



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

На тему «Исследование влияния изменений климата на устойчивость  
циркумполярного вихря в северном полушарии»

Исполнитель Семёнушкин Матвей Ильич  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор физико-математических наук  
(ученая степень, ученое звание)

Смышляев Сергей Павлович  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

  
(подпись)

доктор физико-математических наук, доцент

Дробжева Яна Викторовна

(фамилия, имя, отчество)

«23» мая 2018г.

Санкт-Петербург  
2018

## Резюме

*В задачи данной работы входит анализ изменчивости территории, охватываемой циркумполярным вихрем, и его продолжительности в зависимости от изменений климата за климатологический период с 1980 по 2016 годы. Основным набором данных, используемым в этой статье, являются данные ретроспективного анализа Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA) о распределении значений потенциальной завихренности Эртеля на изэнтропической поверхности 500К, температуры и распределении озона на изобарической поверхности 50 гПа в полярной стратосфере Северного полушария. В ходе исследования получены новые аналитические сведения о пространственно-временной изменчивости циркумполярного вихря, его устойчивости в зависимости от климатических изменений.*

## Сокращения

EPV (Ertel Potencial Vorticity) – потенциальная завихренность Эртеля

ЦПВ – Циркумполярный вихрь

ВСП – Внезапное стратосферное потепление

Е.Д. – Единицы Добсона

ОСО – Общее содержание озона

ПСО – Полярные стратосферные облака

КДК – Квази-двухлетнее колебание

ХФУ – Хлорфторуглерод

PPMv (parts per million by volume) – единицы концентрации в миллионных долях по массе

## Содержание

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение .....                                                                             | 4  |
| 1. Циркумполярный вихрь и его влияние на состав, и структуру<br>атмосферы .....            | 7  |
| 1.1. Циркуляция и смешивание в стратосфере .....                                           | 7  |
| 1.2. Стратосферные облака и аэрозоли .....                                                 | 8  |
| 1.3 Влияние антропогенных воздействий на загрязненность и климат<br>полярных районов ..... | 9  |
| 1.4. Исследования антропогенного аэрозоля в Арктике .....                                  | 11 |
| 1.5. Пути переноса антропогенного аэрозоля в Арктику .....                                 | 12 |
| 1.6. Связь озонового слоя с циркуляционными особенностями полярных<br>районов .....        | 14 |
| 1.7. Пространственная изменчивость распределения озона .....                               | 18 |
| 2. ЦПВ. Механизм образования, структура и идентификация .....                              | 21 |
| 2.1. Влияние внезапных стратосферных потеплений на полярный<br>вихрь .....                 | 26 |
| 3. Анализ результатов .....                                                                | 28 |
| 3.1. 1980-1981г .....                                                                      | 30 |
| 3.2. 1996-1997г .....                                                                      | 32 |
| 3.3. 2010-2011г .....                                                                      | 34 |
| 3.4. 2015-2016г .....                                                                      | 36 |
| Заключение .....                                                                           | 39 |
| Список используемой литературы .....                                                       | 40 |

## Введение

В формировании изменения климатической системы важная роль принадлежит циркуляционной изменчивости атмосферы. Глобальная атмосферная циркуляция является одним из механизмов, определяющих многообразие региональных особенностей климата. Ввиду чего, изучение процессов влияющих на глобальный климат сложно недооценить.

В настоящее время в число приоритетов политики страны выдвигается необходимость учета изменений климата в качестве одного из ключевых долговременных факторов безопасности Российской Федерации [1].

В результате проведенных исследований получены новые теоретические сведения, расширяющие представление об устойчивости, изменчивости и колебаниях в полях температурного режима полярных и приполярных районах, пространственно-временной структуре температуры.

На современном этапе развития метеорологических наук, проблему озонового слоя Земли ставят в число наиболее значимых глобальных проблем, связанных с сохранением природной среды [2].

В последние десятилетия все чаще появляются сообщения о глобальных и региональных колебаниях климата, приводящих к материальному ущербу и неблагоприятным социальным последствиям. Это способствовало возникновению повышенного интереса ученых к проблеме изменения климата и долговременному предсказанию погоды [3].

Одним из показателей климата является температура воздуха, с которой связаны значительные изменения погоды. Многолетние колебания температуры, как правило, связаны с глобальными факторами, которые в настоящее время не полностью выявлены, а также не в полной мере изучены закономерности их изменчивости во времени. В связи с этим, встает вопрос о поиске новых предикторов, способных управлять

процессами большого масштаба на длительных промежутках времени. Необходимо также глубокое исследование их пространственно-временной структуры с целью выявления региональных закономерностей и получения прогностических рекомендаций для заблаговременного предупреждения о возможном развитии аномальных процессов, как в далекой перспективе, так и на коротких периодах времени.

Объектом исследования дипломной работы является зимний полярный вихрь, его устойчивость, пространственно-временная изменчивость и взаимодействие с полем потенциальной температуры и полем озона.

Целью работы является оценка влияния устойчивости Арктического циркумполярного вихря на глобальные изменения климата в период с 1980 по 2016.

Для реализации цели были поставлены следующие задачи:

- Изучить данные ретроспективного анализа MERRA о распределении характеристики циркумполярного вихря, в качестве которой выбраны значения потенциальной завихренности Эртеля, в полярной стратосфере на изоэнтропической поверхности 500К, изучить данные Изучение о стратосферной температуре и озоносодержании на уровне 50гПа в полярной стратосфере;
- Идентифицировать краевую линию и временные рамки ЦПВ посредством использования изученных данных и соотнести его положение с положением падения градиентов температуры и озона;
- Провести качественный анализ между устойчивым вихрем и распределением полей температуры и озона.

Практической значимостью работы считаются новые теоретические сведения о влиянии температурного поля на устойчивость стратосферного полярного циклона.

В работе приведена визуализация зависимости выбранных параметров друг от друга. Анализируя поле распределения потенциальной

температуры, обозначены даты начала явления ВСП как предиктор к разрушению полярного вихря.

## Глава 1. Циркумполярный вихрь и его влияние на состав, и структуру атмосферы.

### 1.1. Циркуляция и смешивание в стратосфере

Стратосфера представляет собой область интенсивных взаимодействий между радиационными, динамическими и химическими процессами, в которых горизонтальное перемешивание газообразных компонентов происходит гораздо быстрее, чем вертикальное [4]. Общая циркуляция стратосферы называется циркуляцией Брюера-Добсона, которая представляет собой циркуляцию в одной ячейке, простирающуюся из тропиков к полюсам, состоящую из подъема воздуха из тропической тропосферы и понижения воздуха в полярных районах. Стратосферная циркуляция является преобладающей волновой циркуляцией в том смысле, что тропический апвеллинг индуцируется силой волны распространяющимися на запад волнами Россби.

Интересной особенностью стратосферной циркуляции является квази-двухлетнее колебание в тропических широтах, которая управляется гравитационными волнами, которые конвективно генерируются в тропосфере. КДК вызывает вторичную циркуляцию, которая важна для глобального переноса стратосферных трасс, таких как озон или водяной пар. Другой крупномасштабной особенностью, которая существенно влияет на распространение стратосферы, является разрыв планетарных волн, что приводит к интенсивному квази-горизонтальному перемешиванию в средних широтах. Это нарушение гораздо более выражено в зимнем полушарии, где этот регион называется зоной серфинга. Это разрушение обусловлено высоко нелинейным взаимодействием между вертикально распространяющимися планетарными волнами и изолированной областью большой завихренности потенциала. В результате разрушение приводит к

крупномасштабному перемешиванию воздуха и других микро-газов в зоне серфинга среднего уровня. Временные масштабы этого быстрого смешивания намного меньше, чем гораздо более медленные временные периоды апвеллинга в тропиках и нисходящие потоки в экстратропиках.

В периоды зимы в северном полушарии внезапные стратосферные потепления, вызванные поглощением волн Россби в стратосфере, наблюдаются примерно через половину зимы, когда в стратосфере развиваются восточные ветры. Эти события часто предшествуют необычной зимней погоде [2].

## 1.2. Стратосферные облака и аэрозоли.

Атмосферный аэрозоль является продуктом сложной совокупности физических и химических процессов. Вследствие сложности данных процессов и короткого времени жизни аэрозоля, его химический состав и физические характеристики очень изменчивы. Пространственно-временная изменчивость характеристик аэрозоля настолько велика, а данные наблюдений в некоторой степени фрагментированы, что до сих пор в полной мере невозможны достоверные оценки общего бюджета аэрозоля различных типов [5]. В зависимости от состава и источников можно выделить следующие типы природного аэрозоля:

- поднятая ветром в атмосферу минеральная пыль;
- частицы биогенного происхождения;
- вулканический аэрозоль;
- дымы от сжигания биоты на суше;
- продукты испарения морских брызг;
- продукты газофазных реакций (сульфаты, возникающие за счет восстановленной серы, поступающей с поверхности океана).

Стратосферные аэрозоли привлекают к себе внимание, потому, что они оказывают заметное влияние на климат [6]. Известно, что

стратосферный аэрозольный слой наполняется в основном за счет извержений вулканов. Но среди стратосферных аэрозольных образований особый интерес вызывают полярные стратосферные облака, которые могут оказывать климатическое влияние и, что еще более важно, которые играют существенную роль в механизме разрушения озонового слоя и возникновения озоновых дыр. На поверхности частиц ПСО происходит накопление и галогенов и их активация, что приводит к разрушению молекул ОЗ. ПСО наблюдаются в некоторых районах Земли, в частности, в северной Европе, на Аляске и в Антарктиде в зимний период.

В этих условиях происходит конденсация частиц ПСО, состоящих из воды, серной и азотной кислот, размер которых может достигать нескольких микрон и даже десятков микрон.



Рисунок 1.1 – Перламутровые облака [19].

### 1.3. Влияние антропогенных воздействий на загрязненность и климат полярных районов

Роль полярных районов в формировании климата Земли определяется во многом тем, что в этих районах существуют механизмы, усиливающие воздействия климатических изменений. К ним относятся:

- эффекты, связанные с изменением облачности, обусловленной изменяющимся альбедо и поглощением радиации Солнца;
- сильная зависимость энергетического баланса в этих районах от площади, покрытой снегом и льдом с высоким альбедо.

Следовательно, можно ожидать, что эффект потепления в полярных районах должен быть в несколько раз больше и значительнее чем в средних широтах.

В частности антропогенные атмосферные аэрозоли, могут вносить существенный вклад в климатические изменения в полярных широтах. Это происходит вследствие таких эффектов как:

- выпадение оптически активного аэрозоля на снег или лед, уменьшает их альбедо, способствует более быстрому таянию снежного и ледяного покрова;
- частицы, сильнопоглощающие радиацию, могут обусловить нагревание соответствующих слоев атмосферы, схожее с нагреванием за счет молекулярного взаимодействия.

Проблема загрязнения Арктики антропогенными аэрозолями встала перед учеными в начале 70-х годов. Исследования химического состава частиц из проб, взятых за полярным кругом, показали в них повышенную концентрацию таких связанных с промышленным загрязнением элементов, как ванадий и марганец. На основе проведенных после наблюдений исследований, в разных частях Арктики был подтвержден вывод, что вся Арктика подвержена аэрозольному антропогенному загрязнению, причем наименьший вклад вносят местные источники. Теоретические работы обозначают три района, которые вносят основной вклад в загрязнение районов Арктик, по мере возрастания их значения:

- Юго-Восточная Азия;
- Северо-Западная и Восточная Европа;
- Северо-Западное побережье Соединенных штатов Америки.

Примерное время переноса трас из умеренных широт в Арктику составляет порядка 20 суток. Предположительно, доминирующим фактором этого переноса на расстояние 5-10 тысяч км является не упорядоченная адвекция, а крупномасштабная турбулентная диффузия []. Если данное предположение справедливо, то пространственное распределение аэрозоля в Арктике должно быть однородным при характерных масштабах более 2000 км, превышающих размеры арктических циклонов.

#### 1.4. Исследования антропогенного аэрозоля в Арктике.

Выполненные в середине 70-х начале 80-х годов наблюдения привели к обнаружению ранней весной в Арктике очень высокого уровня аэрозольного антропогенного загрязнения атмосферы, близкого к наблюдаемому в промышленных городах. Имеющиеся результаты наблюдений позволили сделать следующие выводы:

- арктическая дымка представляет собой широко распространённое явление, достигает первичного максимума в марте – апреле и вторичного максимума в августе;
- при наличии дымки горизонтальная и наклонная дальность видимости снижается до 3 – 8 км;
- для зимней дымки типично присутствие значительного антропогенного компонента, имеющего, вероятно, евразийское происхождение;
- главными компонентами антропогенного аэрозоля являются сульфаты (до 2 мкг/м<sup>3</sup>), органические соединения (1 мкг/м<sup>3</sup>) и сажевый углерод (0,3 – 0,5 мкг/м<sup>3</sup>), коэффициент поглощения которого составляет около  $4 \cdot 10^{(-6)} \text{ м}^{-1}$ ;
- дымка обнаруживает признаки значительного старения, проявляющиеся в высоком отношении концентрации в субмикронном диапазоне частиц (аккумулятивная мода);

- необходимо изучение вертикального распределения концентрации и состава аэрозоля, а так же его стоков.

В связи с высокой актуальностью проблемы арктического аэрозоля в 1983 году была проведена международная программа исследований арктической дымки и взятия проб газа и аэрозоля в Арктике (АГАП) с помощью самолета-лаборатории. Главными целями программы являлось:

- анализ траектории, пространственного распределения и химического состава аэрозоля арктической дымки;
- определение концентрации и пространственного распределения ряда малых газовых составляющих (преимущественно антропогенного происхождения – фреоны, закись азота, сернистый газ, метан, озон);
- прямые измерения радиационных эффектов дымки;
- измерения концентрации, потоков и градиентов  $\text{CO}_2$  в атмосфере для выявления вклада источников и стоков глобальных масштабов (например, известно, что Норвежское и Баренцево моря являются одним из главных районов формирования глубинных вод океана и, следовательно, возможной зоной стока  $\text{CO}_2$ ).

В конечном счете, основной задачей программы являлась оценка возможного воздействия арктической дымки на климат. Предварительные расчеты показали, что эффект среднесуточного прогревания атмосферы за счет поглощения солнечной радиации может быть сравним с воздействием удвоенной концентрации  $\text{CO}_2$ . Так же важную роль может играть обусловленные сажевым углеродом «потемнение» облаков и уменьшение альбедо подстилающей поверхности.

### 1.5. Пути переноса антропогенного аэрозоля в Арктику.

Теория поступления загрязненного воздуха в Арктику происходит из предположения адиабатичности процессов в атмосфере, которое приемлемо для широкого класса условий в пределах ограниченного

интервала времени. В таком случае потенциальная температура в районе источника загрязнений должна быть примерно такой же, что и в районе, куда поступают загрязнения. С этой точки зрения единственным возможным регионом – источником загрязнений вблизи подстилающей поверхности в Арктике может быть лишь Евразия, а в свободной атмосфере – восточный сектор США, Восточная Азия и Центральная Европа. Годовой ход загрязнения арктической атмосферы связывается с амплитудой и фазой планетарных волн, поскольку они:

- приводят к пространственному размежеванию районов – источников загрязнений у земной поверхности и в свободной атмосфере, поскольку струйные течения тесно связаны с фронтами;
- создают благоприятные условия для меридионального переноса воздушных масс, т.е. ситуации, характерной для условий возникновения арктической дымки.

При этом учитывается рост частоты повторяемости облаков и туманов летом, которые усиливают вымывание аэрозоля из атмосферы, и годовой ход выбросов загрязняющих компонентов.

Анализ эволюции полей давления у земной поверхности и на уровне 500 гПа выявил существование быстрого и упорядоченного переноса аэрозоля из Евразии в Арктику в пределах определенных зон, которые являются частью устойчивой атмосферной циркуляции. Подобный перенос осуществляется при соблюдении определенных условий, включающих стагнацию над районом источника аэрозоля (обеспечивающую аккумуляцию загрязнений в условиях антициклонического блокирования), выброс воздуха на север и упорядоченный перенос через Арктику, определяемый квазиустойчивыми особенностями общей циркуляции атмосферы. Менее жесткие ограничения характерны для поступления аэрозоля в норвежский сектор Арктики (в этом случае длина трас переноса не превосходит 6000 км), которое осуществляется как прямой

меридиональный перенос загрязнений из Западной Европы при наличии узкой зоны сильных градиентов давления.

#### 1.6. Связь озонового слоя с циркуляционными особенностями полярных районов.

Атмосферный озон является одним из самых важных газов Земной атмосферы. С одной стороны, он защищает жизнь на Земле, поглощая большую часть жесткого ультрафиолетового излучения Солнца, с другой стороны, по своим химическим свойствам озон является сильным окислителем и токсичным газом, и его чрезмерное содержание в нижней части атмосферы является вредным для человека, животных и растений. Озон, благодаря своим радиационным свойствам, оказывает существенное влияние на климат Земли, являясь парниковым газом и внося существенный вклад в нагрев атмосферы за счет поглощения солнечной радиации и в охлаждение за счет собственного излучения тепловой энергии.

Меры по прекращению использования ХФУ в производстве и четкий контроль за состоянием озонового слоя, способствуют постепенному его восстановлению, однако вновь наблюдаемые озоновые аномалии на обоих полюсах говорят о том, что проблема изучена не до конца и существуют другие причины возникновения озоновых дыр как в Антарктике, так и в Арктике [6]. Образование областей с очень низким содержанием озона в полярных районах несет угрозу для озона средних широт, так как после разрушения ЦПВ, полярный воздух перемешивается со среднеширотным, и, как результат, содержание озона в средних широтах может также уменьшиться.

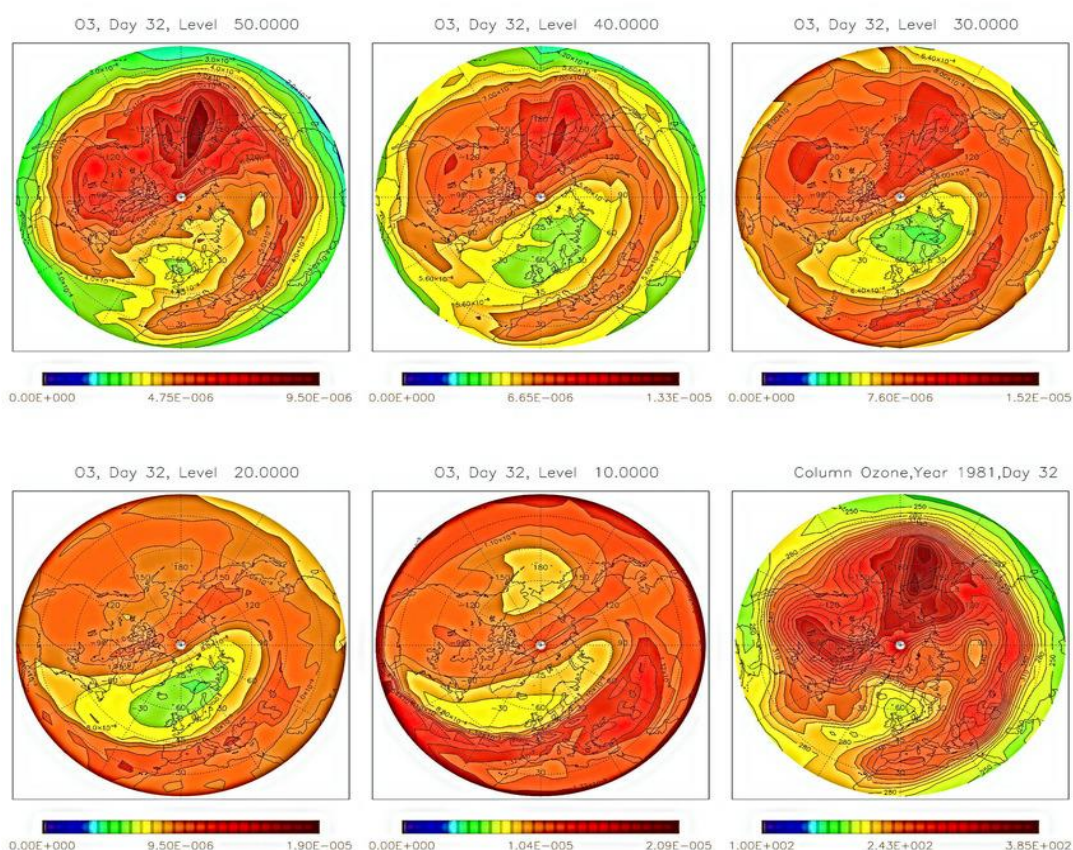


Рисунок 1.2 – Распределение значений содержания озона [PPMv] с высотой, на пяти изобарических поверхностях 50-10 гПа включительно, соотнесенные с ОСО [е.Д.].

Химические гипотезы озоновой дыры основываются на экспериментально обнаруженном факте одновременного с уменьшением ОСО увеличения хлорсодержащих малых газовых составляющих. Вместе с резким уменьшением озона происходит также и охлаждение стратосферы (Рис.3), что может быть вызвано сильным вертикальным подъемом воздушных масс в нижней стратосфере.

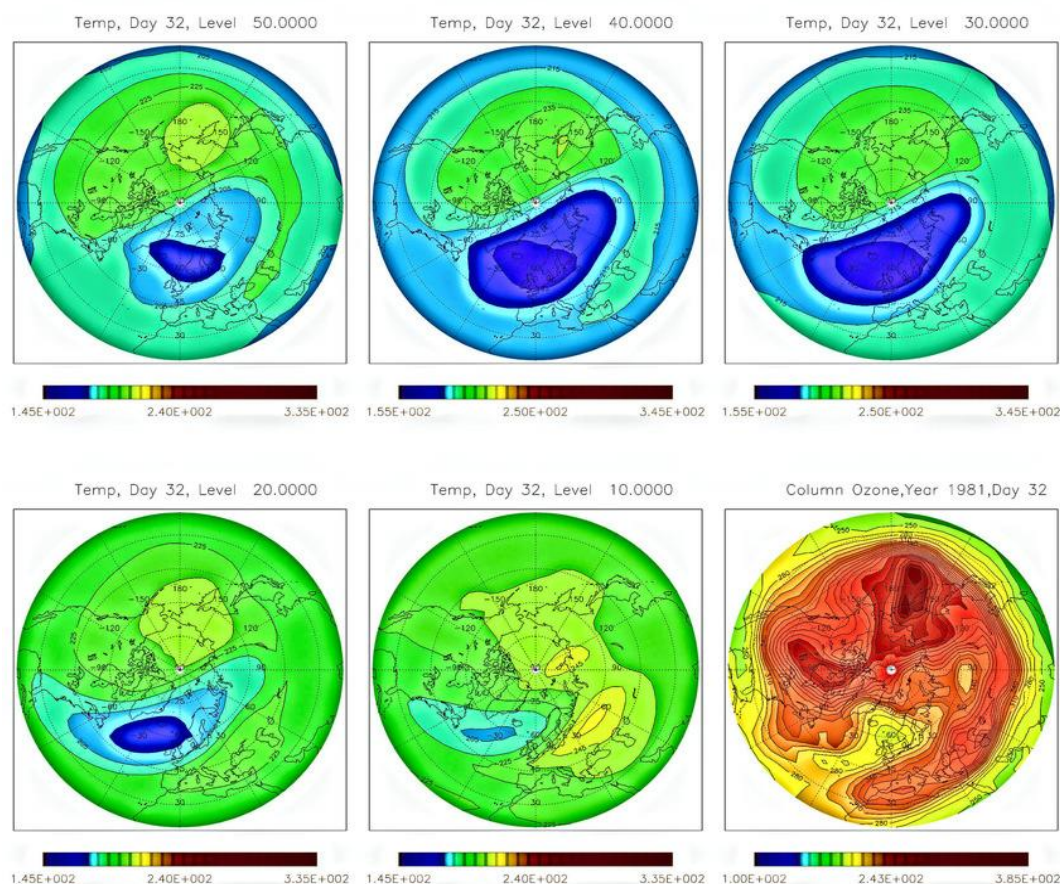


Рисунок 1.3 – Распределение температуры  $T[K]$ , на пяти уровнях изобарической поверхности 50-10 гПа включительно, а так же уровень ОСО [е.Д.].

Крайняя изоляция циркумполярного вихря ведет к охлаждению нижней стратосферы до низких температур, в результате чего достигается состояние, близкое к радиационному равновесию и, следовательно, выхолаживание стремится к нулю. Тогда при возвращении солнца весной возникают большие вертикальные скорости при нагреве стратосферы за счет ПСО, которые накладываются на систему меридиональной циркуляции. Восходящие движения, во-первых, выносят в стратосферу более бедный озоном воздух из нижних слоев, а, во-вторых, способствуют более быстрому разрушению озона на больших высотах, где фотохимические реакции, разрушающие озон, протекают быстрее. Другой механизм влияния динамических процессов на озоносодержание в стратосфере может заключаться в том, что озоновая дыра возникает из-за

уменьшения в зимнее время активности планетарных волн при возникновении ЦПВ. Из-за этого уменьшается нисходящее привнесение в полярные районы зимой и весной озона из средних широт, что, в совокупности с разрушением озона в течение длинной полярной ночи внутри циркумполярного вихря, ведет к образованию низких концентраций озона. Кроме того, ВСП в значительной степени определяют интенсивность разрушения озона в полярных районах. ВСП, возникающие в результате взаимодействия распространяющихся из тропосферы в стратосферу планетарных волн с зональной циркуляцией, могут приводить к замедлению, а в некоторых случаях к изменению направления зонального ветра и увеличению температуры полярной стратосферы иногда на десятки градусов в течение нескольких суток. А.Л. Кац писал [7]: «Зимние ВСП следует считать нормальным процессом для стратосферы, которые выражены тем резче, чем больше температурный контраст между экватором и полюсом». При этом потепления периодически осуществляются, усиливаясь по мере увеличения градиента температуры в стратосфере во время полярной зимы. Начиная со второй половины полярной зимы, спокойный режим циркуляции в отдельные годы подвергается исключительно резким изменениям, которые в одних районах в течение непродолжительного периода приводят к нагреву стратосферы на 30–50° и смене западного ветра на восточный, а в других, наоборот, к столь же значительным похолоданиям и не менее резким изменениям направления ветра.

В циркуляционном смысле в результате наиболее сильных (главных) ВСП стратосферный циркумполярный вихрь может значительно ослабнуть или произойти раздвоение центра ЦПВ с последующим существованием в течение более или менее длительного периода двух самостоятельных циклонических центров вместо одного [8]. Повторяемость и продолжительность существования от двух до нескольких центров в системе деформировавшегося полярного стратосферного циклона могут

быть различными в разные годы. В одни годы раздвоение полярного стратосферного циклона происходит чаще, в другие — реже. Раздвоение стратосферного полярного вихря сопровождается изменениями поля температуры. При этом нередко происходит повышение температуры и в средней стратосфере. В слое 20–30 км иногда температура достигает 250–260 К и даже 270 К, вместо обычных для зимы 200–210 К.

### 1.7. Пространственная изменчивость озона

С экологической точки зрения, наиболее важен стратосферный озон, максимум концентрации которого на разных широтах приходится на высоте 16–25 км (нижняя стратосфера). К сожалению, общее количество озона в атмосфере постепенно уменьшается, в Антарктике образуется обширная озоновая дыра. Неустойчивые молекулы озона в естественных условиях образуются и распадаются под действием различных природных факторов.

В рамках проблемы деградации озонового слоя в качестве основной причины его истощения указывается на фотохимическое разрушение озона антропогенными факторами. В 1973 г. Ш. Роуланд и М. Молина обнаружили, что фреоны могут разрушать стратосферный озон. В 1977 г. был выработан план действий по защите озонового слоя от антропогенного воздействия, а в 1985 г. подписывается текст Венской конвенции об его охране. Этой же цели служит Монреальский протокол 1987 г. и поправки к нему, предусматривающие контроль за озоноразрушающими соединениями, прекращение производства и использования ХФУ.

Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических исследований, реальные причины убыли озона до сих пор не установлены. В материалах Всемирной Метеорологической организации отмечается, что в целом прогноз состояния озонового слоя остается неопределенным, существующие химические модели не

позволяют точно воспроизвести наблюдаемые вариации ОСО. Приводимые в научной литературе сведения о скорости деструкции стратосферного озона крайне противоречивы.

Возникло понимание того, что вариации озонового слоя имеют не только фотохимическую природу, а обусловлены влиянием динамических факторов в нижней стратосфере. Перенос и распределение поля озона отражает структуру и характер динамики атмосферы. Наличие системы космического мониторинга ОСО позволяет использовать озон в качестве индикатора динамических процессов. В этой связи актуальными становятся разработка методов контроля за движением масс озона и детальное исследование пространственно-временной изменчивости озонового слоя, уточнение скорости убыли ОСО. Актуален поиск дополнительных механизмов, способствующих образованию озоновых аномальных явлений (например, Антарктической озоновой дыры), и не связанных с фотохимией.

В стратосфере задерживается большая часть коротковолновой части ультрафиолетового излучения (180—200 нм) и происходит трансформация энергии коротких волн. Под влиянием этих лучей изменяются магнитные поля, распадаются молекулы, происходит ионизация, новообразование газов и других химических соединений. Эти процессы можно наблюдать в виде северных сияний, зарниц и других свечений.

Озон образуется в верхней стратосфере (40-50 км) при фотохимических реакциях с участием кислорода, азота, водорода и хлора. В нижней стратосфере (10-25 км), где озона больше всего, главную роль в сезонных и более длительных изменениях его концентрации играют процессы переноса воздушных масс. Содержание озона здесь определяют химический состав атмосферы и долговременные (с периодом более 10 лет) вариации процессов переноса. Озоносфера не пропускает солнечное излучение короче 290 нм, при данной величине которого жизнь в том виде, в котором мы ее представляем, была бы невозможной [9]. Разрушается же

он, взаимодействуя с выбрасываемыми в атмосферу веществами, содержащими хлор (фреонами и галонами), которые используют в различных отраслях промышленности. Многочисленные измерения и расчеты свидетельствуют о том, что эти реакции протекают в основном на поверхности полярных стратосферных облаков, которые образуются здесь при очень низких (менее  $-80^{\circ}\text{C}$ ) температурах. После окончания полярной ночи, в сентябре, с восходом солнца образуются атомы хлора, разрушающие молекулы озона. Наблюдения показали, что подобный химический механизм действует и в Арктике (в январе - марте). Температура нижней стратосферы в Арктике выше, чем в Антарктике, поэтому полярные стратосферные облака здесь образуются реже, так что озоновая "дыра" регистрируется главным образом над Антарктикой. Ключевым элементом этого механизма разрушения озона - именно полярные стратосферные облака, образующиеся только при очень низких температурах. Если собрать весь озон в слой при давлении 760 мм рт. ст. (1013.24 гПа) и температуре  $0^{\circ}\text{C}$ , то толщина этого слоя, т.е. общее содержание озона, составит около 3 мм или 300 единиц Добсона.

В стратосфере и более высоких слоях под воздействием солнечной радиации молекулы газов диссоциируют — на атомы (выше 80 км диссоциируют  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$ , выше 150 км —  $\text{O}_2$ , выше 300 км —  $\text{H}_2$ ). На высоте 100—400 км в ионосфере происходит также ионизация газов, на высоте 320 км концентрация заряженных частиц ( $\text{O}^{+2}$ ,  $\text{O}^{-2}$ ,  $\text{N}^{+2}$ ) составляет  $\sim 1/300$  от концентрации нейтральных частиц. В верхних слоях атмосферы присутствуют свободные радикалы —  $\text{OH}$ ,  $\text{HO}_2$ .

## 2. ЦПВ. Механизм образования, структура и идентификация.

Основным звеном атмосферной циркуляции Северного полушария является циркумполярный вихрь – представляющий собой область пониженного давления верхнего уровня, расположенную в полярных и приполярных районах Земли.

В земной атмосфере есть два полярных вихря, которые покрывают Северный и Южный полюс. Каждый полярный вихрь представляет собой стойкую, крупномасштабную зону низкого давления, которая вращается против часовой стрелки, что изображено на рисунке 2.1.

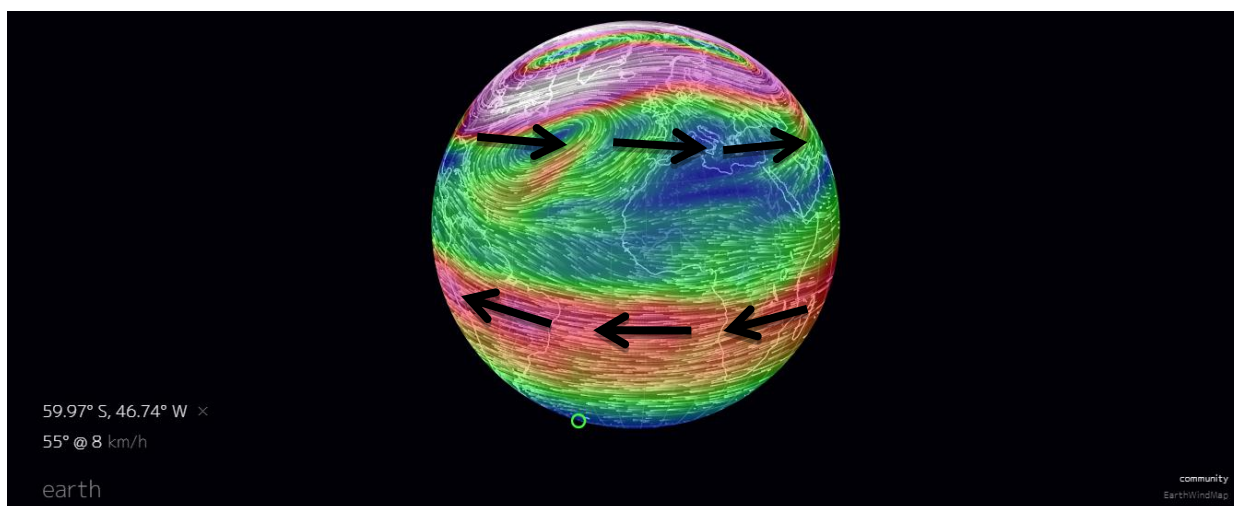


Рисунок 2.1 – Представление направления вращения полярного вихря в северном и южном полушариях [10].

Основания двух полярных вихрей расположены в средней и верхней тропосфере и простираются в стратосферу (в работе основным уровнем выбрана поверхность 50 гПа из-за расположения на данном уровне озонового слоя). Под вихрем лежит большая масса холодного, плотного арктического воздуха. Каждый год вихри ослабевают и укрепляются. Когда вихрь Арктики слабеет, он разбивается на два и более вихря, рис. 5 (а,б).

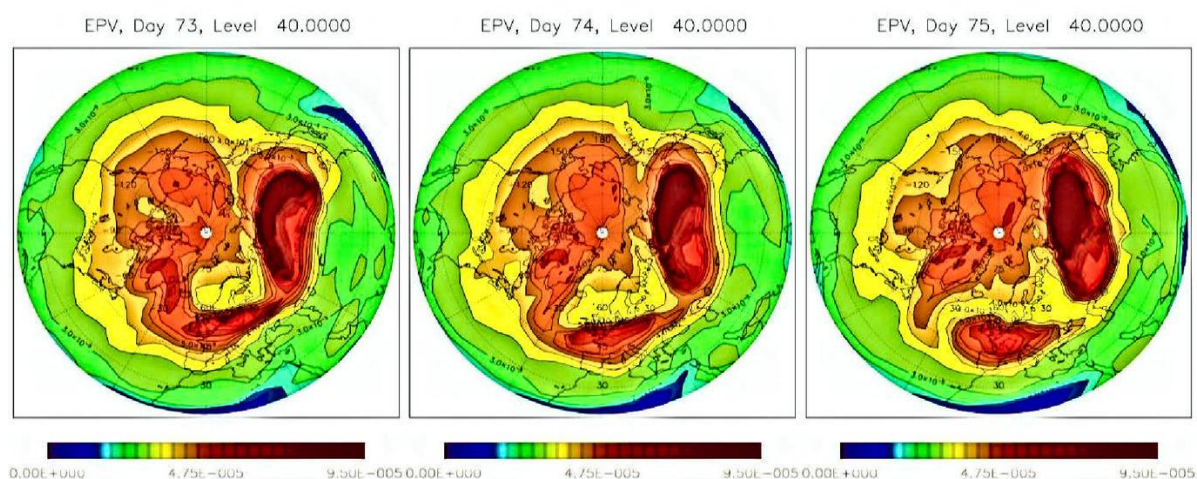


Рисунок 2.2(а) – Разделение полярного вихря 13 – 15 марта в 2016 году.

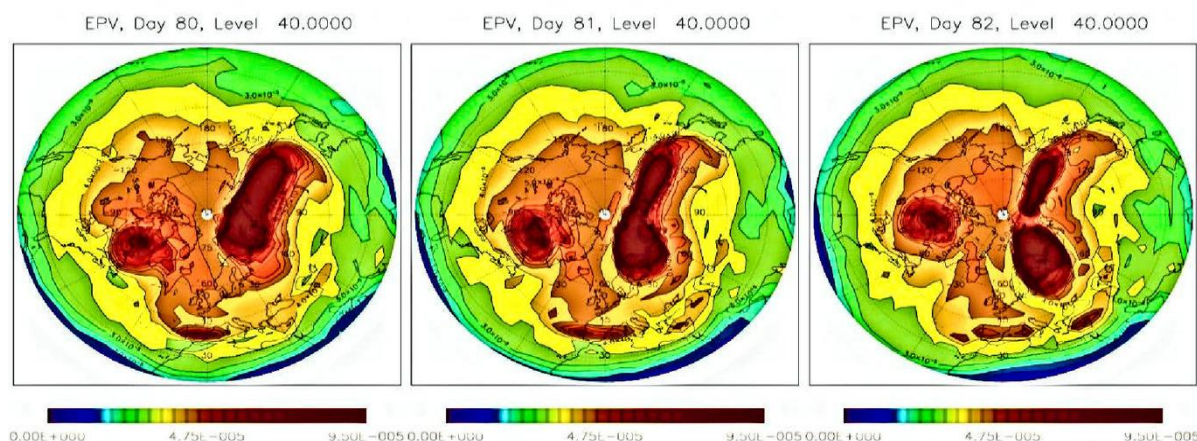


Рисунок 2.2(б) – Пять дней спустя, более крупный циклон с 20 по 22 марта 2016 года разделился еще раз. И так, на полюсе образовалась система из трех стратосферных вихрей.

Зона между холодной сухой воздушной массой полюса и теплой влажной воздушной массой ближе к умеренным широтам определяет расположение полярного фронта, как правило, полярный фронт центрирован на  $60^\circ$  широты. Полярный вихрь усиливается зимой и ослабевает летом из-за его зависимости от разности температур между экватором и полюсами. Как и в случае других циклонов, их вращение управляется эффектом Кориолиса.

Механизмом образования Арктического вихря служит поднятие воздуха в верхние слои атмосферы из низких широт и движение его к

полюсу Земли, образуя конвекционный поток. Постепенно, достигая полюса, воздух охлаждается и опускается вниз, образуя зону высокого давления, называемую полярным антициклоном. Далее воздух, зажатый между полярным антициклоном и зоной низкого давления полярного фронта, под действием силы Кориолиса отклоняется на запад, формируя восточные ветры, окружающие полюс в виде вихря. В свою очередь, потоки воздуха, идущие от полюсов и претерпевающие неодинаковость воздействия силы Кориолиса, образуют атмосферные волны Россби, принимающие участие в формировании циклонов и антициклонов. Наблюдается циркумполярный вихрь до высоты 20км летом и до 60 км зимой.

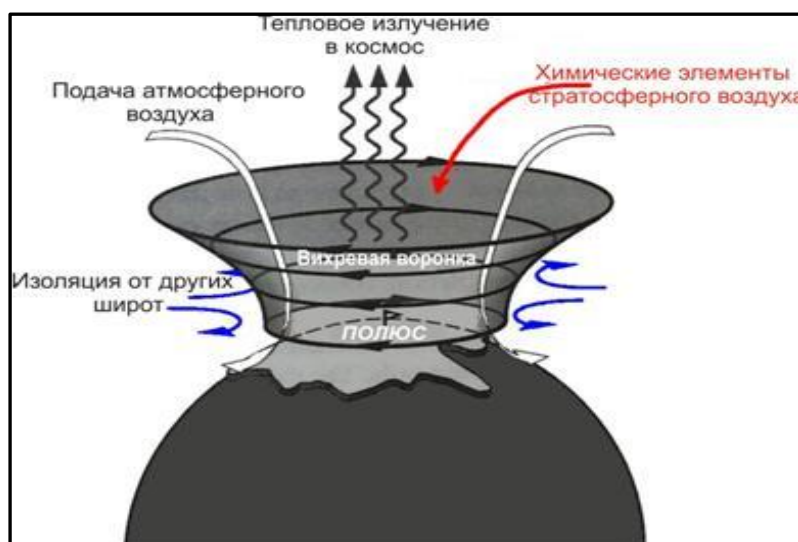


Рисунок 2.3 – Схематическое изображение структуры ЦПВ. [18]

Согласно исследованию [7], мощность, конфигурация и географическое местоположение центра циркуляции и другие характеристики ЦПВ существенно сказываются на формировании метеорологических условий в различных районах земного шара.

Методы моделирования климатической системы и долгосрочного прогнозирования неразрывно связаны с моделированием глобальных процессов атмосферной циркуляции, основным элементом которой, в

полярной стратосфере, как раз и является циклонический циркумполярный вихрь.

Полярный вихрь является доминирующей динамической особенностью стратосферного взаимодействия между северным и южным полушариями. По мере того, как циркумполярные ветры начинают усиливаться осенью, полярный вихрь и значения потенциала вихря Эртеля (EPV) возрастают на полюсе.

Горизонтально большинство полярных вихрей имеют радиус менее 1000 километров (620 миль) [12]. Поскольку полярные вихри существуют из стратосферы вниз в середину тропосферы, для определения его положения используются различные высоты / уровни давления. Поверхность давления 50 мб чаще всего используется для определения ее местоположения в стратосфере. [13] На уровне тропопаузы можно определить степень замкнутых контуров потенциальной температуры, чтобы определить ее прочность.

В данном исследовании вихрь идентифицируется как область, где значение EPV резко возрастает от средней широты к полярной области [14]. Эта область характеризуется сильными ветрами и является изоляционным барьером для перемещения частиц аэрозоля. Например, для изучения потерь стратосферного озона над полярной областью, измеренные профили озона должны классифицироваться в соответствии с их положением относительно границы полярной ячейки.

В качестве характеристики ЦПВ в работе используется величина потенциальной завихренности Эртеля, математически представляющая собой произведение абсолютного вихря на изэнтропической (уровень равных потенциальных температур) поверхности на выражение, определяющее устойчивость атмосферы [15]:

$$PV = (f + \zeta\theta) \cdot (-g\partial\theta / \partial p) \quad (1)$$

где  $f$  – параметр Кориолиса;  $\zeta_\theta$  – относительный вихрь скорости на изэнтропической поверхности;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\theta$  – потенциальная температура;  $p$  – давление.

Относительный вихрь скорости, в свою очередь, определяется по формуле:

$$\zeta_\theta = \partial v_\theta / \partial x - \partial u_\theta / \partial y \quad (2)$$

где  $u_\theta$ ,  $v_\theta$  – составляющие скорости вдоль осей  $X$ ,  $Y$  на изэнтропической поверхности.

В период полярной зимы величина EPV имеет свойство увеличиваться с высотой. Исследование показало, что, чем выше, тем сильнее разрастается вихрь, покрывая не только полярный круг.

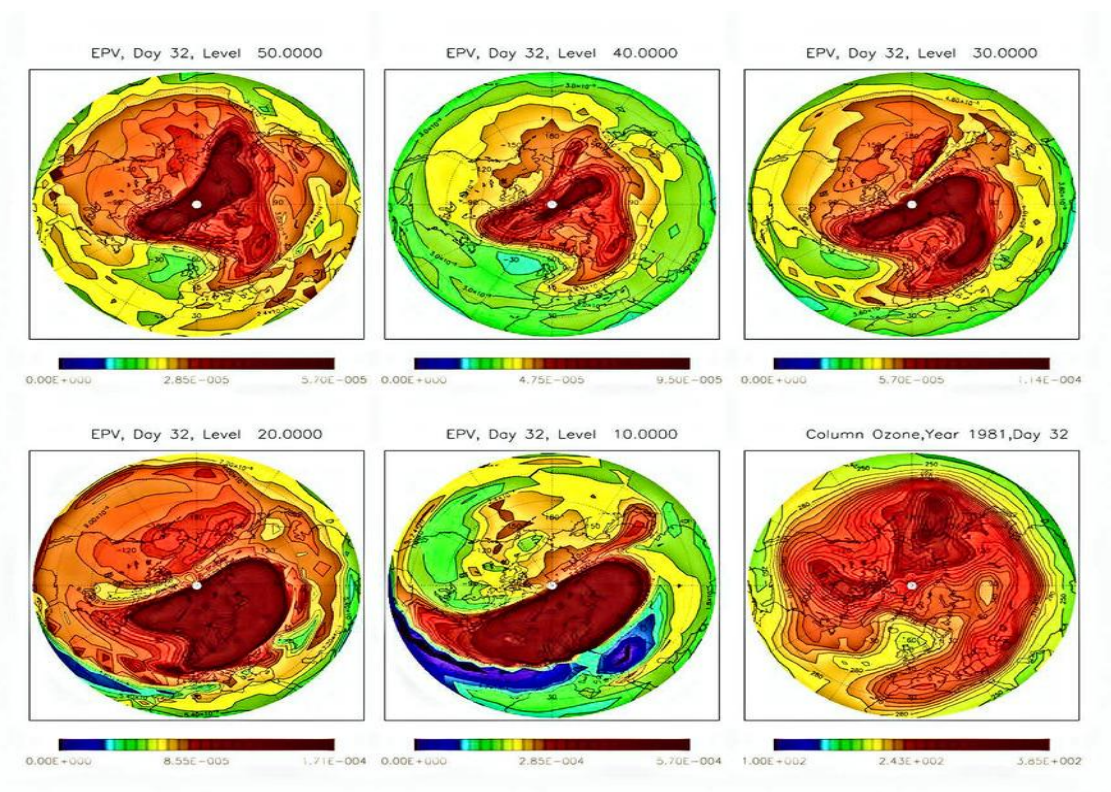


Рисунок 2.4 – Распределение значений потенциальной завихренности Эртеля EPV [ $K \times m^2 \times kg^{-1} \times s^{-1}$ ] и уровень ОСО [е.Д.] на уровнях с 50 до 10 гПа включительно, за 1 февраля 2016 года.

## 2.1. Влияние внезапных стратосферных потеплений на полярный вихрь.

Полярный вихрь управляется радиационным охлаждением из-за полярной ночи. Однако планетарные волны часто возмущают вихрь как по положению, так и по силе. При достаточно сильном планетарном волновом принуждении эти возмущения могут расти достаточно, чтобы уничтожить полярный вихрь как хорошо организованный объект [16]. Эти резкие переходы обычно связаны с изменением зонального среднего течения и сильным потеплением полярной стратосферы. Планетарная волновая активность намного сильнее в Северном полушарии по сравнению с Южным полушарием, главным образом из-за различий в топографии и контрасте между сушей и морем между полушариями, поэтому SSW гораздо чаще наблюдаются в Северном полушарии.

Как правило, ВСП считаются вызванными планетарным волновым потоком, в частности, взаимодействием зонального среднего потока с зональными волновыми числами 1-3. Мелкомасштабная изменчивость (например, из-за разломов гравитационных волн), хотя она известна повсеместно в зимней стратосфере, обычно не считается достаточной для возникновения SSW. Стратосферное потепление полярного вихря приводит к его ослаблению [17]. Когда вихрь сильный, он удерживает холодные воздушные массы высокого давления, содержащиеся в Арктике; когда вихрь ослабевает, воздушные массы движутся на экваториальном уровне и приводят к быстрым изменениям погоды в средних широтах.

ВСП имеет следующие стадии:

– Major. Это происходит, когда западные ветры на 60N и 10hPa (высота геопотенциала) меняют направление, то есть становятся восточными. Наблюдается полное нарушение полярного вихря, и вихрь либо будет разбит на дочерние вихри, либо смещен из его нормального положения над полюсом.

- Minor. Малые потепления похожи на крупные потепления, но они менее выражены, западные ветры замедляются, однако не меняют направления. Поэтому разрушение вихря никогда не наблюдается.
- Final. На этом переходе происходит окончательное потепление, так что полярные вихревые ветры меняют направление потепления, однако они не изменяются до следующей зимы. Это связано с тем, что стратосфера вошла в летнюю восточную фазу. Это окончательное зимнее потепление, потому что летом не может произойти другое потепление.

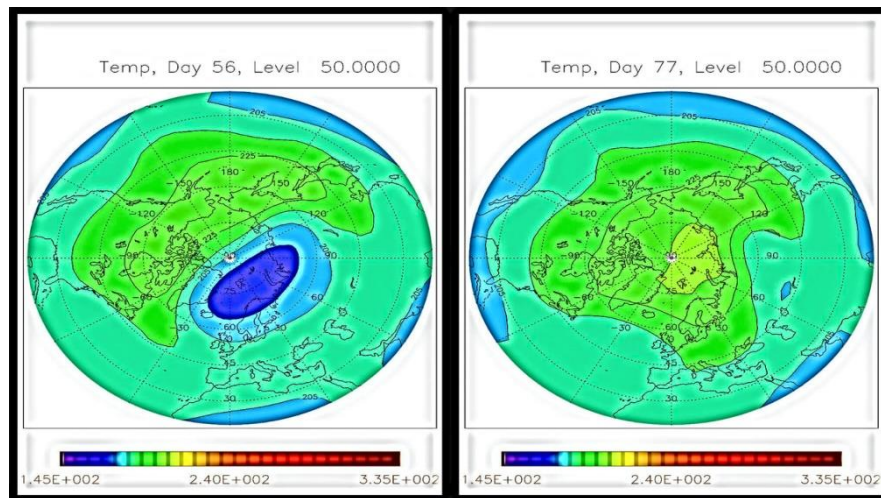


Рисунок 2.5 – Значения температуры  $T[K]$  во время финальной стадии ВСП.

### 3. Анализ результатов.

В ходе исследования с помощью программы IDL6.2 и данных ретроспективного анализа MERRA, были построены профили потенциальной завихренности, температуры и озона на уровне 50гПа изобарической поверхности за период с 1980 года по 2016. Уровень 50гПа выбран из соображений, что ему соответствуют наиболее низкие стратосферные температуры, ввиду близкого нахождения к тропопаузе. За климатологический период с 1980 г по 2016 выбраны следующие периоды:

- 1980-1981. Интервал выбран из соображений относительного слабого воздействия антропогенных источников (ХФУ) на разрушение трикислорода в атмосфере;
- 1996-1997. “Расцвет ” индустриализации, и как следствие повышение антропогенных выбросов;
- 2010-2011. Первое время после подписания Монреальского протокола. Возможное уменьшение содержания ХФУ в атмосфере;
- 2015-2016. Некоторое время после подписания Монреальского протокола, для оценки тенденции в изменении температурного поля и озоносодержания.

Устойчивость ЦПВ анализируется с момента повышения градиента EPV. Вихрь устойчив, когда существует продолжительное время. Началу возрастания градиента EPV предшествует понижение температуры на полюсе. Период интенсивности вихря разбивался на равные промежутки, и анализировался отдельно, соотнося поле температуры, EPV и ОЗ. За один и тот же период. На рисунке 3.1(а, б, в) представлен пример изменения градиентов исследуемых величин на уровне 50 гПа.

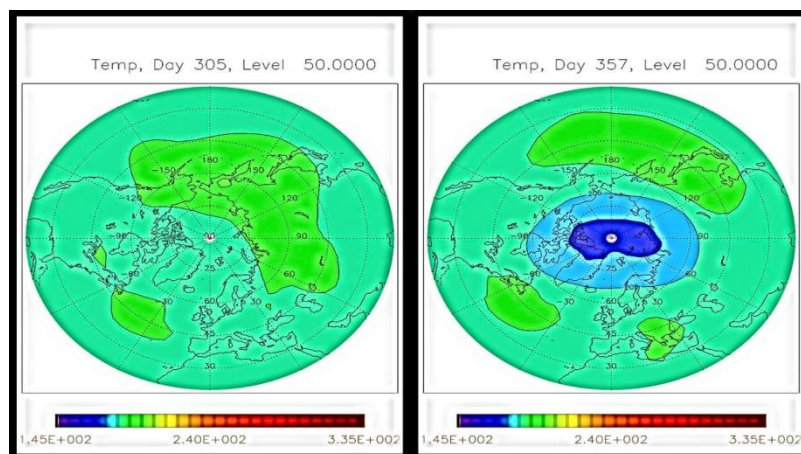


Рисунок 3.1а – Значения температуры  $T$  [K] на уровне 50гПа, за 52 дня.

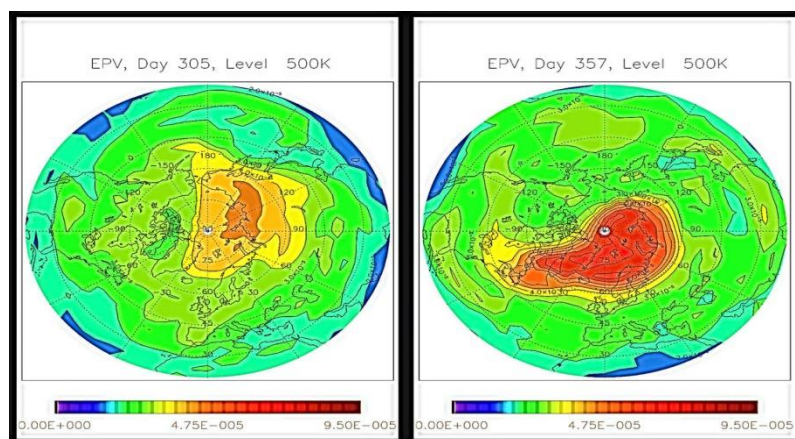


Рисунок 3.1б – Значения градиента завихренности EPV [ $K \times m^2 \times kg^{-1} \times s^{-1}$ ], означающее формирование стратосферного вихря.

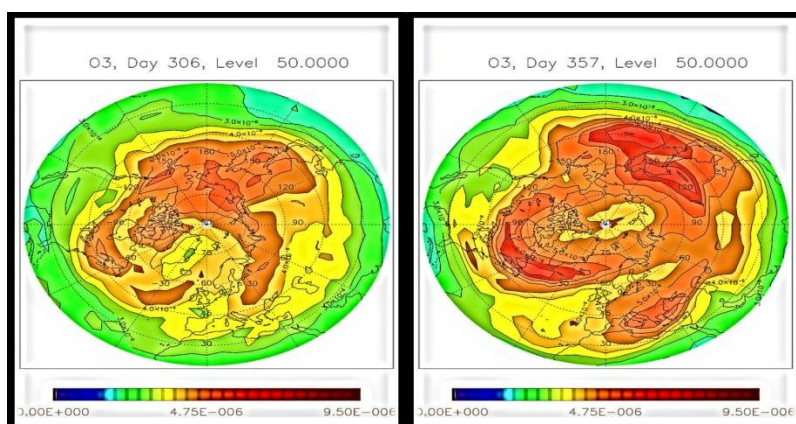


Рисунок 3.1в – Значения  $O_3$  [PPMv] в момент повышения градиента EPV [ $K \times m^2 \times kg^{-1} \times s^{-1}$ ].

Каждый период будет разделяться на два интервала - 1. Период холода и соответствующие ему значения потенциала вихря. 2. Период

существования циркумполярного вихря, соотнесенный с температурой и озонном.

### 3.1. 1980-1981г.

Промежуток с начала похолодания 05.11.80 до стратосферного потепления 12.03.81 (126 дней)

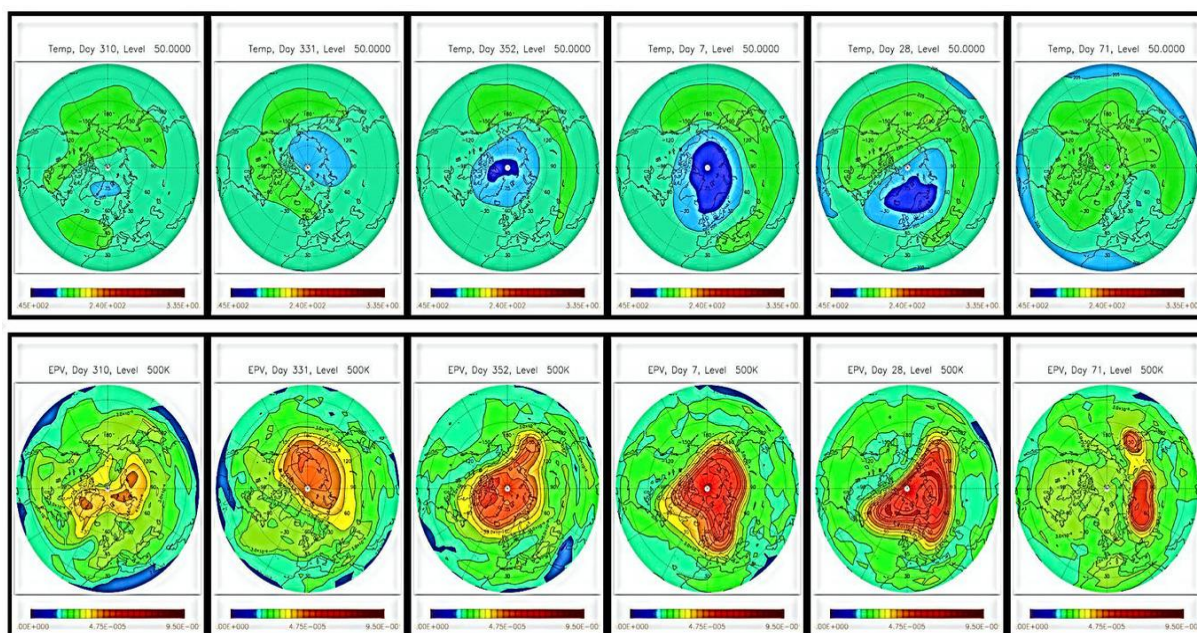


Рисунок 3.2 – Распределение температуры  $T[\text{K}]$  на изобарической поверхности 50 гПа и потенциальной завихренности Эртеля  $\text{EPV} [\text{K} \times \text{m}^2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{s}^{-1}]$  на изэнтропической поверхности 500K с 05.11.80 по 12.03.81.

Анализируя рисунок 3.2 можно сделать вывод о соответствии наиболее низким температурам – наибольшего градиента потенциала. Восемнадцатому марту соответствует финальная стадия стратосферного потепления. Явлению ВСП соответствует разделение ЦПВ. Циркумполярный вихрь существовал достаточно длительный период – 126 дней. В дальнейшем озоновая аномалия будет определяться

устойчивостью вихря, однако, за период с 1980 по 1981, хоть вихрь и был устойчив достаточно долго, аномалия практически отсутствовала, вследствие чего, можно заключить, что изменению в полях озона присущ не только динамический, но химический фактор – рисунок 3.3.

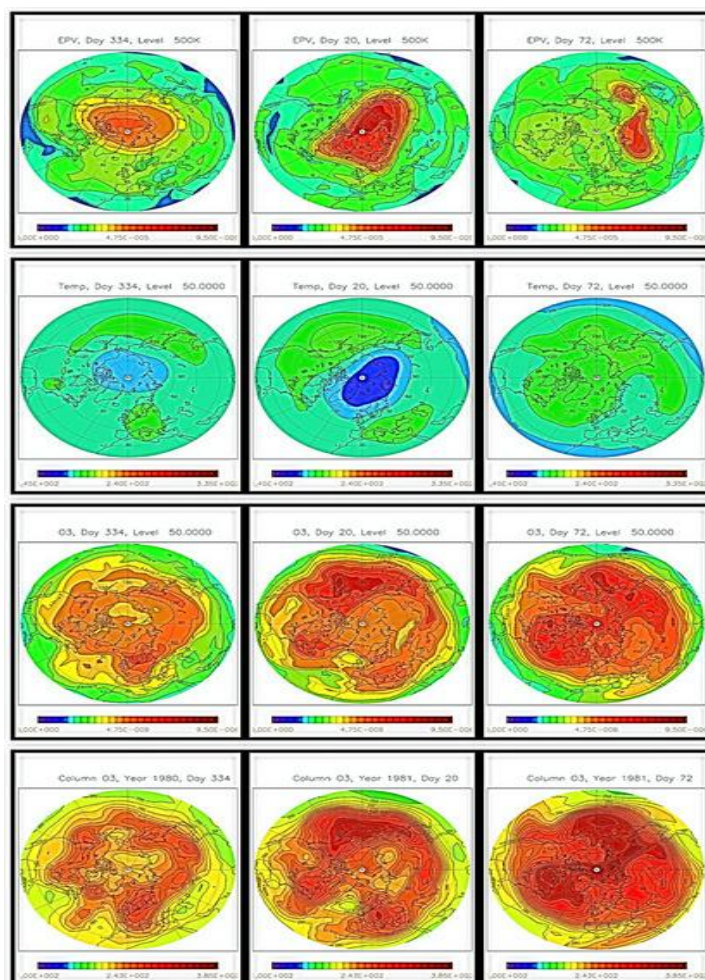


Рисунок 3.3 – Значения потенциальной завихренности Эртеля EPV  $[K \times m^2 \times kg^{-1} \times s^{-1}]$  на изэнтропической поверхности 500K, температуры T[K] и озона [PPVm] на уровне изобарической поверхности 50 гПа, а так же общее содержание озона [е.Д.] в период с 30.11.80 по 13.03.81.

В целом можно сделать вывод о слабом воздействии потенциала вихря на озоносодержание в 1980-1981 годах. Промежуткам времени с

наиболее низкими температурами соответствует наибольший градиент EPV. Середине ВСП с 12 марта соответствует разделение вихря.

### 3.2. 1996-1997.

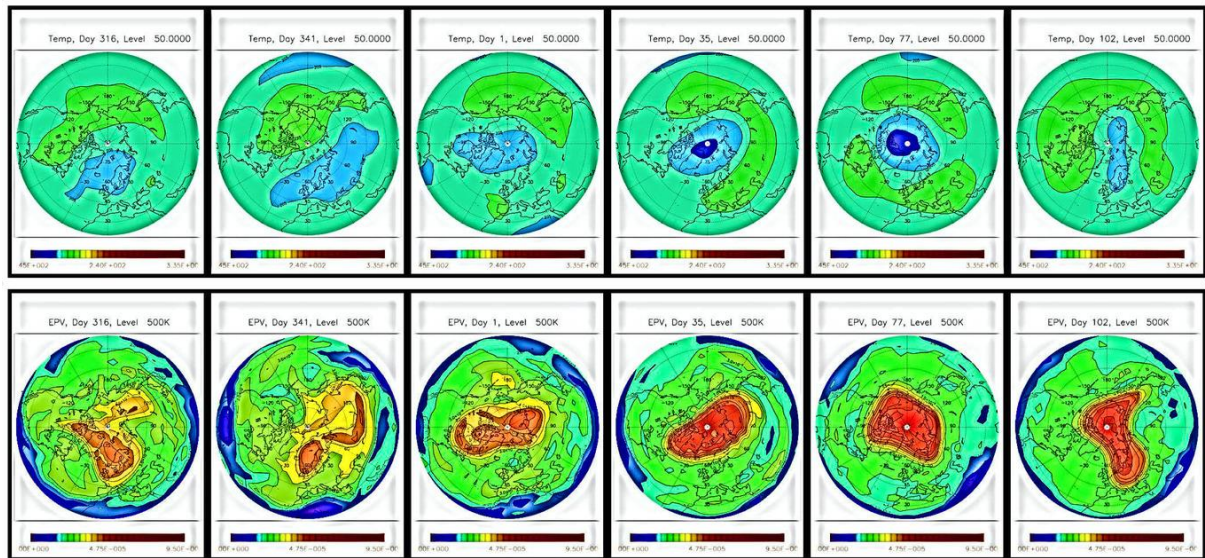


Рисунок 3.4 – Распределение температуры  $T[K]$  на изобарической поверхности 50 гПа и потенциальной завихренности Эртеля EPV [ $K \times m^2 \times kg^{-1} \times s^{-1}$ ] на изэнтропической поверхности 500K с 11.11.96 до 12.03.97.

Исходя из представленных на рисунке 3.4 распределений температур - похолодание продолжалось с 11.11.96 до 12.03.97 (152 дня). Так же как и в 1980-81 году, можно сделать вывод об отставании по времени завихренности от температуры.

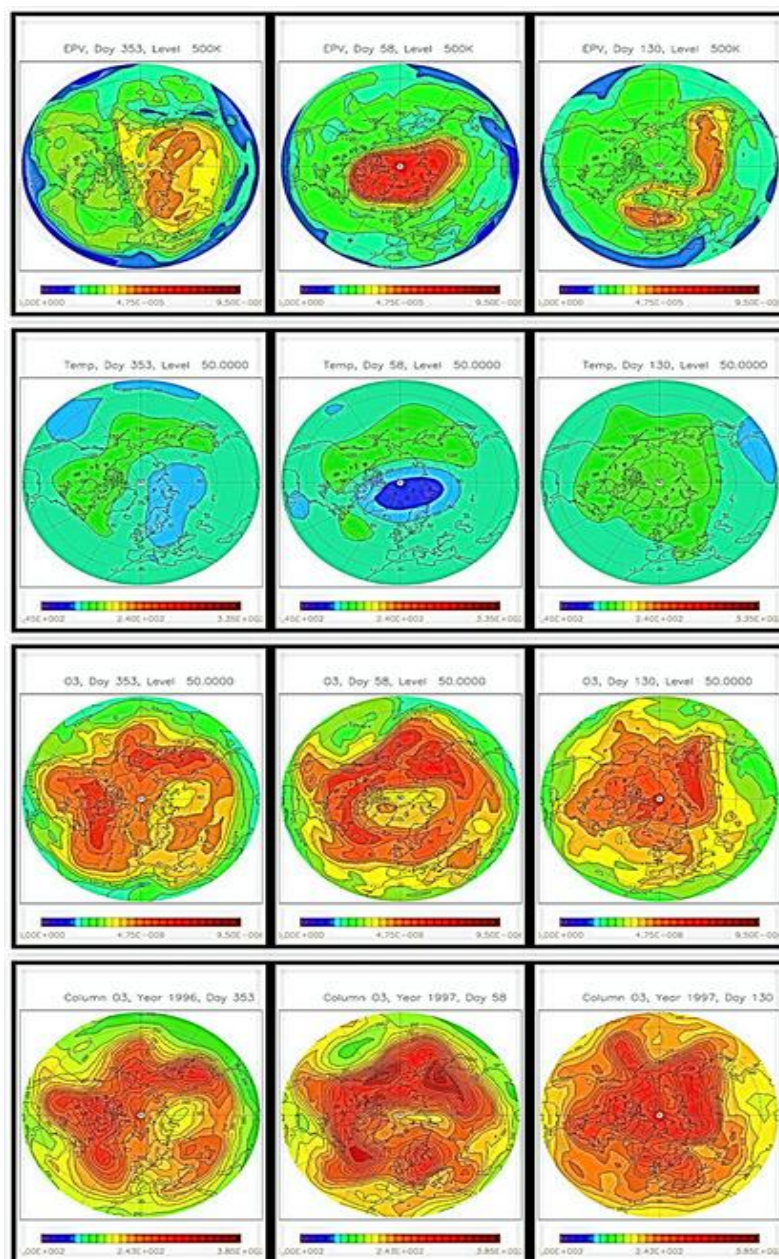


Рисунок 3.5 – Значения потенциальной завихренности Эртеля EPV  $[K \times m^2 \times kg^{-1} \times s^{-1}]$  на изэнтропической поверхности 500K, температуры T[K] и озона [PPVm] на уровне изобарической поверхности 50 гПа, а так же общее содержание озона [е.Д.] в период с 13.12.96 по 11.05.97.

ЦПВ был устойчив 13.12.96 по 11.05.97 (148 дней). Такой период существования считается весьма аномальным. Наиболее интенсивной фазе ЦПВ соответствует, так же, наибольшее вымывание озона, в области, центрированной краевой линией вихря, в этот период можно говорить о

динамической причине падения градиента ОЗ. Дате 11 мая, соответствует финальная стадия ВСП и разделение полярной ячейки.

### 3.3. 2010-2011.

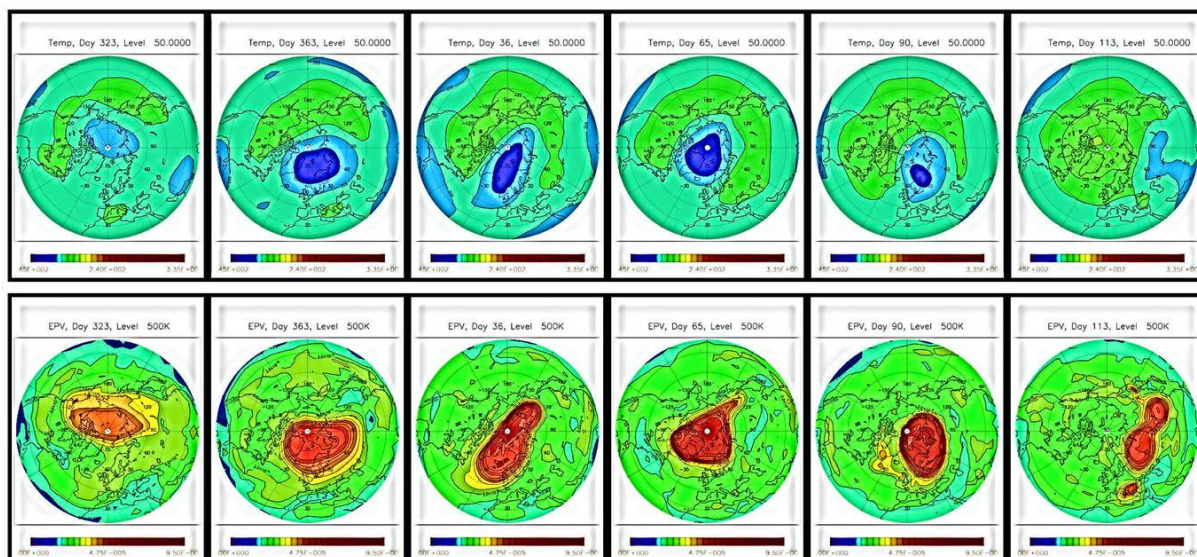


Рисунок 3.6 – Распределение температуры  $T[K]$  на изобарической поверхности 50 гПа и потенциальной завихренности Эртеля EPV [ $K \times m^2 \times kg^{-1} \times s^{-1}$ ] на изэнтропической поверхности 500K с 19.11.10 по 23.04.11

Период холода составил 145 дней с 19.11.10 по 23.04.11. Взрывному стратосферному потеплению соответствует разделение вихря на три 23.04.11. Во время второй половины существования полярного вихря, наблюдается сильная озоновая аномалия на 50 гПа, рисунок 3.7.

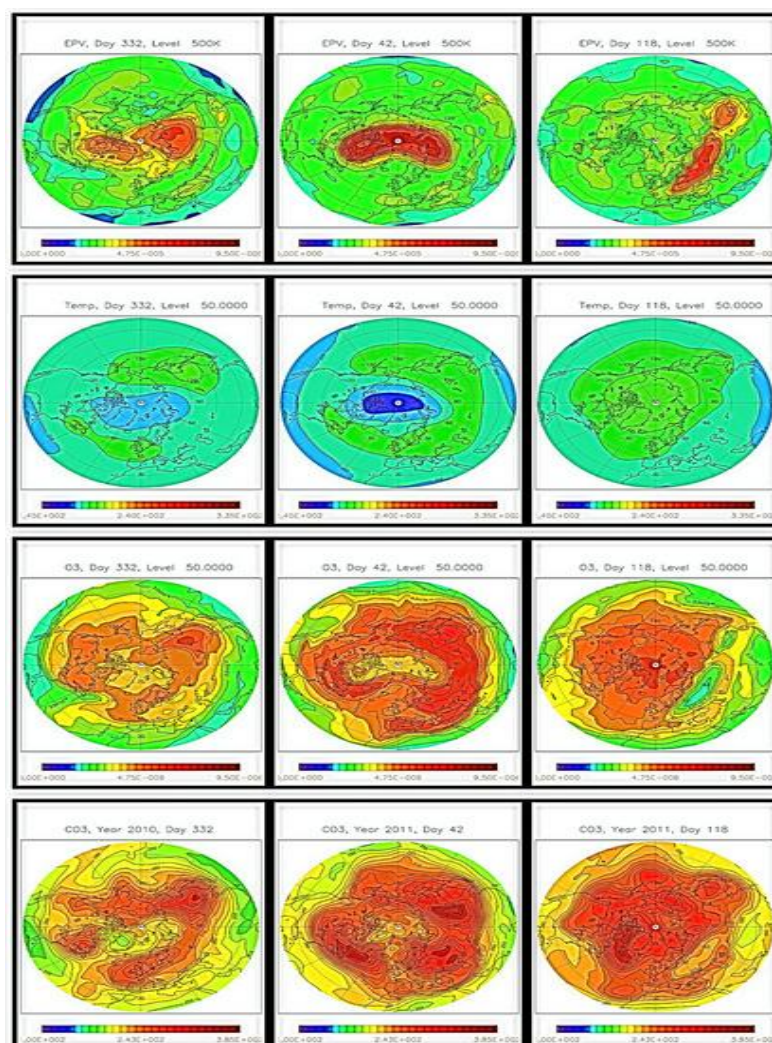


Рисунок 3.7 – Значения потенциальной завихренности Эртеля EPV [ $\text{K} \times \text{m}^2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{s}^{-1}$ ] на изэнтропической поверхности 500К, температуры T[K] и озона [PPVm] на уровне изобарической поверхности 50 гПа, а так же общее содержание озона [е.Д.] в период с 38.11.10 по 28.04.11.

Период существования вихря составил 151 день. В данный период наиболее ярко выражена зависимость центра циркуляции с центром холода. Так же, как и в зимне-весенний период 1996-1997 года, озоновая аномалия приходится на середину марта. Дате финальной стадии ВСП (28.04.11) соответствует разделение вихря.

### 3.4. 2015-2016

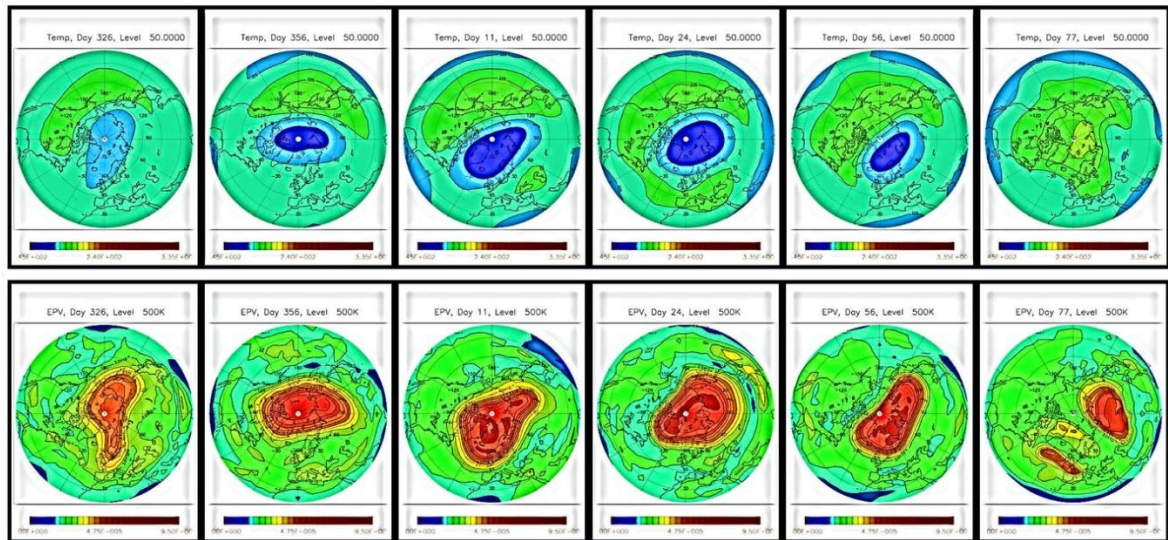


Рисунок 3.8 – Распределение температуры  $T[K]$  на изобарической поверхности 50 гПа и потенциальной завихренности Эртеля  $EPV [K \times m^2 \times kg^{-1} \times s^{-1}]$  на изэнтропической поверхности 500K с 22.11.15 по 17.03.16.

Период холода составил 116 дней. Сильному ВСП, во время финальной стадии соответствует разделение ЦПВ 17.03.16. Стоит отметить, что в данный исследуемый период потепление произошло несколько раньше чем в предыдущие года и было наиболее мощным.

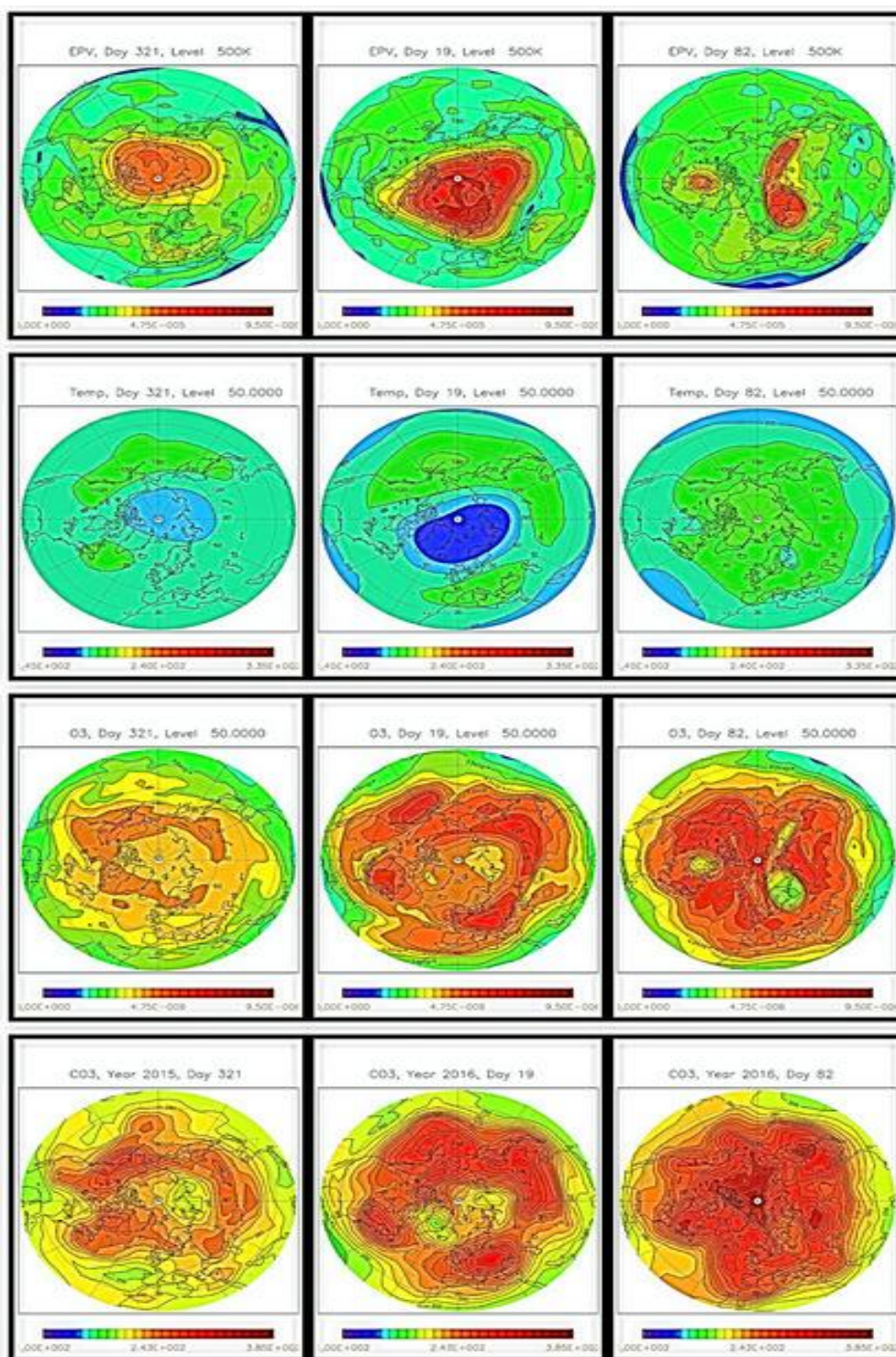


Рисунок 3.9 – Значения потенциальной завихренности Эртеля EPV  $[K \times m^2 \times kg^{-1} \times s^{-1}]$  на изэнтропической поверхности 500К, температуры T[K] и озона [PPVm] на уровне изобарической поверхности 50 гПа, а так же общее содержание озона [е.Д.] в период с 16.11.15 по 22.03.16.

Период существования вихря составил 126 дней. Двадцать второму марта соответствует финальная стадия явления ВСП, во время которого вихрь разделился на три. Следует отметить, что в сравнении с остальными исследуемыми периодами, в зимне-весенний период 2015-2016 раньше всех сформировался устойчивый ЦПВ и этому же периоду соответствует раннее, но самое мощное ВСП.

## Заключение

На основе данных ре-анализа MERRA, были построены профили EPV на изэнтропической поверхности 500К, температуры и озона на уровне 50 гПа, а так же значения общего содержания озона.

Идентифицируя край циркумполярного вихря, была установлена связь его интенсивности с общим температурным режимом полярной стратосферы, что, чем более холодная стратосфера, тем более устойчивый наблюдается вихрь. Следовательно, можно подтвердить гипотезу о предшествующем похолодании.

На основе анализа влияния потенциала вихря на озоносодержание на уровне 50 гПа, было сделано заключение о его динамическом влиянии на распределение озона. О том, что край вихря является изолирующим барьером для перемещения внутрь него тепла и частиц аэрозоля, а так же, что вихрь создает условия для вымывания озона за его край, о чем свидетельствуют приведенные данные анализа в главе 3.

Сопоставление результатов измерений стратосферной температуры с потенциальной завихренностью Эртеля показало, что внезапные стратосферные потепления способствуют разрушению циркумполярного вихря и препятствуют активации хлор-бромных галогенов на полярных стратосферных облаках, ведущей к разрушению озона после того как за полярный круг возвращается Солнце.

Межгодовая изменчивость территории охватываемой озоновой аномалией, и продолжительности ее существования, в данной работе определяется величиной наименьшего градиента O<sub>3</sub> [PPMv]. Периодам, когда вихрь был слаб, соответствует слабая озоновая аномалия или ее отсутствие.

### Список используемой литературы:

1. Шипко Ю. В. Шувакин Е. В. Моделирование циркумполярного вихря северного полушария для анализа крупномасштабных атмосферных процессов [Электронный ресурс] // Вестник Воронежского института ФСИИ России, 2014. №4, с 59-65. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22939398>
2. Стратосферный озон: вид с космической орбиты, [Электронный ресурс]/ В.Б. Кашкин, Т.В. Рублева, Р.Г.Хлебопрос// Сибирский федеральный Университет, 2015. 182 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26073949>
3. Акимов Л.М., Оценка временной изменчивости температуры воздуха над Европейской территорией и некоторые аспекты ее долгосрочного прогнозирования, [Электронный ресурс]/ Л.М. Акимов// ВВБАИУ, Диссертация, 2006, 218 с. URL: <http://www.dslib.net/meteorologia/ocenka-vremennoj-izmenchivosti-temperatury-vozduha-nad-evropejskoj-territoriej-i.html>
4. Stratosphere/ [Электронный ресурс], URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stratosphere>
5. Аэрозоль и климат/ [текст]// Ленинград, Гидрометеиздат, 1991, 540 с.
6. Кондратьев К.Я. Атмосферный аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. Свойства аэрозоля различных типов [текст]/ Оптика атмосферы и океана. 2004. Т.17, №1. С. 5-24.
7. Кац А.Л. Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы, [текст]/ А.Л.Кац// Л.: Гидрометеиздат, 1960. — 270 с.
8. Влияние динамических факторов на озоновые аномалии в Арктике, [Электронный ресурс]/ С.П. Смышляев, А.И. Погорельцев, Е.А. Дробашевская, А.Ю. Канухина, // Метеорология , ученые записки №41, с. 136-148. URL: <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue41/uz41-136-148.pdf>

9. Особенности стратосферы [Электронный ресурс]/ URL: <http://biofile.ru/geo/3265.html>
10. Глобальная карта ветров [Электронный ресурс]/ URL: [earth.nullschool.net](http://earth.nullschool.net)
11. Построение модели циркумполярного вихря Северного полушария в терминах механики [Электронный ресурс]/ Ю.В. Шипко, Е.В. Шувакин, М.А. Шуваев// ООО “Вэлборн”, 2017 г., с 91-97. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28952236>
12. Cavallo S. M. and Hakim G. J. Potential vorticity diagnosis of a tropopause polar cyclone [Электронный ресурс]/ Monthly Weather Review, 2009, vol. 137, pp: 1358-1371. URL: <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2008MWR2670.1>
13. Kolstad, Erik W., Tarjei Breiteig, The association between stratospheric weak polar vortex events and cold air outbreaks in the Northern Hemisphere [Электронный ресурс]/ Q. J. R. Meteorol. Soc. 136: 886–893, April 2010. URL: [https://www.academia.edu/223963/The\\_association\\_between\\_stratospheric\\_weak\\_polar\\_vortex\\_events\\_and\\_cold\\_air\\_outbreaks\\_in\\_the\\_Northern\\_hemisphere](https://www.academia.edu/223963/The_association_between_stratospheric_weak_polar_vortex_events_and_cold_air_outbreaks_in_the_Northern_hemisphere)
14. Michio Hirota, Kazuhiko Nagata, Report on the method for determining the location of the polar vortex boundary region, [Text]/ Polar Meteorol. Glaciol., 17, 116-122, 2003.
15. Юсупов Ю. И. Метод прогноза шквалов с использованием термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля [Электронный ресурс]/ Ю. И. Юсупов // МЕТЕОРОЛОГИЯ И ГИДРОЛОГИЯ. 2013. № 11. С 55-63. URL: [https://mapmakers.ru/docs/publication/squalls\\_forecast.pdf](https://mapmakers.ru/docs/publication/squalls_forecast.pdf)
16. Thomas Birner, Paul D. Williams, Sudden Stratospheric Warmings as Noise-Induced Transitions [Text] // American Meteorological Society., 2008. P. 3337-3343

17. Sudden stratospheric warming [Электронный ресурс]/ URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sudden\\_stratospheric\\_warming](https://en.wikipedia.org/wiki/Sudden_stratospheric_warming)
18. Полярные вихри [Электронный ресурс]/ URL: [http://divinecosmos.e-puzzle.ru/page.php?al=287\\_542](http://divinecosmos.e-puzzle.ru/page.php?al=287_542)
19. Перламутровые облака [Электронный ресурс]/ URL: <http://curious-world.ru/index.php/priroda/prirodnye-yavleniya/item/276-perlamutrovye-oblaka>
20. Сервис для создания GIF-анимации [Электронный ресурс]/ URL: <https://ezgif.com/effects>
21. Сервис для склеивания изображений [Электронный ресурс]/ URL: <https://www.imgonline.com.ua/photo-collage.php>