взаимодействие между двумя ближайшими и главными слоями стратосферой и тропосферой.

Между тропосферой и стратосферой существуют как радиационные, так и динамические связи. Изменения в радиационном бюджете стратосферы, вызванные большими изменениями концентрации озона или углекислого газа, могут существенно влиять на температуру у поверхности Земли.

Самым ярким примером динамической взаимосвязи тропосферы и стратосферы являются внезапные стратосферные потепления.

Внезапные стратосферные потепления (ВСП) — это периоды резкого повышения температуры в стратосфере, обычно над полюсами, в холодные зимние месяцы. Они часто сопровождаются изменениями приземной погоды и климата.

В настоящий момент имеется значительное количество данных о верхней и средней атмосфере. Существует четкое представление о внутригодовых изменениях в атмосфере, вызванных сезонными колебаниями. Тем не менее, причина подобных изменений до настоящего времени остается неясной.

Цель данной работы - рассмотреть механизмы и особенности взаимодействия внетропической стратосферы с тропосферой в Северном полушарии, выявить ключевые факторы, влияющие на это взаимодействие, а также оценить его влияние на климатические и погодные процессы в рассматриваемом регионе.

Для выполнения цели были выполнены следующие задачи:

1. Изучить динамику стратосферы и её влияние на тропосферу;
2. Получить данные о полях геопотенциала и его изменчивости на высотах от 1000 гПа до 7 гПа;
3. Оценить особенности взаимосвязи стратосферы и тропосферы во время событий ВСП.

Для выполнения вышеперечисленных задач были взяты три случая внезапных стратосферных потеплений и составлены обзоры по ним с помощью реанализа MERRA-2 и программы GrADS.

Исследования в области внезапных стратосферных потеплений помогают лучше понять сложные взаимосвязи между стратосферной и тропосферной циркуляцией, что имеет значение для улучшения наших прогностических возможностей в области погоды и климата.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трёх глав и заключения. Список использованных источников содержит 17 наименований.

Во введении аргументируется актуальность данной работы, четко поставлена цель и установлены задачи данного исследования.

В первой главе содержатся общепринятые представления о циркуляции стратосферы и тропосферы, и их взаимодействиях.

Вторая глава содержит информацию о понятие ВСП и влияние их климат.

Третья глава включает в себя анализ результатов исследования.

Глава 1. ЦИРКУЛЯЦИЯ В СТРАТОСФЕРЕ И ТРОПОСФЕРЕ

1.1 Циркуляция в стратосфере

Стратосфера — это слой атмосферы Земли, расположенный выше тропосферы и ниже мезосферы, протяженный примерно от 6 до 50 километров над поверхностью планеты. В стратосфере происходят некоторые важные метеорологические и физические процессы.

Циркуляция в стратосфере представляет собой движение воздуха в верхних слоях атмосферы, над тропосферой (нижним слоем атмосферы). Она играет важную роль в распределении тепла и химических веществ в атмосфере и влияет на климатические процессы.

Циркуляция характеризуется наличием двух основных циркуляционных ячеек: полная охватывающая циркуляция и арктическая циркуляция.

- Полная охватывающая циркуляция. В этой циркуляции воздух перемещается в северном полушарии от экватора к полюсу и обратно. Теплый воздух с поверхности Земли поднимается в экваториальных областях и движется в сторону полюсов. В стратосфере это движение воздуха охватывает всю земную окружность и возвращается к земной поверхности в субполярных областях. Эта циркуляция помогает распределить тепло от экватора к полюсу.

- Арктическая циркуляция. Вокруг полярных регионов формируется полярный вихрь — большой вихрь холодного воздуха, который ограничен полярным фронтальным поясом. Эта циркуляция происходит в стратосфере над Арктикой. Воздух движется в северном полушарии по часовой стрелке вокруг полярного вихря.

Обе циркуляции в стратосфере являются важными для понимания климатических процессов и долгосрочных изменений в атмосфере. Они

взаимодействуют с поверхностными явлениями и могут оказывать влияние на погоду и климат в различных регионах мира.

Также в стратосфере происходит явление под названием стратосферный поток — это узкий поток быстрых ветров, образующийся в верхних слоях стратосферы. Стратосферный поток может оказывать влияние на циркуляцию воздуха как в стратосфере, так и в тропосфере. [12]

Зимой в стратосфере воздушные потоки движутся под влиянием геострофического закона. Изобарические поверхности изгибаются вогнутым образом от экватора к полюсам. Суть проявляется в наклоне изобарических линий, ведущих воздушные массы от теплых широт к холодным просторам полюса.

Под влиянием геострофического закона зимняя стратосфера рождает температурные и барические градиенты, направленные по горизонтали от экватора к полюсу. Воздушные потоки, подчиняясь силе Кориолиса, начинают свое передвижение к полюсу.

Сила Кориолиса, уклоняет движение воздуха вправо пока не достигнет соразмерности с силой барического градиента. Далее рождается перенос воздушных масс. Так возникает геострофический западно-восточный перенос в зимней стратосфере. Однако природы бывают моменты волнения, когда циркуляция испытывает резкие перемены. В этот период циркумполярный циклон раскалывается на два полюса.

Летом же устанавливается восточно-западный перенос. Температурные и барические градиенты меняют свои знаки, (относительное тепло и высокое давление на полюсе, относительный холод и низкое давление у экватора). [1]

1.2. Циркуляция в тропосфере

Тропосфера - нижний слой атмосферы Земли, который простирается от поверхности земли до высоты около 12 км на экваторе и до около 8 км на полюсах. В этом слое происходит практически вся атмосферная циркуляция,

здесь температура снижается при подъеме воздуха, и погода образует облака и выпадает осадки. [14] Тропосфера играет ключевую роль в формировании климата и погоды на Земле.

Циркуляция в тропосфере — это процесс перемещения воздуха в нижнем слое атмосферы, который включает в себя вертикальное и горизонтальное движение. Основные компоненты циркуляции в тропосфере включают пассаты, западные ветры, циклоны и антициклоны.

1. Пассаты: это постоянные восточные ветры, дующие от субтропиков к экватору и обратно. Пассаты обусловлены неравномерным нагреванием поверхности Земли и вращением планеты.

2. Западные ветры: это ветры, дующие от запада к востоку в средних широтах. Они образуются из-за различий в нагревании суши и океанов.

3. Циклоны и антициклоны: Циклоны — это области низкого давления, где воздух поднимается, а антициклоны — это области высокого давления, где воздух опускается. Циклоны и антициклоны играют ключевую роль в формировании погоды.

В тропосфере циркуляция воздуха играет ключевую роль в формировании погодных явлений. Она определяется в основном тепловыми процессами, такими как солнечное излучение, которое нагревает поверхность земли. В результате этого воздух нагревается, поднимается, охлаждается на высоте и затем опускается обратно к поверхности. [1]

В тропосфере можно выделить два типа струйных потоков, являющихся областями наибольшего западно-восточного переноса: субтропический и полярно-фронтальный.

По классификации Вангенгейма-Гирса можно выделить три основные формы циркуляции в рамках западно-восточного переноса:

- зональная (W), которая отвечает за перемещение воздуха с Атлантики на континент как зимой, так и летом, и представлена длинными волнами небольшой амплитуды;

- восточная (Е), которая характеризуется выраженным гребнем над Европой;
- меридиональная (С)- которая выражена глубокой ложбиной давления над Европой, что дает значительное количество осадков в этой зоне.

Циркуляция в тропосфере также зависит от таких явлений, как сезонные изменения, географические особенности и распределение поверхностных температур. Например, при экваториальном климате циркуляция будет отличаться от циркуляции в умеренных широтах из-за различий в солнечной радиации. Этот процесс также важен для переноса тепла и влаги по всему миру, влияя на формирование облачности, осадков и погодных условий в различных регионах.

1.3 Стратосферно-тропосферные взаимодействия

1.3.1 Стратосферно-тропосферный обмен

Стратосферно-тропосферный обмен (СТО) представляет собой процесс передвижения воздуха между стратосферой и тропосферой, который играет ключевую роль в переносе загрязнений и химических веществ, таких как озон и парниковые газы, между этими двумя слоями атмосферы. Этот обмен также оказывает влияние на климатические процессы, поскольку перемещение воздуха между стратосферой и тропосферой способно изменять распределение тепла и химических веществ в атмосфере.

Стратосфера и тропосфера обладают различными характеристиками. В стратосфере присутствует значительное количество озона и возможное вихревое движение. Около 90% озона находится именно в стратосфере, в то время как лишь 10% в тропосфере. Однако из-за высокой устойчивости стратосферы происходит относительно небольшой обмен массой через ее нижнюю границу, тропопаузу. [8]

Стратосфера и тропосфера являются двумя прилегающими регионами атмосферы, обладающими различными характеристиками (рис.1.1). При этом стратосфера и тропосфера связаны между собой через распространение солнечной и длинноволновой радиации, химическими процессами и распространением волн (динамику).

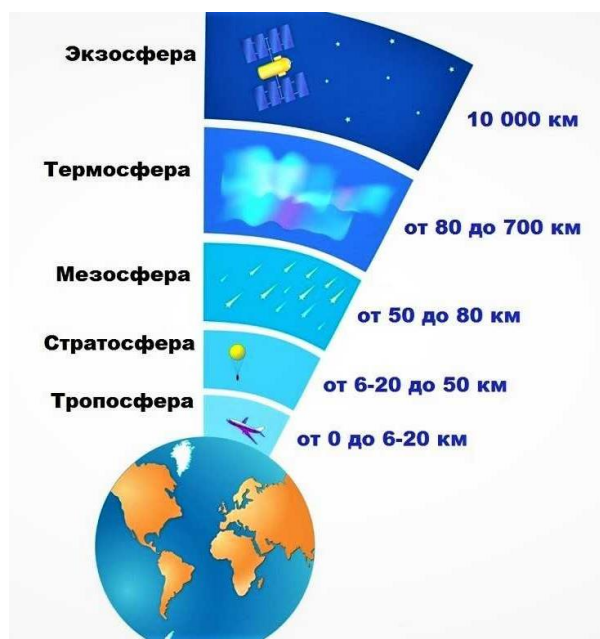


Рисунок 1.1 – Слои атмосферы

Стратосфера — это слой атмосферы, расположенный непосредственно над тропосферой. Он начинается примерно на высоте 6–20 километров и простирается до около 50 километров над уровнем моря. Одна из особенностей стратосферы - наличие озонового слоя, который играет важную роль в защите от ультрафиолетового излучения. Приблизительно 90 % озона находится в стратосфере и только 10 % — в тропосфере. Однако из-за ее высокой стабильности происходит относительно небольшой обмен массой через ее нижнюю границу, тропопаузу. [14]

Тропосфера — это нижний слой атмосферы, который почти соприкасается с поверхностью Земли и простирается до 15-20 километров вверх. В этом слое происходят большинство метеорологических явлений, таких как облака, осадки, ветры и изменения температуры.

Солнечная радиация, проходя через всю атмосферу от верхней границы, приводит к прогреву подстилающей поверхности (суши и океана) и воздуха. Наибольшее тепло накапливается в тропиках, в средних и высоких широтах - меньше. Это означает, что наиболее интенсивная конвекция, связанная с прогревом подстилающей поверхности, происходит именно в тропиках, где воздух поднимается на большую высоту по сравнению с другими регионами Земли. Хотя динамика тропосферы и стратосферы связаны между собой, но это две отдельные зоны, разделённые тропопаузой. [12]

Тропопауза — это граница между тропосферой и стратосферой в атмосфере Земли. Это слой, где происходит изменение температуры с высотой. В тропосфере температура обычно убывает с увеличением высоты, в то время как в стратосфере температура начинает возрастать с увеличением высоты. [14]

Тропопауза является важной атмосферной границей, поскольку она влияет на перемещение воздуха и погодные явления. Например, многие погодные явления, такие как облака, осадки, турбулентность, обычно происходят в тропосфере ниже тропопаузы.

При вертикальном воздухообмене в тропосфере время его проведения составляет от нескольких часов до нескольких суток, а при перемешивании в стратосфере - от нескольких месяцев до нескольких лет. Для того чтобы осуществить вертикальный перенос воздуха и химических соединений через толщу тропосферы, необходимо несколько часов и несколько дней, что происходит за счет влажной конвекции и бароклинных вихревых движений в средних широтах.

В то время как вертикальный перенос через аналогичные диапазоны высот в стратосфере занимает от нескольких месяцев до года, а в нижней стратосфере-еще дольше, этот вертикальный перенос должен сопровождаться радиационным нагревом или радиационным охлаждением.

Ожидается, что изменение климата приведет к усилению планетарной волновой активности. Это ускорение, прогнозируемое вместе с восстановлением стратосферного озона, приведет к ускорению переноса озона из стратосферы в тропосферу.

1.3.2 Влияние стратосферы на тропосферную погоду и климат

Стратосфера играет ключевую роль в формировании погоды на Земле. Несмотря на то, что стратосфера находится выше тропосферы, где происходят основные процессы, изменения в стратосфере могут значительно повлиять на погоду на поверхности.

Изменения на уровне тропосферы, влияющие на погоду и климат, оказывают воздействие на богатый озоном слой стратосферы, благодаря влиянию на радиационные процессы, динамику, перенос и химический состав. В ответ на это стратосфера влияет на климат через радиационные процессы, которые соответствуют изменениям температурных градиентов. Таким образом, тропосферная погода и климатическая система тесно связаны с термической структурой, динамикой и формированием озонового слоя стратосферы. Однако понимание этих взаимосвязей усложняется наличием множества нелинейных взаимодействий. [7]

Процессы в стратосфере оказывают влияние на тропосферную циркуляцию на разнообразных временных масштабах. Тропосферная циркуляция может быть связана со стратосферой на протяжении долгих временных интервалов. Например, было выявлено, что стратосферные воздействия, вызванные истощением озонового слоя, вулканическими аэрозолями или квазидвухлетними колебаниями (КДК), оставляют свой отпечаток на приземном климате. Эта связь также может быть ключевой для более точного моделирования антропогенных изменений климата, связанных с изменением концентрации парниковых газов. Элементы, входящие в СТВ, представлены на рисунке 1.2.

Стратосфера воздействует на тропосферу, в основном, благодаря вертикальному распространению атмосферной волны. Стратосфера регулирует относительно нелинейное воздействие атмосферной волны, распространяющейся снизу, и эти воздействия превращаются в регулярные колебания стратосферных циркуляций. Есть обратное действие при возвращении волн в тропосферу и формировании долговечных эффектов на тропическую погоду, климат. Ключ к пониманию влияния стратосферы на погоду и климат, заключается в том, что обычно стратосфера меняется весьма медленно, а эти условия в низшей стратосфере влияют на поверхностную погоду и климат.

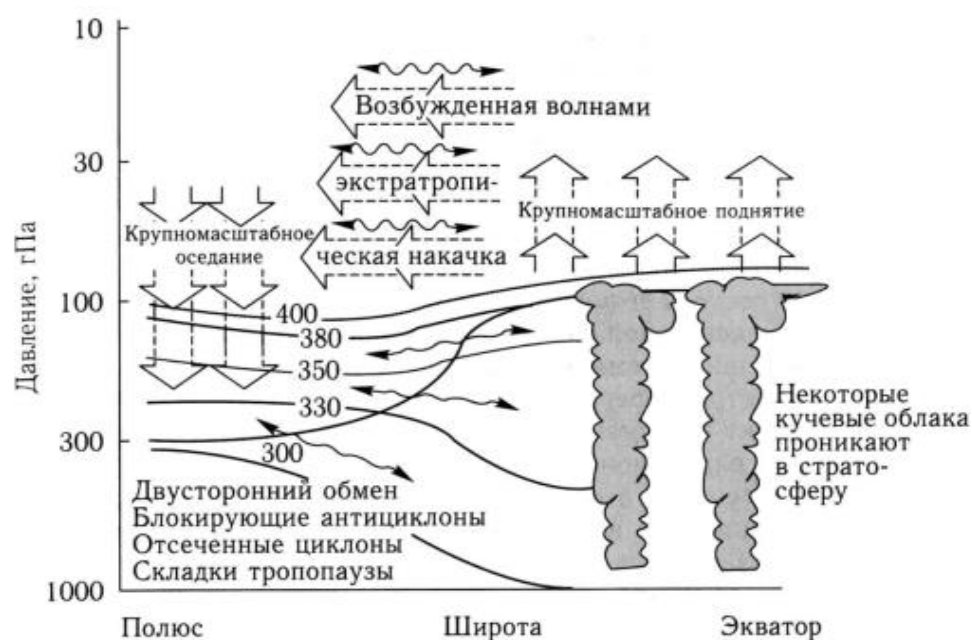


Рисунок 1.2 – Базовый механизм динамического взаимодействия и обмена между стратосферой и тропосферой

Таким образом, понимание стратосферных процессов является важным элементом прогнозирования погоды на долгосрочную перспективу. Изучение этих процессов помогает улучшить качество прогнозов и принимать более обоснованные решения в области климатологии и метеорологии. [2]

1.4 Понятие внетропической стратосферы и ее взаимодействие с тропосферой

Внетропическая стратосфера — это слой атмосферы Земли, расположенный выше тропосферы, простирающийся примерно от высоты 10–12 км до высоты около 50 км над уровнем моря. Этот слой характеризуется рядом своеобразных особенностей:

1. Отсутствие вертикальной циркуляции: в отличие от тропосферы, где происходит интенсивная вертикальная циркуляция воздуха, в стратосфере доминирует горизонтальное перемешивание и циркуляция.

2. Озоновый слой: Внетропическая стратосфера содержит озоновый слой, который играет важную роль в защите от ультрафиолетового излучения Солнца. Озоновый слой поглощает вредные ультрафиолетовые лучи, предотвращая их попадание на поверхность Земли.

3. Стратосферный вихрь: В этом слое наблюдается явление, известное как стратосферный вихрь. Это круговое движение воздуха на высоких широтах, которое может оказывать влияние на погоду в нижних слоях атмосферы.

4. Высокая стабильность: Стратосфера характеризуется высокой стабильностью и отсутствием облаков. Это позволяет самолетам летать на больших высотах, где сопротивление воздуха меньше, что способствует экономии топлива.

Внетропическая стратосфера является важным слоем атмосферы, влияющим на климат и погоду на Земле. Изучение процессов, происходящих в этом слое, имеет важное значение для понимания изменений в атмосфере и их воздействия на окружающую среду.

Взаимодействие внетропической стратосферы с тропосферой в Северном полушарии имеет важное значение для погодных процессов и климата региона. В тех местах, где воздушные массы движутся из тропосферы в стратосферу, происходит перенос влаги, тепла и других

компонентов атмосферы между этими двумя слоями. Этот процесс влияет на химические реакции и динамику атмосферы, а также на формирование осадков, облаков и общее климатическое равновесие.

В Северном полушарии, особенно ближе к полюсам, внетропическая стратосфера и тропосфера могут взаимодействовать через так называемый полярный вихрь. Полярный вихрь — это область в верхнем слое атмосферы, включая внетропическую стратосферу, над полярными регионами. Он играет важную роль в формировании погодных условий в этих районах и во взаимодействии между тропосферой и стратосферой.

Другим важным аспектом взаимодействия внетропической стратосферы и тропосферы в Северном полушарии является перенос озона и других газов между этими слоями, которые могут оказывать влияние на температуру и циркуляцию воздуха в тропосфере. Этот процесс связан с динамикой вертикального движения атмосферы и имеет важное значение для озонового слоя и защиты от ультрафиолетового излучения.

Глава 2. ВНЕЗАПНЫЕ СТРАТОСФЕРНЫЕ ПОТЕПЛЕНИЯ

Внезапное стратосферное потепление (ВСП) было впервые обнаружено Рихардом Шерхагом с помощью радиозондовых измерений в Берлине, Германия, в январе-феврале 1952 года, когда он обнаружил резкое повышение температуры в стратосфере. Примерно через десять лет Комиссия Всемирной метеорологической организации (ВМО) по атмосферным наукам разработала международную программу мониторинга ВСП под названием STRATALERT, основанную на имеющихся наблюдениях с помощью радиозондов и ракетных зондов. Комиссия атмосферных наук предложила, чтобы при обнаружении внезапного и необычного повышения температуры на высоте 30 км или выше подавалось предупреждение ВСП. [11]

По прошествии времени и после того, как стали наблюдаться новые события, было признано, что многие ВСП происходили вместе с разворотами ветра и/или смещением или расщеплением полярных вихрей. Начиная с 1970-х годов, многие исследования сочетали повышение температуры и изменение направления ветра для обнаружения ВСП, хотя детальная реализация и используемые пороговые значения различаются. Часто используемое определение на этом этапе было предложено Макинтурффом в 1978 году. Он определил, что событие ВСП происходит, если температура повышается более чем на 25 К, и событие определяется как крупное, если более сильное повышение температуры наблюдается совместно с изменением направления ветра. Поскольку реверсирование ветра является одной из наиболее важных особенностей ВСП, многие исследования предлагают использовать его для обнаружения основных событий ВСП. Одним из наиболее часто используемых определений является определение: большой ВСП возникает, когда зональные средние зональные ветры на 60° с.ш. на уровне 10 гПа становятся восточными в зимнее время. Разворот ветра

является простым и надежным определением и полезен при изучении многих влияний, вызванных ВСП. В дополнение к определениям изменения направления ветра существуют также исследования, в которых для обнаружения событий ВСП использовался вихревой момент, который является еще одной важной характеристикой потепления. Кроме того, для обнаружения событий ВСП использовались аномалии геопотенциальной высоты стратосферы полярной шапки (Арктика и Антарктика) или зональные среднестатистические аномалии высоты при 10 гПа. [13]

Внезапные стратосферные потепления (ВСП) – это важное и динамичное явление, которое происходит в высоких широтах Земного полушария, особенно во время зимнего периода, продолжающиеся в течение нескольких суток или недель. Этот процесс приводят к изменению направления зонального ветра и повышению температуры в средней стратосфере с широтой к северу от 60° с.ш., то есть к формированию аномального меридионального градиента температуры.

В метеорологическом словаре дано следующее определение данному явлению: ВСП – это сильное и внезапное повышение температуры «взрывного характера» в полярной и субполярной стратосфере зимой, иногда на 50° и более в течение нескольких (порядка десяти) суток. При этом меняется знак меридионального градиента температуры над полушарием, формируется стратосферный антициклон, и общий перенос воздуха меняется с западного на восточный. ВСП возникает в верхней стратосфере, в слоях, располагающихся над уровнем около 24 км, и затем распространяется также и на нижнюю стратосферу. Возвращение к нормальному зимнему режиму протекает медленнее, чем развитие потепления. [10]

ВСП имеют огромное влияние на атмосферные циркуляции и климатические процессы. Они вызывают значительные колебания в вертикальных градиентах температуры и давления, что приводит к изменениям в распределении воздушных масс и давлений в атмосфере. В

результате этого происходят необычные климатические явления на Земле, такие как нестандартные погодные условия или смещение погодных систем.

По классификации стратосферные потепления подразделяют на незначительные, или слабые – минорные (наблюдаются каждую зиму) и значительные, или сильные – мажорные. Сильные потепления наблюдаются реже, как правило, захватывают стратосферу и мезосферу и носят глобальный характер. При этом меняется знак меридионального градиента температуры над полушарием, а также происходит смена направления зональной стратосферной циркуляции на высоте 10 гПа с западного на восточный – происходит разрушение и/или смещение зимнего циркумполярного вихря, и формируется стратосферный полярный антициклон. Возвращение стратосферы к нормальному режиму происходит медленнее, чем развитие потепления.

Каждые три года в северном полушарии происходят, в среднем, два крупных события стратосферных потеплений. Эти явления могут привести к резкому ослаблению циркумполярного стратосферного вихря, его перемещению от полярной зоны и даже к его расщеплению. Изменения, вызванные ВСП, оказывают значительное влияние на структуру стратосферы и следует анализировать их в рамках глобальных процессов атмосферной циркуляции.

Внезапные стратосферные потепления также оказывают влияние на циркуляцию воздуха в тропосфере, включая изменения в потоке воздушных масс и механизмах замедления или ускорения атмосферных процессов. Эти изменения могут связываться с погодными явлениями, такими как сильные метеорологические события, изменения ветровых режимов и моделирование осадков.

Развитие процесса ВСП происходит вследствие интенсификации и проникновения из тропосферы планетарных волн и их нелинейного взаимодействия с западным стратосферным потоком, результатом которого является диссипация волн, а также замедление и разрушение полярного

вихря. В связи с этим, в стратосфере высвобождается большое количество кинетической энергии. Формирование стратосферного антициклона вызывает изменение направления вертикального переноса в стратосфере сверху вниз, а опускание воздушных масс приводит к адиабатическому нагреву воздуха. [3]

Наблюдения показывают, что потепления начинаются на больших высотах, а затем спускаются в нижнюю стратосферу и тропосферу.

2.1 Механизмы развития ВСП

Выделяют две модели развития ВСП, «снизу-вверх» и «сверху-вниз». Более подробно механизм «снизу-вверх» развития ВСП был представлен в работе Мацуно Т. в 1971 году [4].

Модель «снизу-вверх» акцентируется на роли воздействия тропосферных волн для развития ВСП. В работе Мацуно было представлено два критерия для развития ВСП:

1) ВСП происходят только при достаточно сильном планетарном волновом воздействии из тропосферы.

2) Для развития ВСП требуется импульс аномально сильного волнового воздействия из тропосферы.

В поддержку первого критерия можно привести тот факт, что ВСП происходят намного чаще в Северном полушарии, чем в южном.

Во втором критерии модели Мацуно отмечается, что возникновение стратосферного потепления происходит из-за очень сильного импульса волновой активности из нижних слоев атмосферы. Если амплитуда планетарной волны, проникающей в стратосферу, достаточно велика, это может привести к полному прекращению западного переноса и изменению направления на восточное. Это подтверждается тем, что перед стратосферным потеплением часто происходят блокирующие события, которые увеличивают активность волн в нижних слоях атмосферы.

Модель "сверху-вниз" утверждает, что воздействие волн из нижних слоев атмосферы не играет значительной роли в формировании стратосферного потепления. Стратосфера способна сама порождать стратосферные потепления, при условии, что фоновые волновые потоки, входящие в стратосферу, достаточно сильны. Это подтверждается результатами экспериментов с численными моделями, которые показывают, что стратосфера способна регулировать активность волн, поднимающихся к тропопаузе, и что стратосферные возмущения могут вызывать стратосферные потепления, даже если активность волн в нижних слоях атмосферы остается неизменной.

Предварительное возбуждение волн полярного вихря, приводящее его к критическому состоянию, играет ключевую роль в этом механизме, предполагая, что стратосферные потепления могут быть потенциально предсказаны заранее.

2.2 Алгоритм идентификации и классификации ВСП

Алгоритм состоит из двух частей: во-первых, идентифицируются ВСП, а во-вторых, они классифицируются как события смещения или расщепления вихря. Эти два шага описаны отдельно в следующих подразделах.

При выявлении внезапных стратосферных потеплений авторы решили следовать определению ВМО, чтобы обнаружить появление ВСП: значительное потепление в середине зимы происходит, когда зональные средние зональные ветры на 60° северной широты и 10 гПа становятся восточными зимой, определяемыми здесь как ноябрь – март.

Определение авторов отличается от определения, используемого в других исследованиях, тем, что они не пытаются исключить канадское потепление из определения и также включают мартовские ВСП, которые некоторые авторы не стали бы включать.

Первый день, когда среднесуточный средний зональный ветер на 60° с.ш. и 10 гПа направлен в восточном направлении, определяется как центральная дата потепления. Обратите внимание, что это определение отличается от определения, которое идентифицируется, как потепление по снижению силы стратосферного зонального индекса, основанного на первой эмпирической ортогональной функции геопотенциальной высоты 50 гПа. Авторы отмечают, что по определению ВМО, помимо изменения направления ветра на 60° с. ш. и 10 гПа, требуется, чтобы зональный градиент средней температуры на 10 гПа между 60° и 90° с. событие, которое будет определено как крупное потепление в середине зимы.

Таким образом, чтобы избежать ненужной сложности, авторы не включили критерий температурного градиента в алгоритм. После выявления потепления ни один день в пределах 20 дней от центральной даты не может быть определен как ВСП.

Длина интервала выбрана приблизительно равной двум шкалам радиационного времени при 10 гПа. Это условие препятствует тому, чтобы алгоритм подсчитывал одно и то же ВСП дважды, так как средние зональные ветры могут колебаться между западными и восточными значениями после начала потепления. Наконец, важно подчеркнуть, что в этом исследовании рассматриваются только потепления в середине зимы. Чтобы обеспечить это, случаи, когда средние зональные ветры становятся восточными, но не возвращаются к западным в течение по крайней мере 10 дней подряд до 30 апреля, считаются окончательными потеплениями и как таковые отбрасываются. Этот критерий обеспечивает восстановление после ВСП стратосферного вихря. [15]

2.3 Процессы происходящие при ВСП

Основные процессы, происходящие при внезапных стратосферных потеплениях, включают следующее:

- Разгруппировка полярного вихря: Внезапные стратосферные потепления приводят к разгруппировке и ослаблению полярного вихря - кольцевого течения в стратосфере, которое обычно окружает полярную стратосферу. Это приводит к изменениям в атмосферной циркуляции и может вызывать сдвиги в погодных условиях, включая изменения в температуре, снегопадах, дожде и ветре.
- Резкое изменение динамики атмосферы: В результате ВСП происходит резкое изменение температурного и давленийного поля в стратосфере, что влияет на вертикальное перемешивание и перенос озона и других веществ между стратосферой и тропосферой.
- Влияние на тропосферу: Воздействие внезапных стратосферных потеплений на тропосферу может быть разнообразным и зависит от конкретных условий и характеристик потепления. Однако обычно такие события связываются с длительными изменениями в погодных условиях, такими как усиление или ослабление воздушных потоков, изменение температуры и атмосферного давления.

2.4 Реанализ MERRA-2

MERRA-2 – это глобальный атмосферный реанализ, созданный НАСА (GMAO) для анализа поверхности суши с 1980 года по настоящее время. С разрешением $0,5^{\circ}$ x $0,625^{\circ}$ и временным интервалом 1 час, MERRA-2 использует сетку кубической сферы, обеспечивая равномерное распределение данных на всех широтах. Этот продукт заменил оригинальный MERRA, отражая новейшие достижения в атмосферном моделировании и ассимиляции информации.

MERRA-2 представляет собой промежуточный реанализ, внедряющий последние разработки GMAO для преодоления ограничений предыдущей версии и приближения к долгосрочной цели развития комплексного анализа

систем Земли (IESA), объединяющего данные по атмосфере, океану, суше и химии.

MERRA-2 была создана с двумя главными целями: обеспечить непрерывный анализ климата в эпоху спутников практически в реальном времени, который устраняет известные ограничения завершеного в настоящее время реанализа MERRA (январь 1979 - февраль 2016) и продемонстрировать прогресс в развитии потенциала IESA в будущем. MERRA-2 достигла этих целей в нескольких аспектах. Среди них - включение в анализ спутниковых наблюдений, которые не были доступны в MERRA и улучшение точности водного цикла, а также снижение аномалий и резких изменений в осадках, связанных с изменениями в системе наблюдений. Двигаясь в направлении будущего IESA, MERRA-2 включает в себя анализ данных об аэрозолях и улучшенное представление криосферы и стратосферы, включая озон, по сравнению с MERRA. [5]

Среди основных недостатков MERRA-2 по сравнению с MERRA можно выделить увеличенное тепловое смещение в верхних слоях тропосферы, которое было обнаружено при анализе фонового прогноза, соответствующего радиозондовым наблюдениям по температуре и среднему анализу изменений температуры. Также стоит отметить избыточное количество осадков над высоким рельефом в тропиках и, в меньшей степени, над северными широтами. Дальнейшие исследования показывают, что на это явление влияют в первую очередь параметризации глубокой конвекции и гравитационного волнового сопротивления в модели GEOS, а также представление рельефа.

Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время известно, что последствия событий ВСП распространяются далеко над стратосферой и могут существенно изменить химический состав и динамику мезосферы, термосферы и ионосферы. Таким образом, они являются важным компонентом краткосрочной изменчивости верхних слоев атмосферы. Однако известно, что изменения в стратосферном полярном вихре, в том числе вызванные ВСП, влияют на тропосферу, где они могут повлиять на погодные условия в средних и высоких широтах северного полушария.

В исследовании использовались ежедневные данные о геопотенциальной высоте из реанализа – MERRA-2 – с декабря по март начиная с 1980 по 2022 г.

Рассматривались такие метеорологические характеристики, как: геопотенциальная высота, стандартное отклонение и коэффициент корреляции.

3.1 Построение норм геопотенциальных высот.

Далее были построены и проанализированы нормы значений геопотенциальной высоты для зимних месяцев – декабрь, январь, февраль и марта за период с 1980 по 2022 гг. с помощью операторы климатических данных (CDO). Для представления результатов использовался пакет GrADS, были построены поля для интересующих параметров.

Ниже представлены портреты норм полей геопотенциальной высоты на различных уровнях с 500 гПа до 7 гПа (рис.3.1, 3.2).

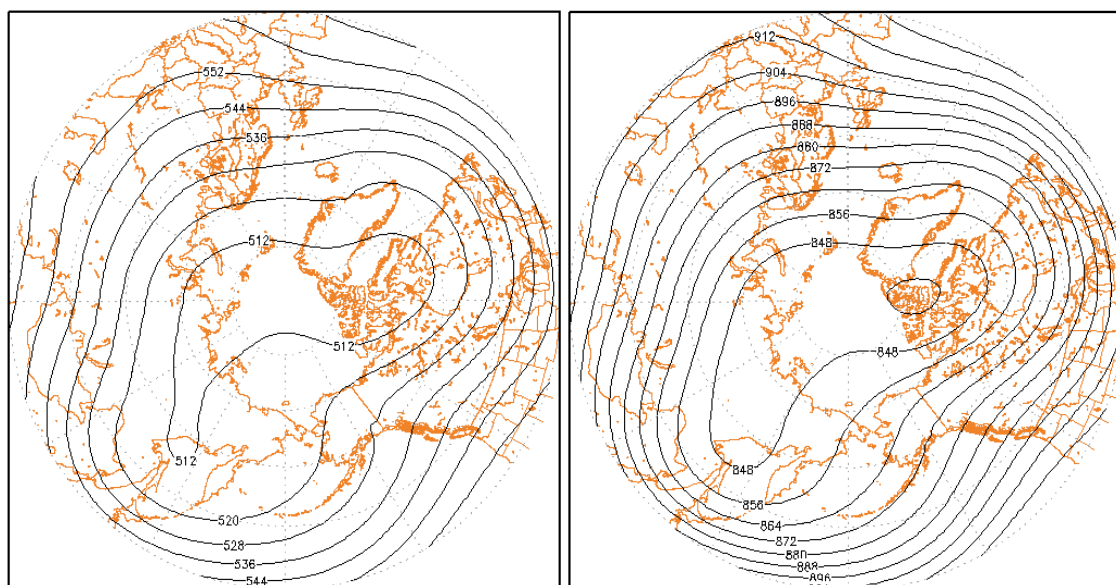


Рисунок 3.1 – Нормы геопотенциальных высот для декабря, слои атмосферы 500 (слева) и 300 (справа) гПа

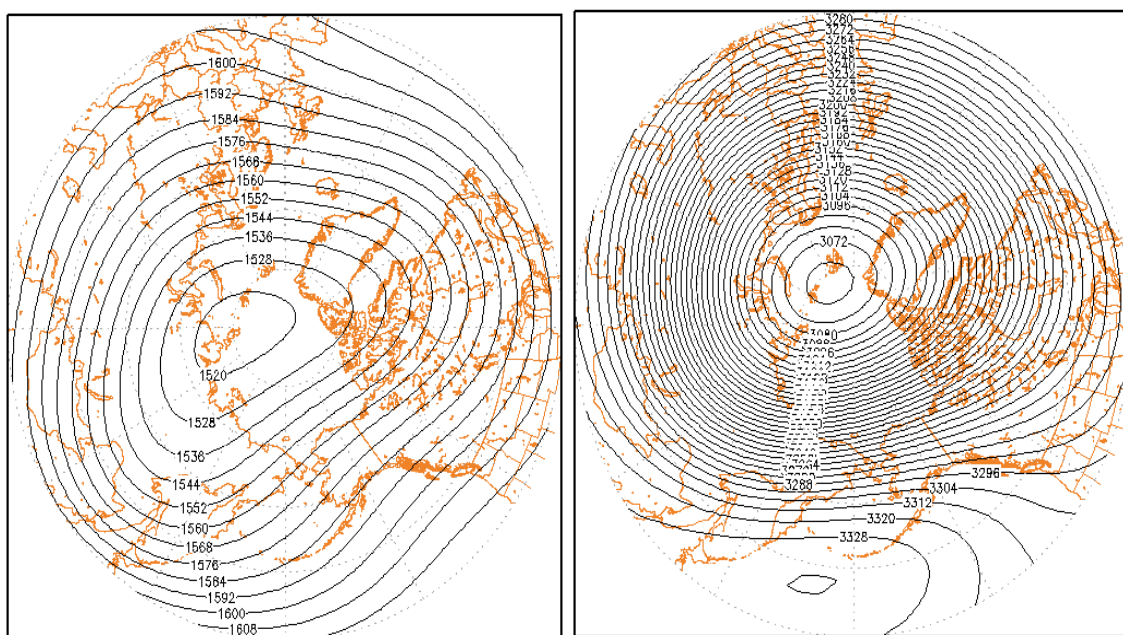


Рисунок 3.2 – Нормы геопотенциальных высот для декабря, слои атмосферы 100 (слева) и 7 (справа) гПа

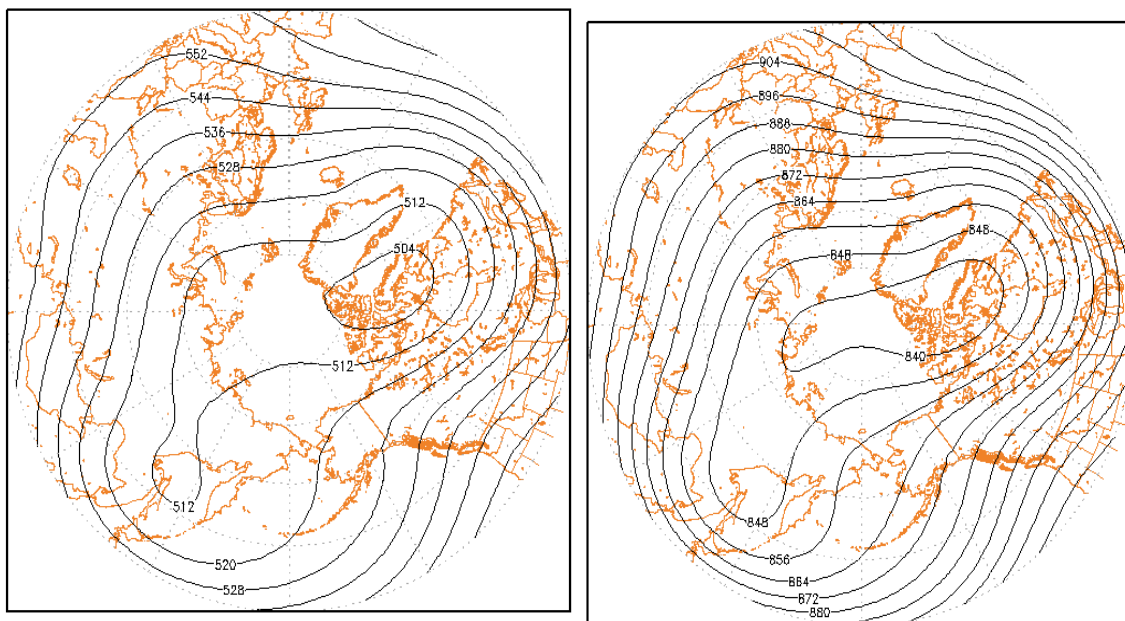


Рисунок 3.3 – Нормы геопотенциальных высот для января, слои атмосферы 500 (слева) и 300 (справа) гПа

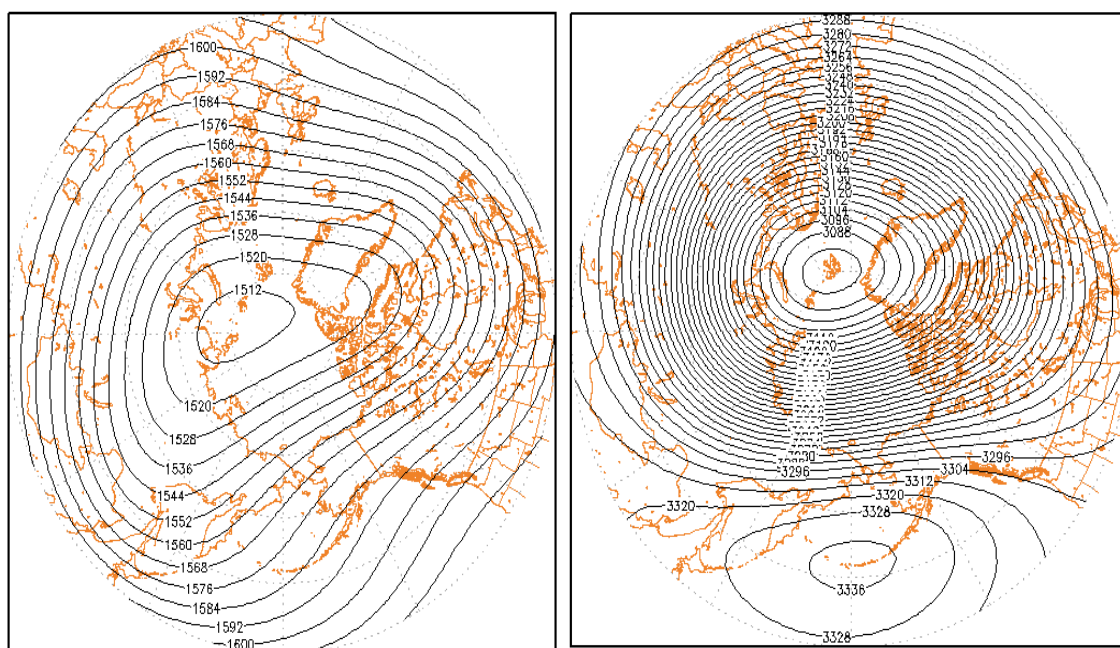


Рисунок 3.4 – Нормы геопотенциальных высот для января, слои атмосферы 100 (слева) и 7 (справа) гПа

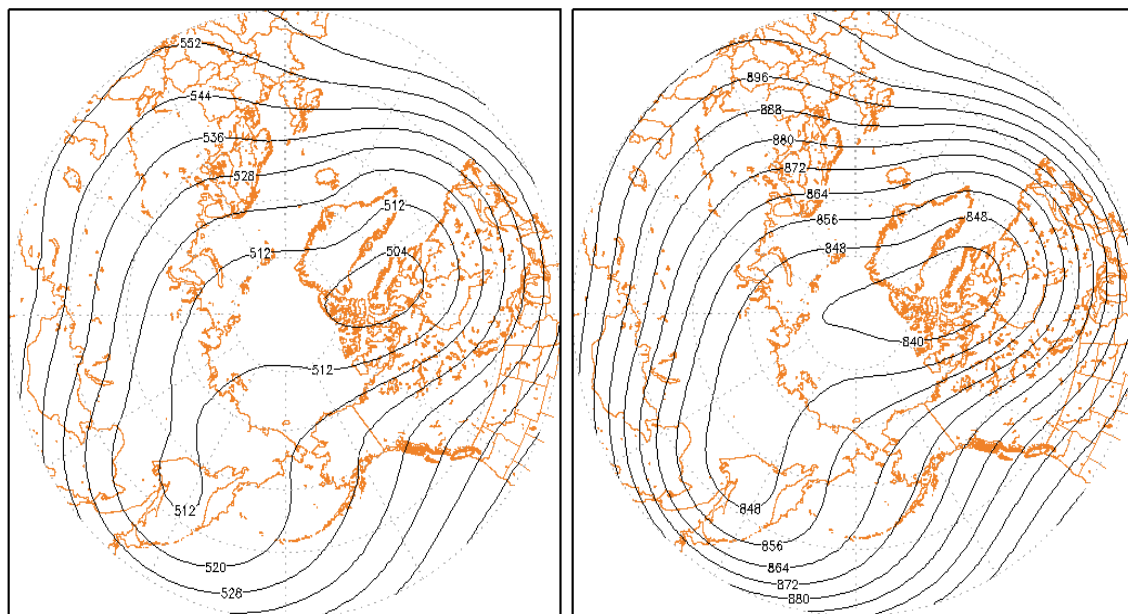


Рисунок 3.5 – Нормы геопотенциальных высот для февраля, слои атмосферы 500 (слева) и 300 (справа) гПа

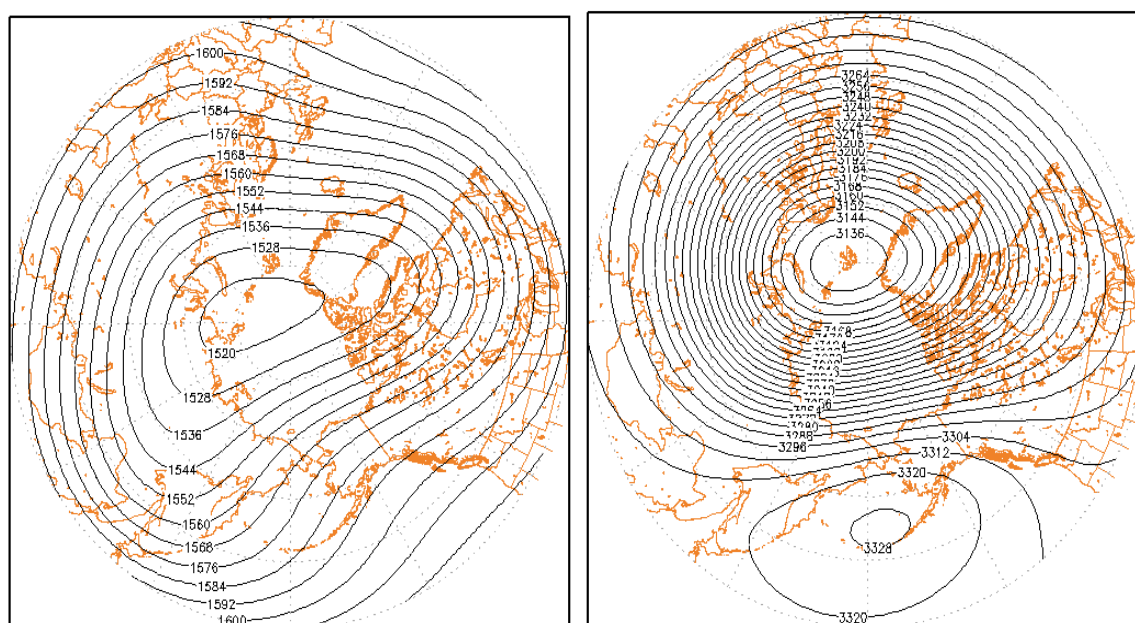


Рисунок 3.6 – Нормы геопотенциальных высот для февраля, слои атмосферы 100 (слева) и 7 (справа) гПа

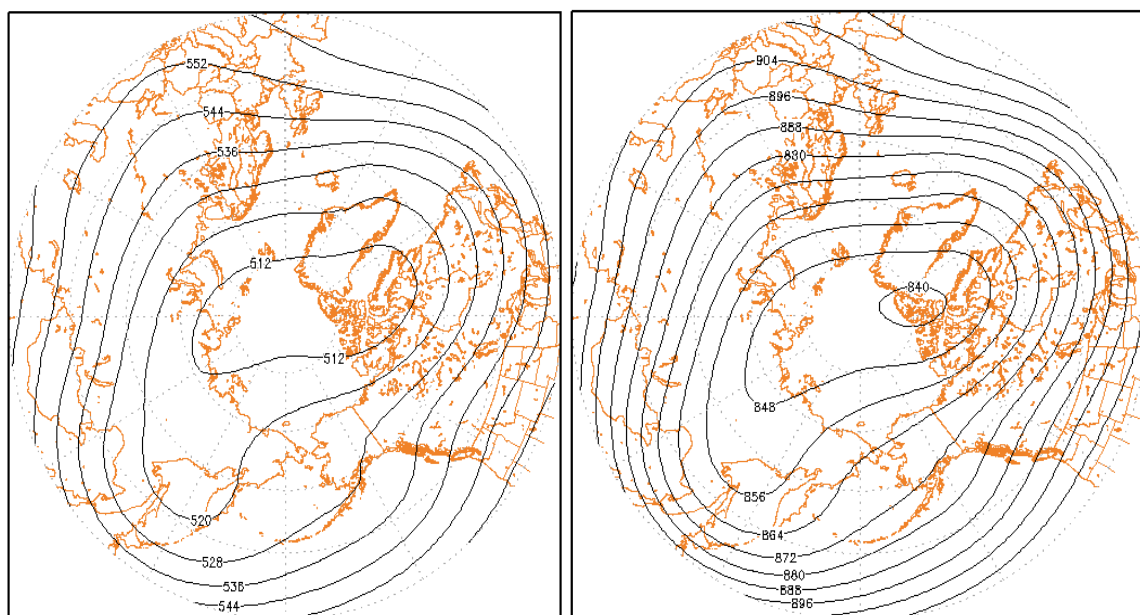


Рисунок 3.7 – Нормы геопотенциальных высот для марта, слои атмосферы 500 (слева) и 300 (справа) гПа

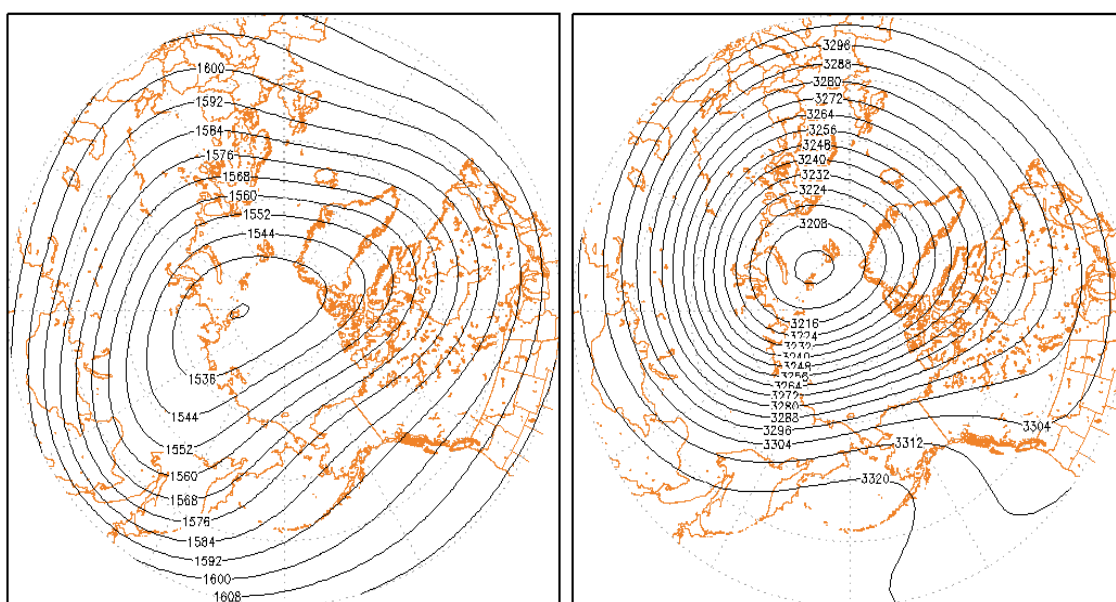


Рисунок 3.8 – Нормы геопотенциальных высот для марта, слои атмосферы 100 (слева) и 7 (справа) гПа

Геопотенциальная высота — это параметр, используемый в метеорологии для описания вертикального распределения массы атмосферы. График геопотенциальной высоты обычно строится в зависимости от высоты над уровнем моря и широты.

На рисунках геопотенциальных высот обычно можно увидеть линии равного значения этого параметра, чем ближе линии друг к другу, тем круче вертикальный градиент геопотенциальной высоты, что указывает на сильные вертикальные движения в атмосфере. На рисунках 3.7 и 3.8 видно, что вертикальный градиент высот становится слабее, следовательно, движения в атмосфере становятся не такими явными. Они помогают понять структуру и динамику атмосферы в вертикальном направлении и прогнозировать погодные условия. С увеличением высоты геопотенциальная высота также увеличивается.

3.2 Стандартное отклонение

Стандартное отклонение — это мера изменчивости или разброса значений в наборе данных. Оно показывает, насколько значения в наборе данных отклоняются от их среднего значения, чем больше стандартное отклонение, тем больше разброс значений.

Ниже представлены рисунки стандартного отклонения на различных уровнях 500, 300, 100 и 7 гПа.

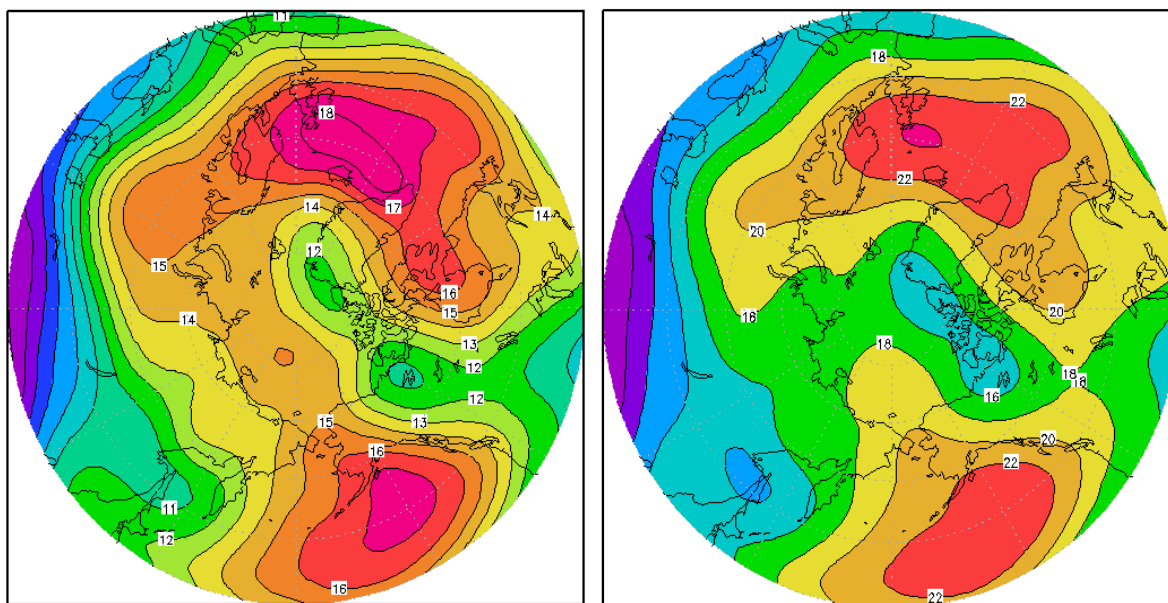


Рисунок 3.9 – Стандартное отклонение для декабря, слои атмосферы 500 (слева) и 300 (справа) гПа, в декаметрах

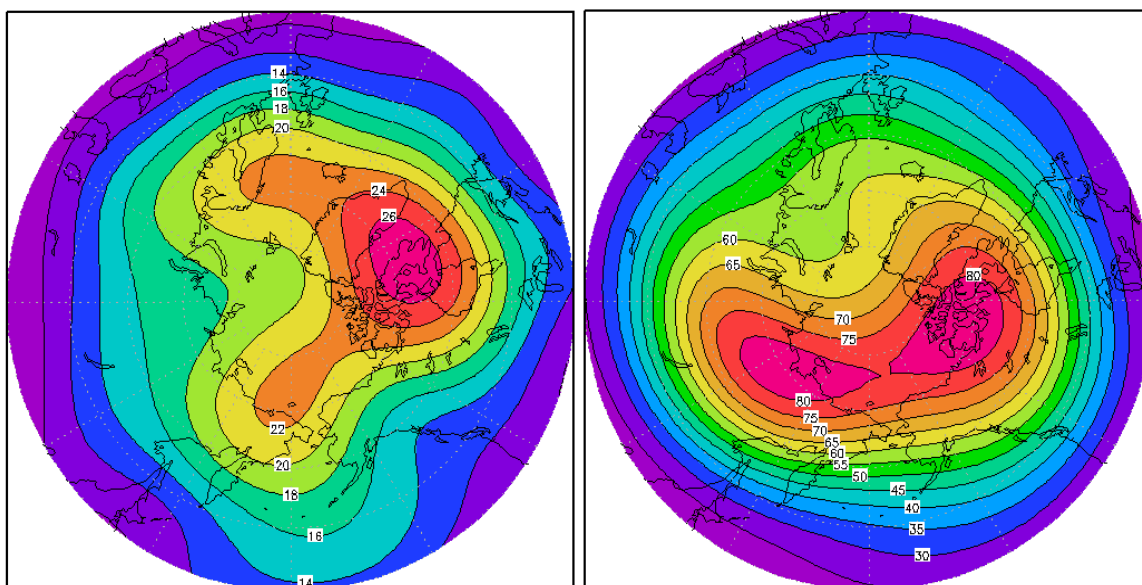


Рисунок 3.10 – Стандартное отклонение для декабря, слоя атмосферы 100 (слева) и 7 (справа) гПа, в декаметрах

На изображениях стандартного отклонения геопотенциальной высоты можно увидеть, как значения этой высоты меняются в зависимости от координатного положения (широты и долготы) и времени. Чем больше значение стандартного отклонения, тем больше разброс значений геопотенциальной высоты в данном районе и в данное время.

Как можно заметить на рисунках выше, самый большой разброс значений в декабре наблюдался на высоте 7 гПа (≈ 32 км) в районе полюса имея расщепленный характер, захватывая Канаду и Якутию, при этом достигая максимум равного 80 дкм.

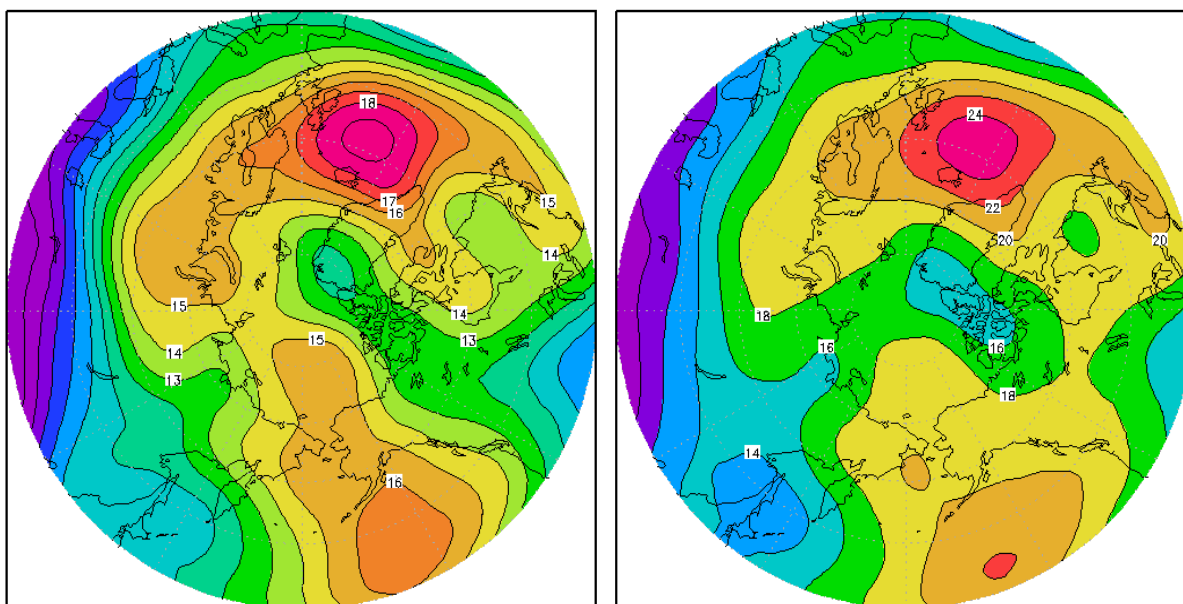


Рисунок 3.11 – Стандартное отклонение для января, слой атмосферы 500 (слева) и 300 (справа) гПа, в декаметрах

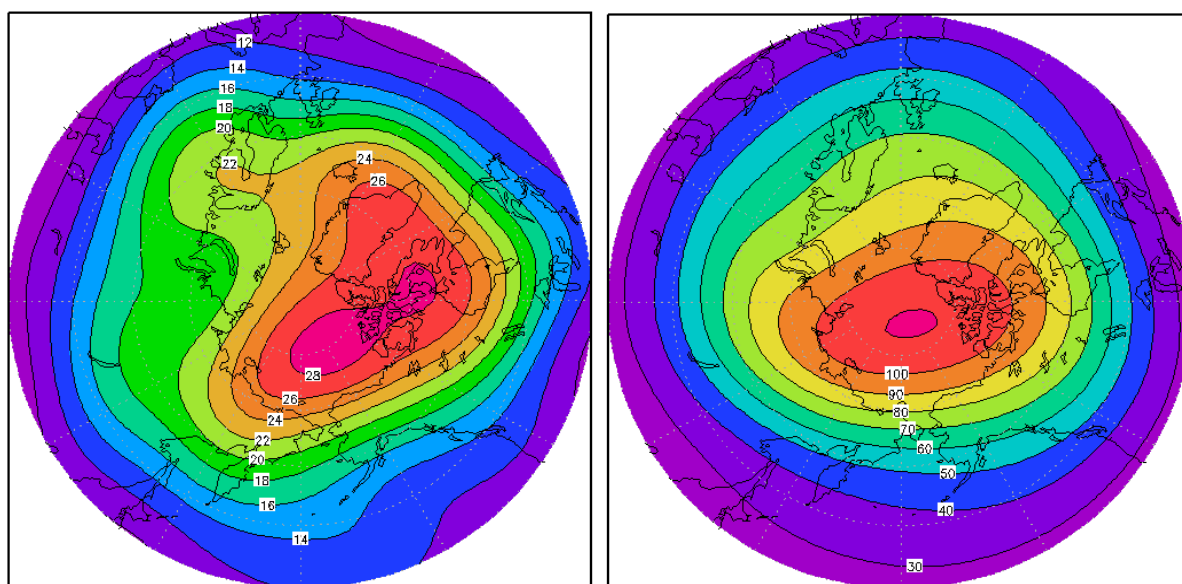


Рисунок 3.12 – Стандартное отклонение для января, слой атмосферы 100 (слева) и 7 (справа) гПа, в декаметрах

На рисунках видно, что изначально максимальная изменчивость в январе наблюдалась в Атлантике, затем с высотой оно увеличилось и сместилось к полюсу, где на высоте 7 гПа достигло максимума равного 100 дкм.

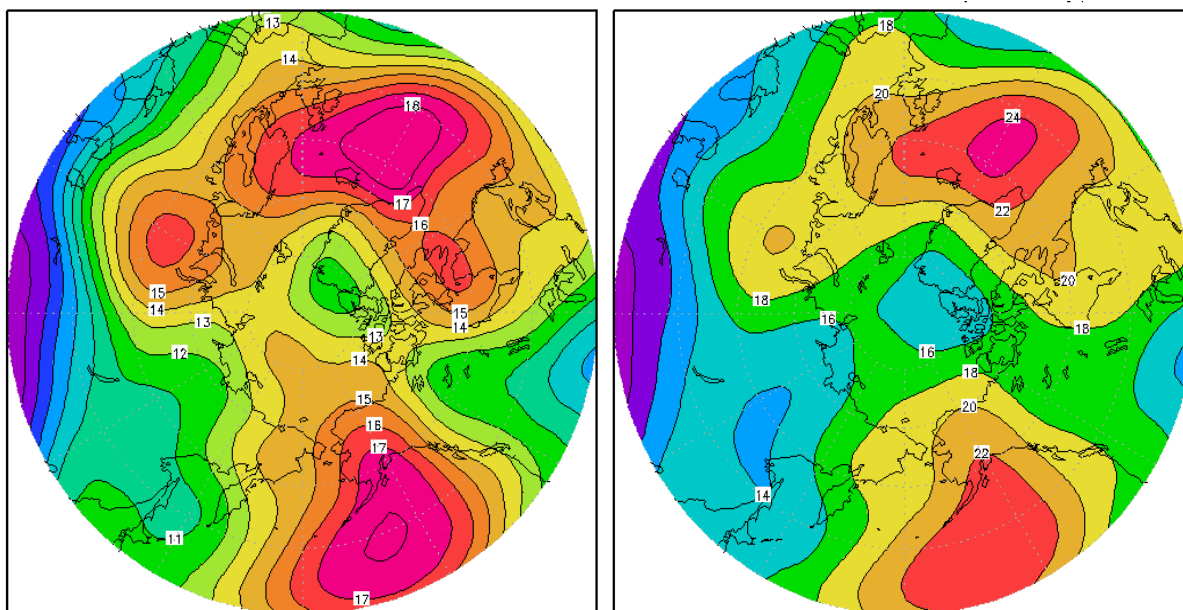


Рисунок 3.13 – Стандартное отклонение для февраля, слои атмосферы 500 (слева) и 300 (справа) гПа, в декаметрах

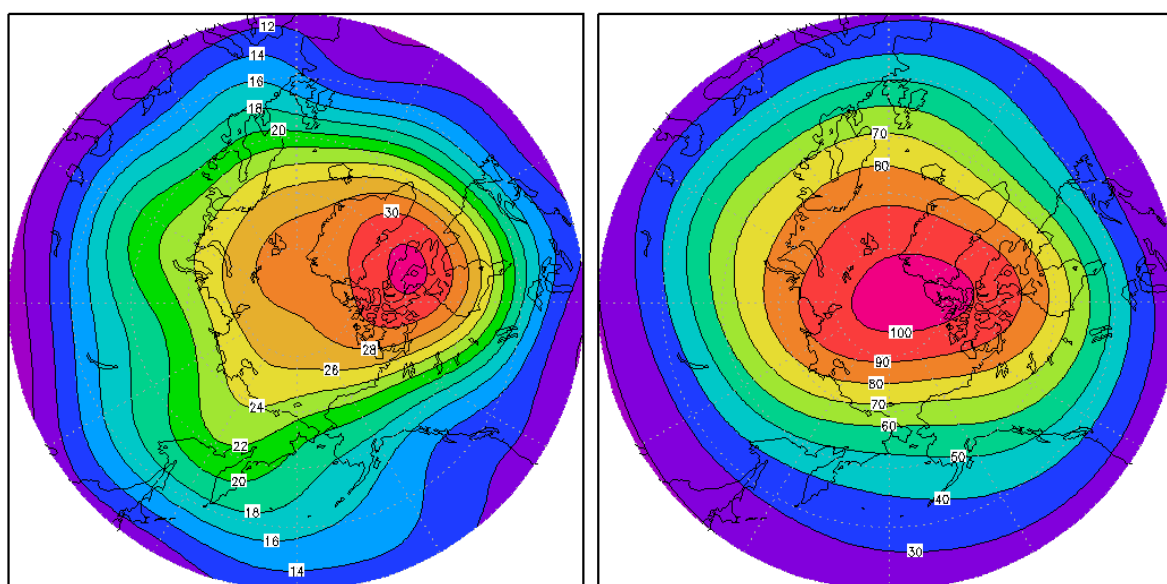


Рисунок 3.14 – Стандартное отклонение для февраля, слои атмосферы 100 (слева) и 7 (справа) гПа, в декаметрах

В феврале наблюдается схожая ситуация, что и в январе. На данных рисунках можно заметить, что изначально наибольшая изменчивость в феврале наблюдалась над Атлантикой и Аляской, затем с высотой постепенно увеличивалось и смещалось к полюсу, где на высоте 7 гПа

достигло максимума = 100 дкм. Это связано с изменчивостью положения стратосферного вихря.

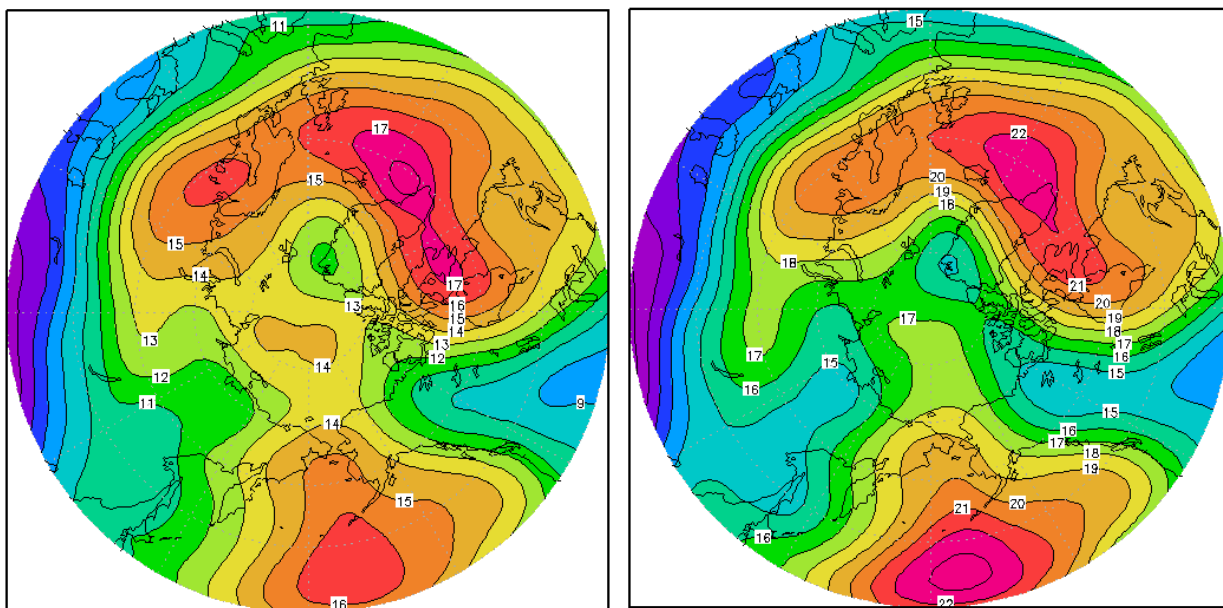


Рисунок 3.15 – Стандартное отклонение для марта, слой атмосферы 500 (слева) и 300 (справа) гПа, в декаметрах

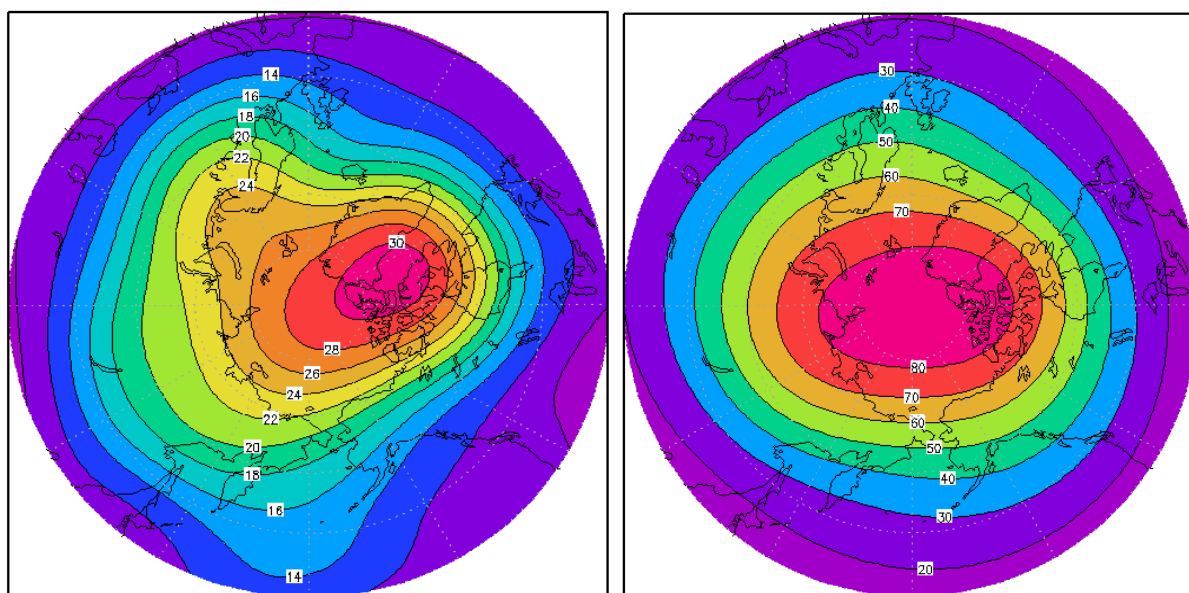


Рисунок 3.16 – Стандартное отклонение для марта, слой атмосферы 100 (слева) и 7 (справа) гПа, в декаметрах

Стандартное отклонение в марте у поверхности земли имело разбросанный и не значительный характер, но с высотой стало достаточно изменчивым в области полюса, имея максимум равный 80 дкм.

3.3 Корреляционный анализ

Коэффициент корреляции — это статистическая мера, которая используется для оценки степени связи между двумя переменными. Он показывает, насколько сильно и в каком направлении два набора данных взаимосвязаны. Значения коэффициента корреляции находятся в диапазоне от -1.0 (отрицательная корреляция) до 1.0 (положительная корреляция). Чем больше значение по модулю, тем больше корреляция.

Значимость коэффициента корреляции рассчитывалась с помощью критерия Фишера:

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

где: R^2 - коэффициент корреляции

f_1 и f_2 – число степеней свободы

f_1 – число степеней свободы (число переменных в аппроксимирующей формуле)

f_2 – число степеней свободы выборки

$$f_2 = N - k - 1 \quad (2)$$

N – количество значений

$k = f_1$

Полученный результат проверяют по таблице – значения критерия Фишера для уровня значимости, если $F >$ табличного, то коэффициент корреляции значимый.

После проделанных расчетов, получаем значение, когда коэффициента корреляции значим F должно быть больше 0,3 по модулю.

Рассмотрим несколько примеров, ярко показывающих внезапное стратосферное потепление. Одним из таких примеров является стратосферное потепление 2012–2013 гг., которое относилось к классу сильных потеплений. Фаза ВСП, связанная с перестройкой циркуляции в стратосфере, приходилась на 27 декабря – 10 января. Затем внезапное стратосферное потепление, которое начало свое формирование в конце января 2018 г, а максимум пришелся на 15 февраля 2018 г. Далее подробнее рассмотрим событие ВСП, которое начало формироваться в конце декабря 2018 года, достигнув максимума около 1 января 2019 года.

Чтобы установить, какое влияние оказывает стратосфера на тропосферу, были построены корреляционные портреты. Данные корреляционные портреты были рассчитаны и построены по следующим уровням:

- Коэффициент корреляции между геопотенциальной высотой на уровне 7 гПа и уровнями ниже - 1000, 700, 500, 300, 250, 200 и 100 гПа

Январь 2013 г.

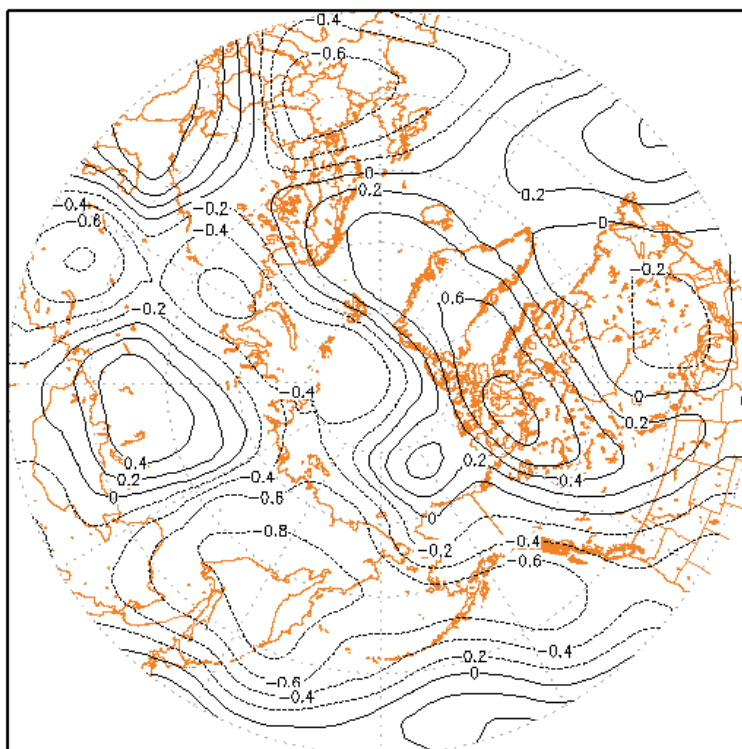


Рисунок 3.17 – Коэффициент корреляции между геопотенциальной высотой на уровне 7 и 500 гПа

Наблюдается большой разброс значимости взаимодействия стратосферы на тропосферу, большой коэффициент имеет центр над Японией и Европой, и центр взаимодействия над Канадой.

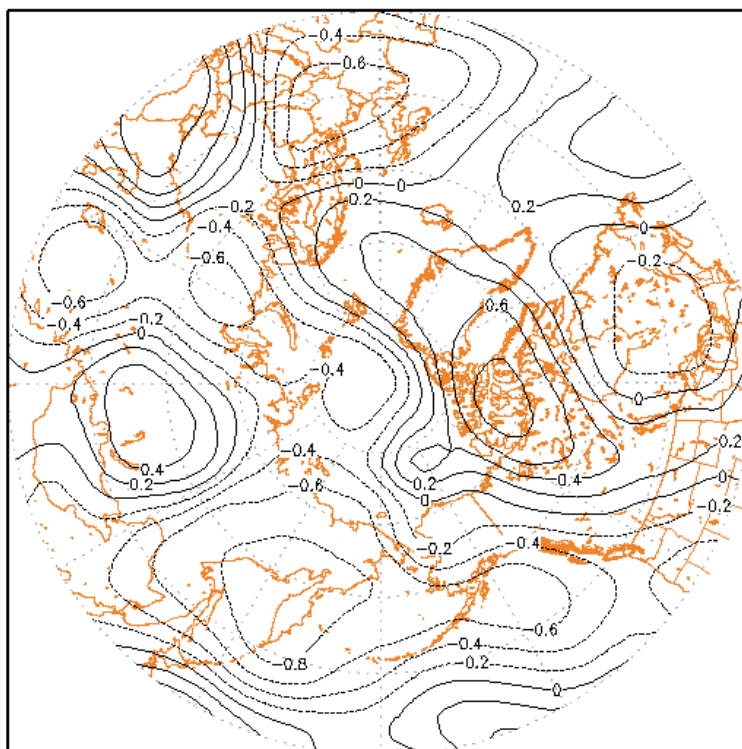


Рисунок 3.18 – Коэффициент корреляции между геопотенциальной высотой на уровне 7 и 300 гПа

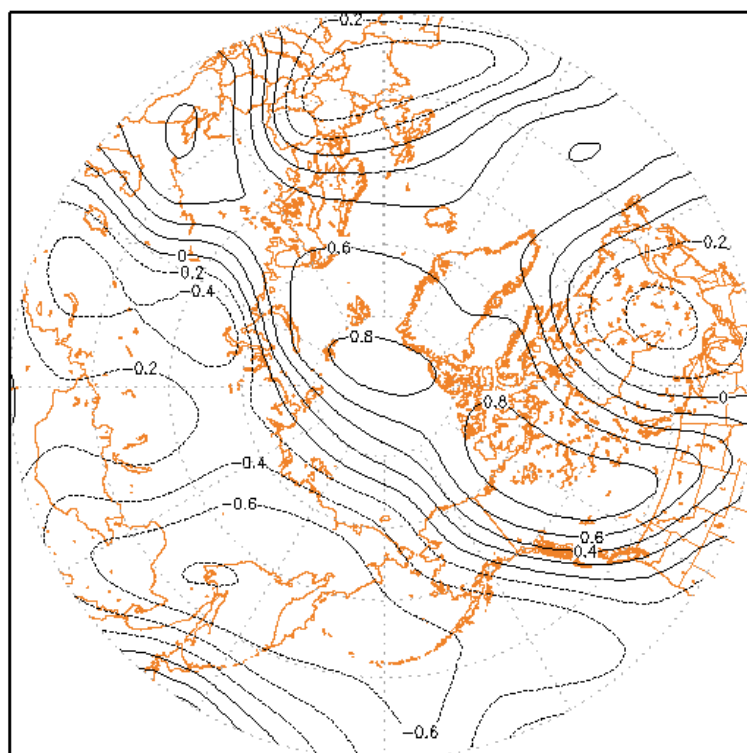


Рисунок 3.19 – Коэффициент корреляции между геопотенциальной высотой на уровне 7 и 100 гПа

Центр, который изначально располагавшийся над Японией, увеличился и стал охватывать территорию восточной Азии и Тихого океана, а центр над Канадой распространился до полюса. Таким образом, можно сделать вывод, что чем выше к стратосфере мы поднимаемся, тем большая связь стратосферы на тропосферу наблюдается.

Январь 2019 г.

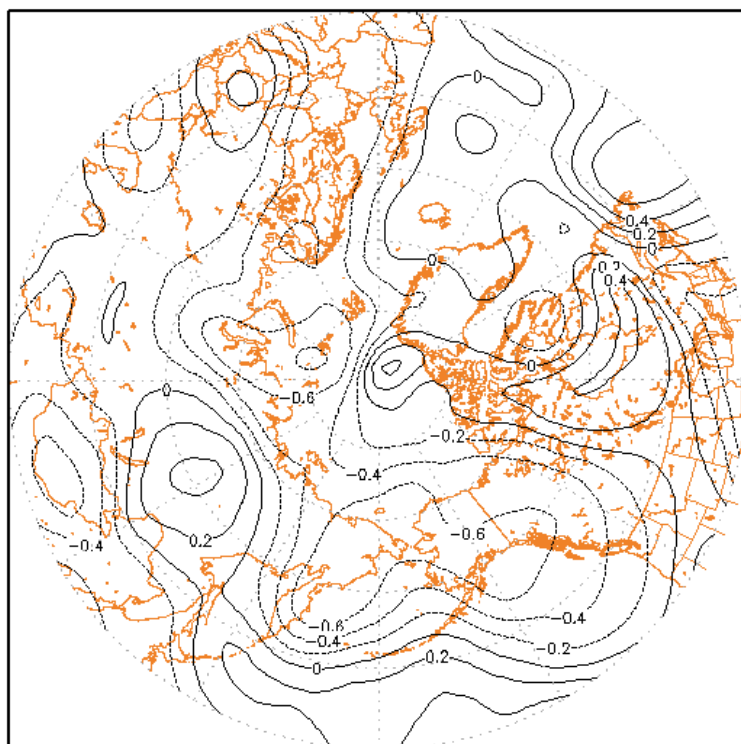


Рисунок 3.20 – Коэффициент корреляции между геопотенциальной высотой на уровне 7 и 500 гПа

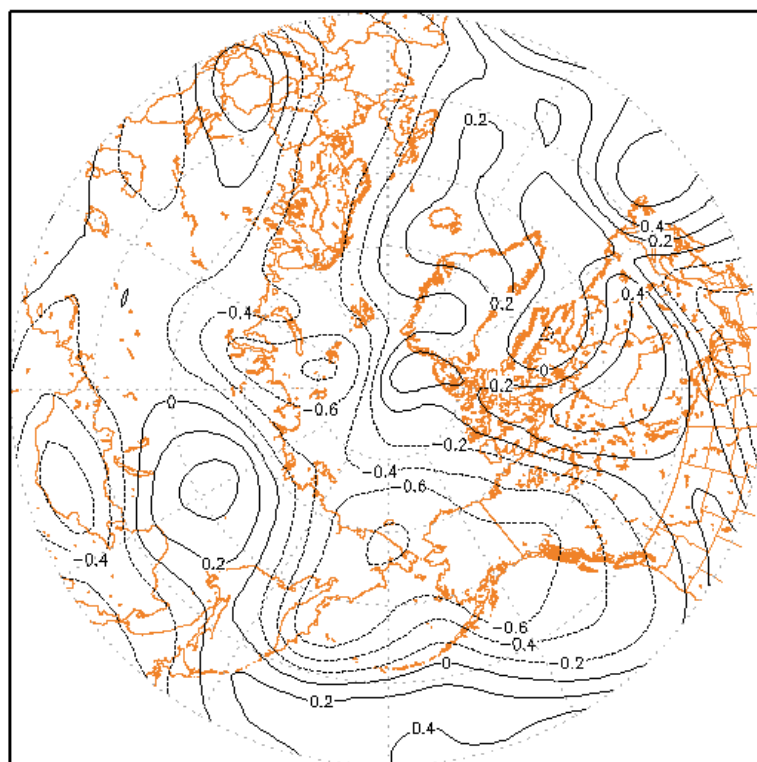


Рисунок 3.21 – Коэффициент корреляции между геопотенциальной высотой на уровне 7 и 300 гПа

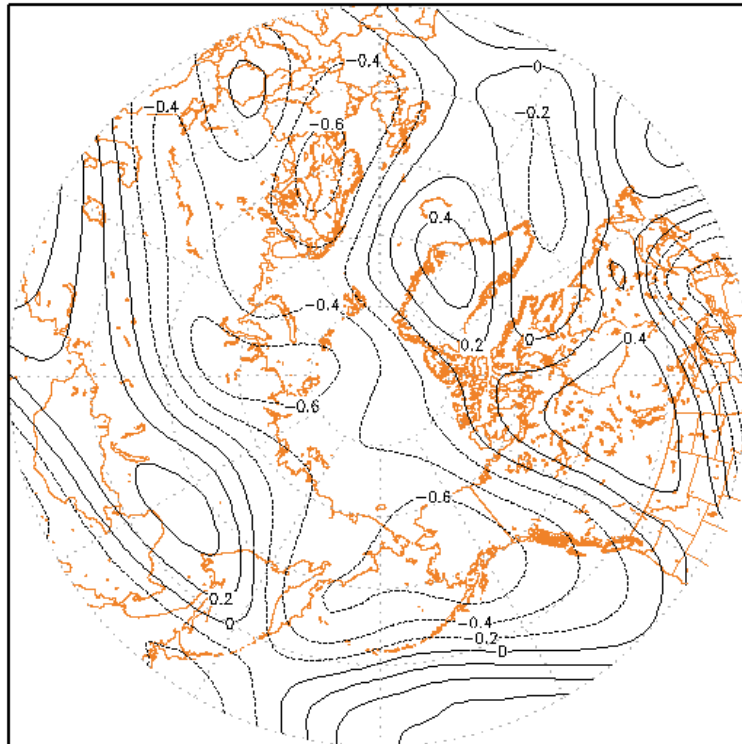


Рисунок 3.22 – Коэффициент корреляции между геопотенциальной высотой на уровне 7 и 100 гПа

Анализ полей значимости коэффициента корреляции, приведённых на рисунках, позволяет сделать вывод, чем выше уровень, тем поля становятся более гладкими, а изменчивость становится меньше. Смотря на изображения, можно сказать, что в январе 2019 г. большой коэффициент взаимодействия стратосферы и тропосферы располагался над Якутией, Японией, северной Европой и центром Северной Америки.

Февраль 2018 г.

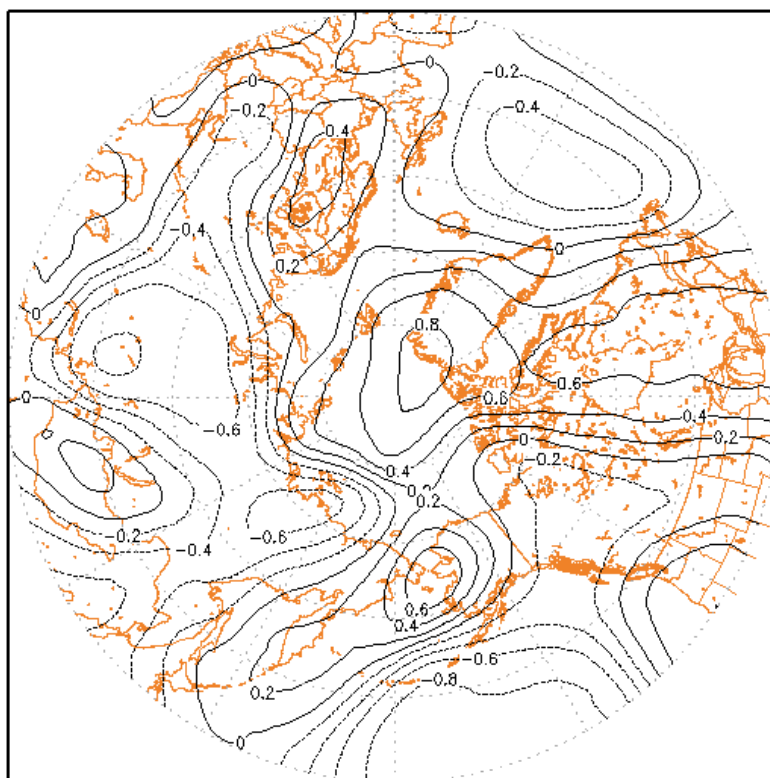


Рисунок 3.23 – Коэффициент корреляции между геопотенциальной высотой на уровне 7 и 500 гПа

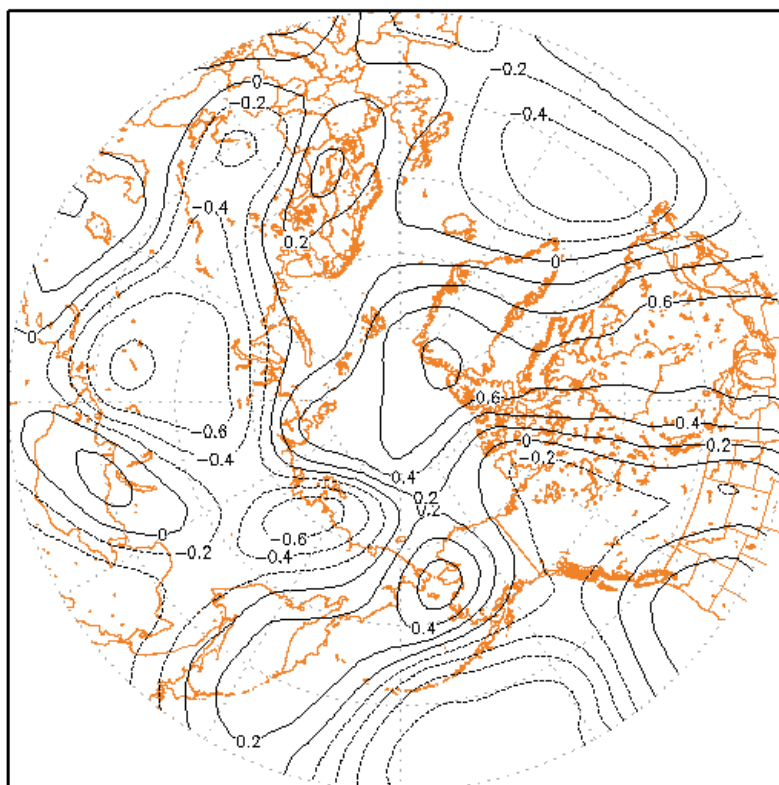


Рисунок 3.24 – Коэффициент корреляции между геопотенциальной высотой на уровне 7 и 300 гПа

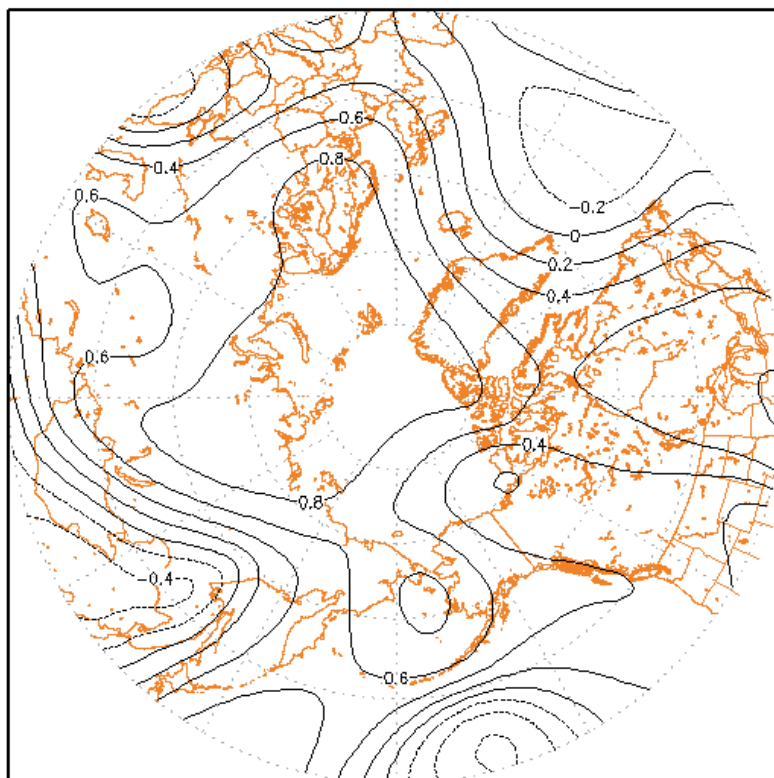


Рисунок 3.25 – Коэффициент корреляции между геопотенциальной высотой на уровне 7 и 100 гПа

В феврале 2018 г. с изменением высоты можно заметить смещение центра в восточном направлении и увеличении площади со значимым коэффициентом корреляции в северном полушарии.

3.4 Коэффициенты корреляции 30 дней от центральной даты ВСП

Эта часть ВКР (стр. 40-53) является составной частью другого исследования и не подлежит опубликованию.

Заключение

В ходе проведенного исследования по теме «Взаимодействие внетропической стратосферы с тропосферой в Северном полушарии» были рассмотрены внезапные стратосферные потепления и их влияние на климатические и погодные процессы. Изучение этого взаимодействия позволяет лучше понять изменчивость атмосферы и механизмы передачи энергии между верхними и нижними слоями атмосферы.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при внезапном стратосферном потеплении мы наблюдаем высокую степень связи между стратосферой и тропосферой. Безусловно, анализировалась линейная связь, в реальности же происходящие процессы более сложны и многозначны, но для оценки приближенного влияния корреляционный анализ оправдал себя. Именно там, где на изобарических поверхности 500 гПа были значимы коэффициенты корреляции, по другим исследованиям было искажение высотной фронтальной зоны.

Полученные результаты укрепляют представление о тесной связи между стратосферой и тропосферой, что позволяет предполагать, что изменения в верхней атмосфере могут оказывать влияние на долгосрочные погодные тенденции и климатические явления на Земле. Внезапные стратосферные потепления являются важными событиями в атмосфере, которые оказывают заметное влияние на климатические и погодные процессы, требуют дальнейшего изучения и наблюдения для более точного прогнозирования и понимания их последствий.

Список литературы

1. Угрюмов А.И., Лаврова И.В. Основные закономерности общей циркуляции атмосферы: учебное пособие / А.И. Угрюмов, И.В. Лаврова. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2021.
2. П.Н. Варгин, Е.М. Володин, А.Ю. Карпечко, А.И. Погорельцев, О стратосферно тропосферных взаимодействиях, Вестник Российской Академии наук, 2015, том 85, No 1, с. 39–46.
3. О. С. Кочеткова, В.И. Мордвинов, М.А. Руднева, Анализ факторов, влияющих на возникновение стратосферных потеплений, Институт солнечно- земной физики СО РАН, 2013, с. 718-723.
4. Taroh Matsuno, A Dynamical Model of the Stratospheric Sudden Warming, Journal of the Atmospheric Sciences, 1971, с.1479-1494
5. Ronald Gelaro, Will McCarty, Max J. Suárez, Ricardo Todling , 2017: The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)
6. Обзорная статья «Внезапное Стратосферное Потепление» Марк Болдуин, Бланка Айарзагуэна.
7. Колебания общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы погоды / под ред. Ю. Б. Храброва. – Л. : Гидрометеороиздат. 1967.
8. П.Н. Варгин. О стратосферно-тропосферных взаимодействиях / П.Н. Варгин, Е.М. Володин, А.Ю. Карпечко, А.И. Погорельцев // Вестник Российской академии наук. 2015. Том 85. № 1. – с. 39–46.
9. J. Perlwitz. Downward Coupling between the Stratosphere and Troposphere: The Relative Roles of Wave and Zonal Mean Processes / Judith Perlwitz, Nili Harnik // Journal of Climate. 2004.
10. WMO Commission for Atmospheric Sciences Abridged Final Report of the Seventh Session, Manila, 27 February- 10 March 1978. WMO No. 509

11. Scherhag, R. Die explosionsartige Stratosphärenerwärmung des Spaitwinters 1951/52 / R. Scherhag // Ber. Deut. Wetterdienstes. – 1952. – P. 51–63
12. К. Моханакумар. Взаимодействие стратосферы и тропосферы. М. Физматлит. 2011
13. О. С. Кочеткова, В.И. Мордвинов, М.А. Руднева, Анализ факторов, влияющих на возникновение стратосферных потеплений, Институт солнечноземной физики СО РАН, 2013, с. 718-723.
14. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974.
15. «Определение внезапного стратосферного потепления» / Эми Х. Батлер, Диан Дж. Сейдел, Стивена К. Хардимана, Нила Бутчарта, Томаса Бирнера и Аарона Мэтча , 2015.
16. «Мониторинг внезапного потепления стратосферы в условиях изменения климата с 1980 года на основе данных повторного анализа, подтвержденных радиозакрытием» / Ин Ли, Готфрид Кирхенгаст, Марк Шварц и Юнбин Юань, 2023.
17. «Основные погодно-климатические особенности января 2013, 2019 г. и февраля 2018 г. в Северном полушарии» <https://meteoinfo.ru/>