



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Особенности возникновения озоновых дыр над РФ в зимний период»

Исполнитель Родыгина Олеся Денисовна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)
Ермакова Татьяна Сергеевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 09 » июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

Содержание	2
Введение	3
Глава 1. Общие сведения об озоне	5
1.1 Основные характеристики озона	5
1.2 Озон в стратосфере.....	8
1.3 Полярный стратосферный вихрь	9
1.4. Внезапное стратосферное потепление	10
1.5 Планетарные волны.....	11
1.6 Полярные стратосферные облака	13
1.7 Тренд содержания озона в стратосфере	15
Глава 2. Используемые данные	18
2.1 Глобальный реанализ MERRA-2	18
2.2 Измерения The Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) со спутника Aqua.....	19
2.3 Квазидвухлетнее колебание (КДК). Данные зондирования	20
2.4 Эль-Ниньо-Южное колебание (ЭНЮК). Индекс MEI V2.....	22
Глава 3. Полученные результаты и их анализ	25
Заключение	53
Список литературы	55
Приложение	59

Введение

Содержание озона в современной атмосфере составляет не более одной трехмиллионной доли от общего количества других газов, но его роль чрезвычайно важна: он задерживает жесткое ультрафиолетовое излучение (коротковолновая часть солнечного спектра), которое разрушает белки и нуклеиновые кислоты. Следовательно, до появления фотосинтеза – а, значит, свободного кислорода и озонового слоя в атмосфере – жизнь могла существовать только в воде. [1]

На разрушение озона, как выяснилось во второй половине прошлого века, влияют как вещества, попадающие в атмосферу в результате природных катаклизмов, так и вещества промышленного происхождения. Человечество было сильно обеспокоено данной темой. В настоящее время также продолжают проводить исследования для нахождения причин и решений данной проблемы.

Изучение этого газа, и соответственно озонового слоя, является важной и актуальной темой в настоящее время и связано с такими проблемами, как:

1. Истощение озонового слоя, что приводит к увеличению потока ультрафиолетового излучения к поверхности Земли.
2. Изменение климата. Проводимые в настоящее время исследования устанавливают связь между истощением стратосферного озона и изменением климата.

Таким образом, исследование причин возникновения озонового слоя необходимо и важно в настоящее время. Это позволит понять и максимально предотвратить последствия его разрушения.

Целью работы является изучение особенностей возникновения озоновых дыр над территорией Российской Федерации в зимний период.

Структура работы: выпускная квалификационная работа включает в себя введение, три главы, подразделенные на подглавы, заключение, список использованной литературы и приложение.

В первой главе описываются механизмы образования озона в верхнем слое атмосферы и его основные характеристики. Причины истощения озонового слоя и процессы образования озоновых дыр в стратосфере.

Во второй главе рассматриваются используемые данные.

В третьей главе представлены результаты исследования и их анализ.

В заключении дипломной работы сделаны основные выводы по результатам исследования.

Глава 1. Общие сведения об озоне

1.1 Основные характеристики озона

Озон – это сравнительно редкая форма молекулярного кислорода, состоящая из трех атомов (O_3).

В 1930 году Чепмен предположил, что ультрафиолетовое излучение отвечает за образование озона, и заложил основы стратосферной фотохимии: реакции Чепмена. Он предположил, что атомарный кислород образуется в результате расщепления (диссоциации) O_2 под воздействием высокоэнергетических ультрафиолетовых фотонов ($\lambda < 242$ нм):



где h -постоянная Планка, c -скорость света, λ -длина волны.

А так как атомы кислорода обладают высокой реакционной способностью и быстро вступают в реакцию с молекулами кислорода, то образуется озон:



где M -любая другая молекула, необходимая для энергетического баланса реакции.

В стратосфере время жизни атома кислорода очень короткое, поэтому после диссоциации они практически сразу образуют озон.

Озоновый слой сильно поглощает УФ-излучение. И под действием этих УФ-фотонов происходит реакция распада озона:



Поскольку атомы O имеют короткий срок жизни, они быстро восстанавливают озоновый слой после диссоциации, преобразуя энергию фотонов ($\lambda = 250$ нм) в тепловую энергию (эта энергия передается атому M в уравнении (2)).

Цикл Чепмена для производства озона путём фотолиза кислорода под воздействием солнечного УФ-излучения должен был бы производить в атмосфере гораздо большее количество озона, чем наблюдается на самом деле. Следовательно, Чепмен также предположил, что озон разрушается в результате реакции со свободными атомами кислорода. Это разрушение озона уравнивает его производство. Основная реакция разрушения:



Эта реакция должна протекать относительно медленно в большей части нашей атмосферы, поскольку концентрация озона в общей доле атмосферы довольно мала. [2]

Атмосферный озон – это сферический слой, толщина которого около 90 км над поверхностью Земли, причем озон в нем распределен неравномерно. Большая часть этого газа сосредоточена на высоте 26-27 км в тропиках, на высоте 20-21 км в средних широтах и на высоте 15-17 км в полярных регионах. (Рис. 1). [1]

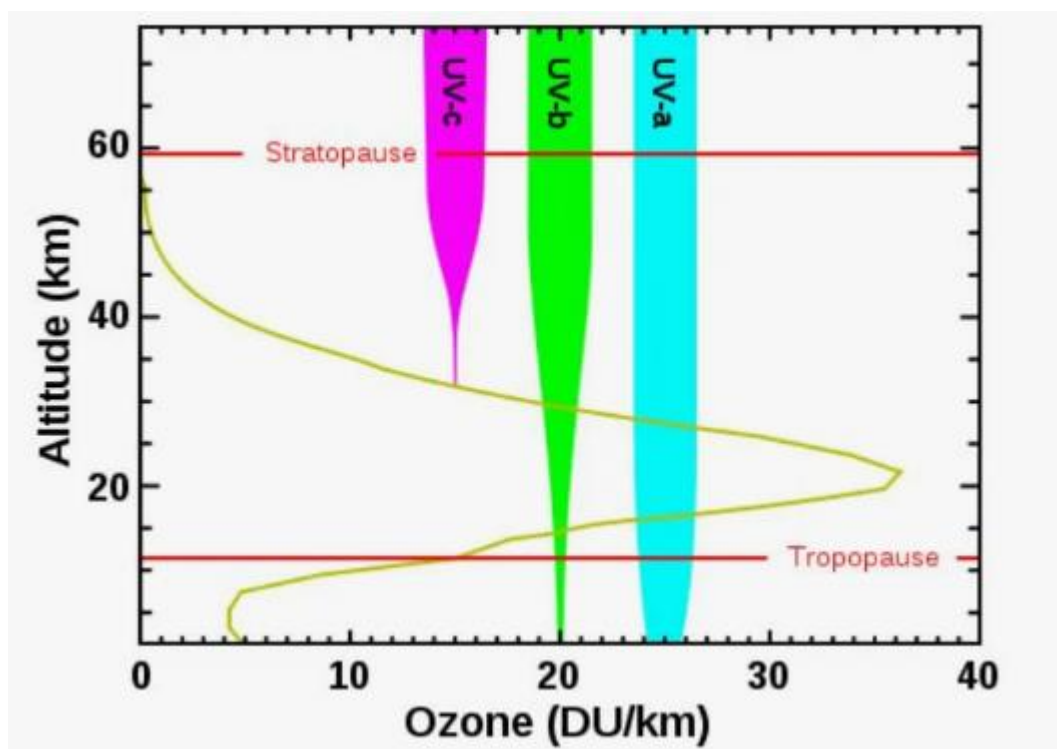


Рисунок 1. Профиль концентрации озона в атмосфере.

С химической точки зрения озон очень активен, он легко вступает в реакцию со многими другими веществами. Вблизи поверхности Земли эти реакции приводят повреждению растений и тканей легких людей. Но озон также поглощает вредные компоненты солнечного света, известные как «ультрафиолет В» или «UV-B». [3]

Общее содержание озона (ОСО), т. е. количество озона в атмосферном столбе в конкретной точке, измеряется по поглощению и излучению солнечной радиации. В качестве единицы измерения используется так называемая единица Добсона (е. Д.), соответствующая толщине слоя чистого озона при нормальном давлении (760 мм рт. ст.) и температуре 0 °С. Сто единиц Добсона соответствуют толщине озонового слоя в 1 мм. [1]

Если взять весь озон из воздушного столба, простирающегося от поверхности Земли до космоса, и привести его к стандартной температуре и давлению, то толщина этого столба составит всего около 3 мм, то есть 300 е. Д. [3]

Зона поглощения озона, определяющая нагрев стратосферы, называется полосой Хартли (250–320 нм). Способность озона поглощать ультрафиолетовое излучение (коэффициент поглощения) в области полосы Хартли сравнима с поглотительной способностью металлов. [4]

Запах озона можно почувствовать во время грозы. В это время облака достигают большого объёма и простираются до 20 км и выше. На этой высоте они подвергаются жёсткой УФ бомбардировке и становятся электролитом – раствором с ионизированными молекулами газов и воды. Из-за разницы высотных температур в облаке, по всему его объёму, образуются мощные конвекционные потоки, перемешивающие эти заряженные частицы. Они, в свою очередь, группируются по знаку зарядов и, тем самым, создают поля напряжённости, которые, время от времени, разряжаются фотонными потоками молний, разваливающими кислород на атомы, окисляющими азот и образующими тот, приятный нам, но недолговечный грозовой озон. [5]

1.2 Озон в стратосфере

Стратосферой – это область с положительным градиентом температуры, расположена она между тропосферой и мезосферой и простирается на высотах от 8 до 15 км и до 50 км. Повышение температуры с высотой обусловлено присутствием озона в данном регионе. Стратосфера нагревается за счет солнечной энергии, поглощаемой в результате реакции, называемой реакцией Чепмена. Температура каждого слоя зависит от количества тепла и их плотности.

Что касается абсолютной концентрации, то вертикальное распределение озона в атмосфере достигает своего максимума примерно на высоте 25 км, на высоте, где соотношение производства и разрушения является максимальным. Концентрация в атмосфере не превышает 10% от общей концентрации в столбе, и, кроме того, ее вариабельность невелика. Именно по этой причине для анализа озоновой зоны в стратосфере используется общий озоновый столб. Начиная с максимальной абсолютной концентрации, выработка увеличивается с увеличением высоты, поскольку концентрация доступного атомарного кислорода выше, но фотохимическое разрушение происходит также и быстрее. Ниже максимального значения выработка снижается, но низкая радиация и отсутствие атомарного кислорода увеличивают средний срок его службы (время, необходимое для того, чтобы при отсутствии производства его концентрация снижалась) до семи месяцев. Вот почему необходимы глобальные исследования переноса, чтобы понять, как озон распространяется по всему земному шару.

Принимая во внимание глобальное пространственное распределение, парадоксально наблюдать, что общие минимумы содержания озона находятся в тропическом поясе, где ультрафиолетовое излучение выше и, следовательно, больше атомарного кислорода.

Также интересен механизм, который приводит к тому, что максимальная концентрация озона наблюдается в полярных регионах в конце зимы, где

солнечная радиация минимальна. Традиционно считалось, что движущая сила - полусферическая ячейка стратосферы - представляет собой меридиан, проходящий между экватором и полюсом. Холтон в 1995 году предположил, что транспортировка осуществляется посредством “накачки”, производимой планетарными волнами. В любом случае, озон, образующийся в тропических регионах высокой стратосферы, переносится в полярные регионы в течение зимы и весны, в то время как существует полушарный градиент и активность планетарной волны интенсивна, и летом она прекращается. По этой причине максимумы в средних и высоких широтах приходятся на весну, и с тех пор зона медленно уменьшается в результате химических процессов до следующей зимы, когда механизм “накачки” снова включается в направлении полюса. Таким образом, в полюсах достигается большая вариабельность, но весь земной шар покрыт более или менее однородным озоновым слоем в течение всего года. [6]

1.3 Полярный стратосферный вихрь

Озоновыми аномалиями принято называть области с ОСО ниже 220 е.Д. Такие области наблюдаются регулярно над Антарктикой в весенний период в течение 2-3,5 месяца, особенно в сентябре и октябре. Аномалии могут иметь площадь более 20 млн км². В Арктике озоновые аномалии – очень кратковременное явление, они кратковременны (от нескольких дней до 2—3 недель) и имеют небольшую площадь. [7]

Причиной появления озоновых дыр в стратосфере является Полярный стратосферный вихрь.

Полярный стратосферный вихрь – это крупномасштабная область воздуха, которая удерживается сильным струйным течением, направленным с запада на восток и огибающим полярную область. Простирается от тропопаузы через стратосферу до мезосферы (высота до 50 км). С ним связаны низкие концентрации озона и низкие температуры. [3]

Полярный стратосферный вихрь образуется в стратосфере Арктического региона примерно от 16 до 48 км в зимнее время. Струйное течение расположено вокруг бассейна с очень холодным воздухом. При усилении струйного течения, воздух внутри будет более изолирован от самых теплых широт, поэтому он станет холоднее. При температурах менее 200 К могут быть достигнуты условия для образования полярных стратосферных облаков (ПСО). Известно, что ПСО играют важную роль в разрушении озона. [8] Достижение Арктическим полярным вихрем наибольшей силы и устойчивости приводит к смещению полярного струйного течения в тропосфере на север. В результате самый холодный воздух остается в Арктике. Когда вихрь ослабевает, начинает смещаться или затем отделяется, полярный струйный поток часто становится чрезвычайно волнистым, позволяя тепловому воздуху проникать в Арктику, а полярному воздуху опускаться в средние широты. [9]

1.4. Внезапное стратосферное потепление

Внезапное стратосферное потепление (ВСП) представляет собой повышение температуры «взрывного характера» в полярной и субполярной стратосфере зимой в течение нескольких (порядка десяти) суток. ВСП развиваются на высотах от 10 до 50 км, при этом меняется знак меридионального градиента температуры над полушарием, формируется стратосферный антициклон, а зональные ветры могут изменить направление с западного на восточное. Возвращение к нормальному зимнему режиму протекает медленнее, чем развитие потепления.

Развитие ВСП сопровождается разрушением полярного вихря, поэтому анализ ВСП необходимо дополнять анализом особенностей стратосферной циркуляции. [10]

Циркуляция арктической стратосферы зимой характеризуется сильной межгодовой изменчивостью, которая зависит в основном от распространения волновой активности из тропосферы. При этом стратосфера не только

реагирует на распространение волн, но и может влиять на них, создавая, например, благоприятные условия для развития событий Внезапного стратосферного потепления (ВСП) [11]

ВСП возникают за счет нелинейного взаимодействия планетарных волн, распространяющихся из тропосферы, и циркуляции стратосферы [12, 13] Другим важным фактором являются гравитационные волны, которые способствуют возникновению и развитию ВСП [14, 15]

В течение нескольких недель, последовавших за стратосферным потеплением, полярное струйное течение часто принимает волнистую форму с глубокими впадинами и крутыми гребнями, которые могут оставаться почти неподвижными в течение нескольких дней. Точная природа взаимодействия — как полярное струйное течение “чувствует” возмущение полярного вихря и почему оно реагирует таким образом - до конца не изучена. Под хребтами высокого давления теплый воздух устремляется на север в некоторые районы Арктики, часто вызывая экстремальное таяние, в то время как полярный воздух заполняет впадины низкого давления, в результате чего зимние условия оказываются южнее, чем в среднем. Арктическое колебание часто переходит в отрицательную фазу. [9]

В качестве предиктора для прогнозирования потеплений можно использовать рост индекса орографического возбуждения в нижней тропосфере, так он начинается за несколько дней до ВСП. Также известно, что образование блокирующих антициклонов или их эволюция в некоторых частях Северного полушария способствует развитию ВСП, причем потепление возникает после разрушения блокингов. [16]

1.5 Планетарные волны

Планетарные волны – это вертикально распространяющиеся возмущения, которые определяются крупномасштабными изменениями давления, температуры, ветров и состава. Большая часть крупномасштабной

изменчивости долготы в средней атмосфере обусловлена планетарными волнами. Они могут быть стационарными или перемещаться по долготе с периодами от нескольких дней до нескольких недель. Планетарные волны взаимодействуют с другими волнами и с фоновой атмосферой. Волны большой амплитуды могут способствовать быстрым изменениям ветра и температуры. Планетарные волны также играют определенную роль в воздействии стратосферных изменений на тропосферу. [17]

Над Северным полушарием в зимний сезон струйный поток полярного фронта расположен над средними широтами (районы, расположенные между 30° и 60° северной широты), при этом скорость ветра колеблется от 193 до 402 км/ч. Если циркуляция этого струйного течения сильная, полярный вихрь сохраняет примерно круглую форму с центром на Северном полюсе или очень близко к нему. Колебания в циркуляции струйного течения полярного фронта (называемые волнами Россби) атмосфере могут быть результатом поступления энергии, генерируемой контрастами температуры суши и океана, и воздуха, отклоняемого большими горными хребтами на пути струйного течения в стратосфере. Эти волны могут ослабить циркуляцию вокруг полярного вихря и сделать полярный вихрь более восприимчивым к распаду со стороны движущихся на север теплых воздушных масс и систем высокого давления. Распад полярного вихря может сместить часть основной области холодного климата арктического воздуха на юг на тысячи километров, что приведет к широкомасштабным «вспышкам холодного воздуха» или «волнам холода», которые могут снизить температуру воздуха до опасного уровня над населенными районами Евразии или Северной Америки. [18]

На основе исследований 1960-х годов был сделан вывод, что тропосферные волны, включая планетарные волны и гравитационные волны, могут распространяться во внетропическую стратосферу и генерировать отложение зонального импульса, который может изменять стратосферную циркуляцию. [19] Планетарные волны играют важную роль в динамическом взаимодействии стратосферы и тропосферы, поскольку только сверхдлинные

волны могут распространяться в стратосферу. Изменения в стратосферных планетарных волнах могут повлиять на внезапное стратосферное потепление, стратосферный полярный вихрь, стратосферную температуру, циркуляцию Брюера-Добсона (BD) и перенос массы между стратосферой и тропосферой. [20]

1.6 Полярные стратосферные облака

Полярные стратосферные облака (ПСО) играют важную роль в разрушении стратосферного озона зимой и весной в высоких широтах (например, в антарктической озоновой дыре). Частицы ПСО обеспечивают условия для гетерогенных реакций, которые превращают стабильные резервуары хлора в радикалы, каталитически разрушающие озон. ПСО также продлевают разрушение озонового слоя, задерживая дезактивацию хлора за счет удаления HNO_3 и H_2O в газовой фазе путем осаждения крупных частиц тригидрата азотной кислоты и льда.

Полярные стратосферные облака образуются в полярной стратосфере зимой и ранней весной, когда температура достаточно низкая, чтобы обеспечить образование облаков, несмотря на чрезвычайно сухие условия. Наземные наблюдения ПСО начались в конце 19-го века, но они были не более чем научным любопытством, пока в 1985 году не была обнаружена антарктическая озоновая дыра. Вскоре после этого было показано, что ПСО играют решающую роль в преобразовании стабильных галогенов (главным образом хлора) антропогенного происхождения в химически активные газы, которые быстро разрушают озон. В течение следующих двух десятилетий был достигнут значительный прогресс в количественной оценке этих процессов с помощью лабораторных исследований, полевых кампаний и ограниченных космических наблюдений. [21]

После осеннего равноденствия полярные регионы постепенно лишаются солнечного света и больше не получают пользы от нагрева, связанного с поглощением ультрафиолетового излучения озоном. Инфракрасное охлаждение

быстро приводит к очень низким температурам в стратосфере. Температура может достигать 190 К в Арктике и даже опускаться до 180 К в Антарктиде. Хотя стратосфера очень «сухая» с точки зрения содержания водяного пара (около 5 частей на миллион), температуры достаточно низкие, чтобы обеспечить образование облаков высотой от 15 до 25 км. Существует несколько типов полярных стратосферных облаков. Они различаются по своим оптическим свойствам, которые зависят от размера, состояния и состава. Важнейшим параметром в процессах образования, испарения и сублимации ПСО является температура: ее изменение обычно определяет изменения в составе и фазе ПСО. Полярные стратосферные облака начинают формироваться при температуре от 196 К до 50 ГПа. При этой температуре водяной пар и азотная кислота, присутствующие в газовой фазе, конденсируются с жидкими аэрозолями серной кислоты, присутствующими в нижних слоях стратосферы, и замерзают до образования твердых кристаллов тригидрата азотной кислоты (NAT: $\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Но часто частицы не замерзают. В этом случае при температуре около 192 К они образуют жидкие ПСО, состоящие из трехкомпонентного жидкого раствора $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O-H}_2\text{SO}_4$. ПСО имеют довольно разнообразные размеры, но их типичный размер составляет несколько микрон. Когда температура продолжает снижаться и достигает примерно 189 К (точки твердой конденсации водяного пара при давлении 50 ГПа), большая часть водяного пара в стратосфере конденсируется и замерзает на уже существующих богатых азотной кислотой ПСО, образуя почти чистые кристаллы льда. Частицы льда образуются, как правило, более крупные, чем у натуральных или тройных жидких частиц, частицы с радиусом около десяти микрометров.

Полярные стратосферные облака обеспечивают активные поверхности для химических реакций, которые не протекают или протекают очень медленно в газовой фазе. Эти реакции называются гетерогенными, поскольку они являются результатом взаимодействия между частицами в газовой фазе и поверхностями/объемами твердой или жидкой фаз. [22]

1.7 Тренд содержания озона в стратосфере

Проблема прогноза деградации озонового слоя Земли по трендам общего содержания озона состоит в том, что эти тренды слабо выражены, их трудно выделить и оценить. По спутниковым данным ИСЗ Nimbus-7 и EP/TOMS найдены тренды общего содержания озона для средних широт обоих полушарий. Анализ трендов показал, что до введения международного запрета на производство озоноразрушающих веществ в Северном полушарии озоновый слой истощался на 3,4% в расчете на 10 лет, в Южном на 4,8%. После введения запрета в Северном полушарии наблюдается истощение на 2,9%, а в Южном на 1,0% за десятилетие. [23]

Измерения однозначно показывают, что изменение состава атмосферы с 1980-х годов привело к сокращению содержания стратосферного озона во всем мире. На сегодняшний день это снижение достигло 3-4% в среднем за год, что намного превышает естественные колебания озонового слоя в 1%. Минимальное значение на глобальном уровне было достигнуто в течение двух лет, последовавших за извержением вулкана Пинатубо в 1991 году (-5%). Это крупное извержение привело к увеличению аэрозольной нагрузки в стратосфере на несколько лет, что привело к повышению эффективности гетерогенные химические реакции и изменения в динамике атмосферы в результате возмущений радиационного баланса Земли в глобальном масштабе. Амплитуда долгосрочных изменений озонового слоя зависит от широты и времени года. Наибольшее сокращение происходит в высоких широтах южного полушария (в среднем от -10 до -20% в год в диапазоне 60°-70° северной широты) в результате образования озоновой дыры в Антарктике, которая образуется каждую весну в Австралии. В северном полушарии это снижение также является максимальным в высоких широтах (в среднем от -5% до -6% в год в диапазоне 60°-70° северной широты), вызванном также разрушением озонового слоя внутри полярного вихря зимой и весной. Уменьшение содержания озона, наблюдаемое в средних широтах, в значительной степени

является результатом переноса озоноразрушенного воздуха из полярных регионов, а также прямого разрушения озона глобальными каталитическими циклами, которые не требуют гетерогенной химии стратосферных облаков, и, наконец, содержание озона существенно не изменяется в тропических регионах.

Наконец, в стратосферных облаках содержание озона в тропических регионах существенно не меняется. Опасения, вызванные обнаружением в 1985 году антарктической озоновой дыры и возможным изменением озонового слоя стратосферы в результате деятельности человека, привели к процессу регулирования производства долгоживущих соединений, которые являются источниками хлора и брома в стратосфере. Монреальский протокол (1987) был разработан и ратифицирован странами-производителями в целях согласованного сокращения выбросов, что в конечном итоге привело бы к ликвидации этих продукция, используемая в промышленности. С 1987 года в Протокол несколько раз вносились поправки, предусматривающие принятие все более жестких мер или расширение сферы его применения на большее число газов, содержащих хлор и бром. Развитые страны прекратили производство галонов в 1994 году, а наиболее опасных хлорированных продуктов (ХФУ, метилхлороформа CH_3CCl_3 и четыреххлористого углерода CCl_4) – в 1996 году. Развивающимся странам была предоставлена отсрочка на 10-15 лет, чтобы они могли адаптироваться к заменяющим продуктам. В большинстве случаев ХФУ в настоящее время заменяются на гидрохлорфторуглероды (ГХФУ), которые имеют гораздо более короткий срок службы в нижних слоях атмосферы, или гидрофторуглероды (ГФУ), которые больше не содержат атомов галогена.

Осуществление Монреальского протокола привело к стабилизации общего содержания хлора с середины 1990-х годов. Это связано главным образом с резким снижением концентрации CH_3CCl_3 в атмосфере с 1990 года, срок службы которого составляет 5 лет, что позволило относительно быстро вывести его из атмосферы после прекращения производства. Основные ХФУ,

ХФУ-11 и ХФУ-12, имеют продолжительность жизни в несколько десятилетий и, таким образом, выводятся из атмосферы в одно и то же время.

Эффективность Монреальского протокола в настоящее время доказана с учетом атмосферной нагрузки количество ХФУ-11 (срок службы около 45 лет) снижается с 1996 года, в то время как бремя ХФУ-12 (срок службы 100 лет) стабилизировалось в 2000 году. Учитывая эти результаты и наиболее вероятные сценарии производства, наиболее вероятное возвращение содержания хлора в атмосфере к уровню, сопоставимому с тем, который предшествовал появлению озоновой дыры, ожидается примерно в середине текущего столетия. Содержание хлора, эквивалентное содержанию хлора в 1950-х годах (т.е. до широкого использования ХФУ), будет вероятно, это произойдет не ранее конца текущего столетия. Медленное снижение уровня хлора в стратосфере должно привести к постепенному сокращению значительных потерь озона в полярных регионах и общему увеличению толщины озонового слоя. Сегодня большинство работ по моделированию предсказывают, что общее увеличение содержания стратосферного озона должно быть обнаружено с 2010 года, в то время как возвращение к уровням содержания озона 1980 года, до появления озоновой дыры, ожидается примерно к 2050 году. Стоит отметить, что состав атмосферы в 2050 году будет отличаться от состава 1980 года. Действительно, деятельность человека с 1980 года привела к значительному увеличению концентраций парниковых газов, таких как CO_2 , CH_4 и N_2O , которое будет продолжаться и в этом столетии. Хотя масштабы этого будущего увеличения в настоящее время трудно поддаются количественной оценке, уже хорошо известно, что растущие выбросы парниковых газов должны привести к потеплению поверхности Земли и нижних слоев атмосферы, что сопровождается охлаждением стратосферы. В верхних слоях стратосферы это охлаждение должно приводить к увеличению содержания озона, поскольку эффективность каталитического разрушения озона снижается при понижении температуры. В нижних слоях стратосферы, напротив, более низкие температуры будут способствовать более частому образованию стратосферных

облаков и, следовательно, будут способствовать противодействию воздействию снижения содержания хлора на разрушение полярного озона зимой и весной. В некотором смысле, проблема стратосферного озона в ближайшие годы будет все больше увязываться с проблемой выбросов парниковых газов и связанного с этим изменения климата. [22]

Глава 2. Используемые данные

2.1 Глобальный реанализ MERRA-2

Для построения распределения геопотенциальной высоты в стратосфере на высоте 30 км для зимних периодов 2013-2023 г. был использован глобальный реанализ MERRA-2.

Ретроспективный анализ современной эпохи для исследований и применения, версия 2 (MERRA-2), предоставляет данные, начиная с 1980 года. Он был создан для замены оригинального набора данных MERRA в связи с достижениями в области ассимиляции, которые позволяют ассимилировать современные данные о гиперспектральном излучении и микроволновых наблюдениях, а также наборы данных GPS-радиозатменных наблюдений. Он также использует данные наблюдений за озоновым слоем НАСА, которые начались в конце 2004 года. Кроме того, в MERRA-2 включены значительные достижения как в модели GEOS, так и в системе ассимиляции GSI. Пространственный анализ разрешение al остается примерно таким же (около 50 км в широтном направлении), как и у MERRA.

Наряду с улучшениями в области метеорологической ассимиляции, MERRA-2 делает несколько важных шагов в направлении цели GMAO по повторному анализу системы Земля. MERRA-2 — это первый долгосрочный глобальный повторный анализ, в котором ассимилируются данные космических наблюдений за аэрозолями и их взаимодействие с другими физическими процессами в климатической системе. MERRA-2 включает в себя

представление ледяных щитов над (например) Гренландией и Антарктидой. [24]

В отличие от MERRA, все коллекции данных из MERRA-2 представлены в одной горизонтальной сетке. Эта сетка имеет 576 точек в продольном направлении и 361 точку в широтном, что соответствует разрешению $0,625^{\circ} \times 0,5^{\circ}$. Продольное разрешение данных изменено с $0,667^{\circ}$ в MERRA, а широтное разрешение остается неизменным ($0,5^{\circ}$). [25]

2.2 Измерения The Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) со спутника Aqua

Для оценки содержания озона были использованы спутниковые данные The Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) со спутника Aqua. Содержит данные за период с 31.08.2002 по настоящее время.

Aqua - это крупная международная спутниковая программа для изучения Земли, центром которой является НАСА. Запущенный 4 мая 2002 года, спутник оснащен шестью различными приборами для наблюдения за Землей и назван так из-за большого объема информации, получаемой о воде в земной системе из потока данных, составляющего примерно 89 гигабайт в день. Измеряемые параметры воды включают практически все элементы водного цикла и включают воду в жидкой, твердой и парообразной формах. Дополнительные измеряемые параметры включают потоки радиационной энергии, аэрозоли, растительный покров на суше, фитопланктон и растворенные органические вещества в океанах, а также температура воздуха, суши и воды.

Aqua

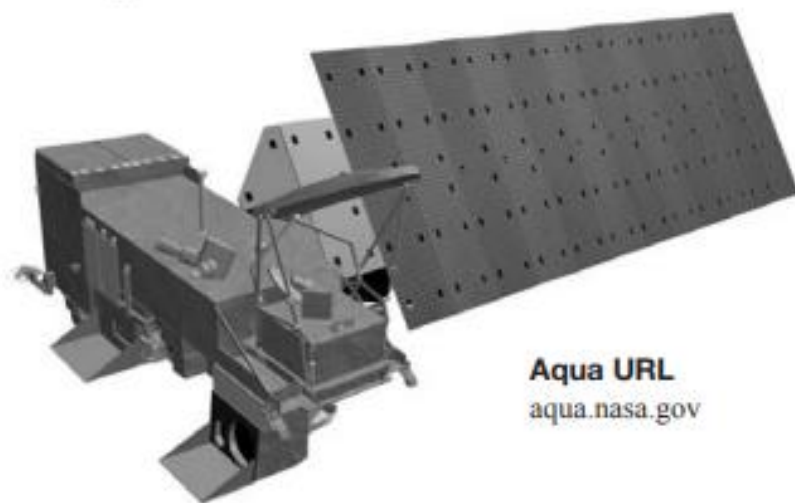


Рисунок 2. Спутник Aqua

Использует различные инструменты, например, AIRS (The Atmospheric Infrared Sounder).

Атмосферный инфракрасный эхолот – это решетчатый спектрометр высокого спектрального разрешения, содержащий 2378 инфракрасных каналов для получения профилей температуры атмосферы и множества дополнительных данных о состоянии Земли и атмосферы. AIRS также имеет 4 канала в видимом/ближнем инфракрасном диапазоне для характеристики свойств облаков и поверхности и получения более высокого пространственного разрешения, чем при инфракрасных измерениях. [26]

2.3 Квазидвухлетнее колебание (КДК). Данные зондирования

Для определения фазы КДК были использованы данные зондирования Метеорологической службы Сингапура из Обсерватории верхних слоев атмосферы.

Данные получены с помощью радиозондов, ассимилированных данных НАСА GSFC/GMAO и спутников НАСА. Радиозонды предоставлены Метеорологической службой Сингапура из Обсерватории

верхних слоев атмосферы (код станции 48698). Станция расположена по координатам 1.34041° северной широты, 103.888° восточной долготы на высоте 21 м. Фазы КДК были определены по Рис.3.

U Singapore

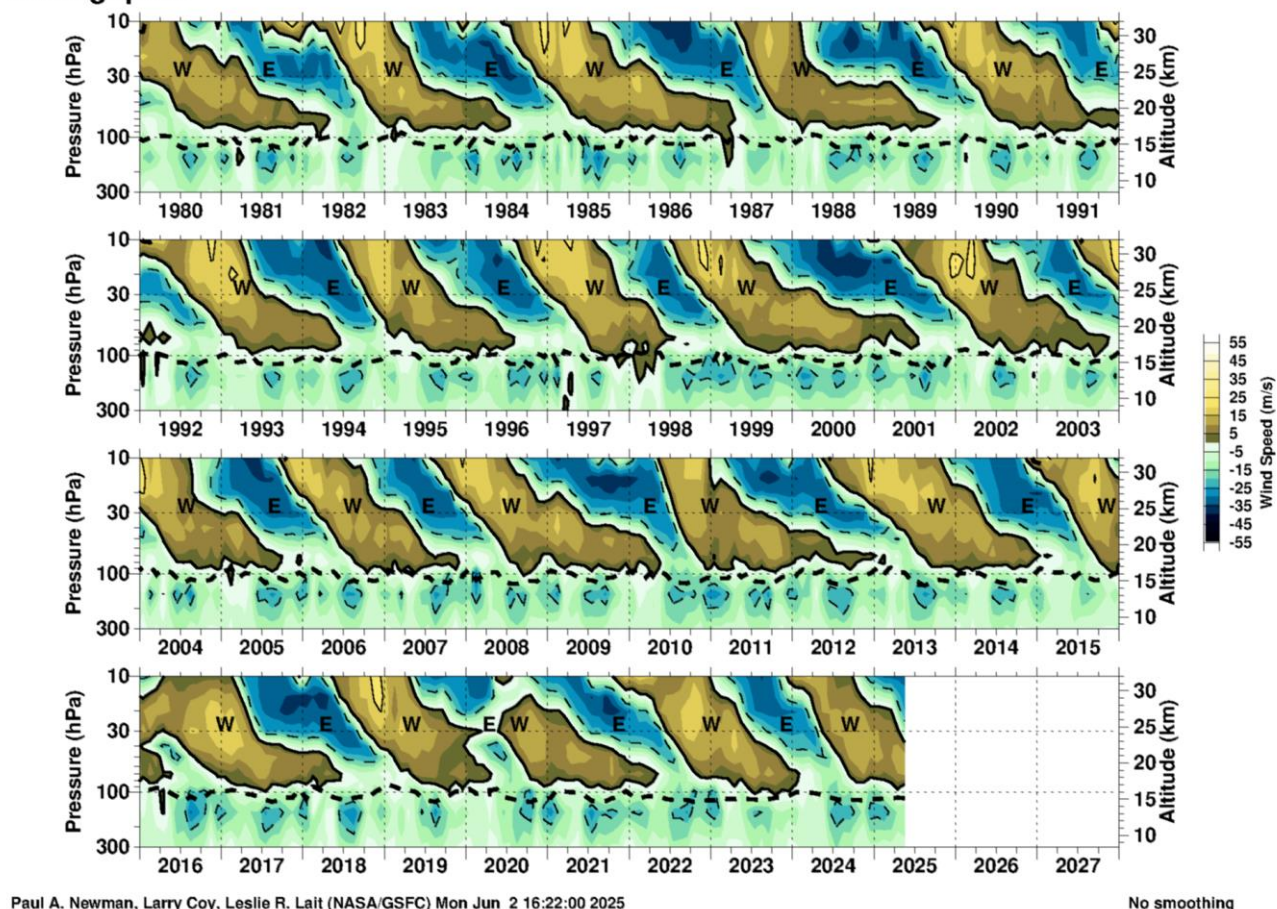


Рисунок 3. Зонд в Сингапуре с 1980 года по настоящее время, КДК на основе среднемесячного зонального ветра

Квазидвухлетнее колебание (квазидвухлетняя осцилляция, КВО) (КДК) — это тропическое, распространяющееся вниз по направлению к нижней стратосфере изменение зонального ветра со средним периодом ~ 28 месяцев. Важность КВО заключается в том, что она доминирует в изменчивости метеорологических условий в нижней стратосфере. КВО также важна для сезонного прогнозирования, и она контролирует изменчивость стратосферного озона и воды, которые могут модулировать поверхностное ультрафиолетовое (УФ) и инфракрасное (ИК) излучение. [27]

Квазидвухлетнее колебание влияет на стратосферный поток от полюса к полюсу, модулируя воздействие внетропических волн. Действительно,

изучение КДК неотделимо от изучения атмосферных волновых движений, которые его вызывают и которым оно противодействует. КДК влияет на изменчивость в мезосфере на высоте около 85 км, избирательно фильтруя волны, которые распространяются вверх через экваториальную стратосферу, а также может влиять на силу атлантических ураганов. Влияние КДК не ограничивается динамикой атмосферы. Оно также оказывает влияние на химические компоненты, такие как озон, водяной пар и метан. Также наблюдаются значительные КДК-сигналы во многих химических компонентах с коротким периодом жизни. Благодаря модуляции распространения внутропических волн, квазидвухлетнее колебание влияет на разрушение стратосферных полярных вихрей в зимнее время и на степень истощения озонового слоя в высоких широтах. Полярный вихрь в стратосфере влияет на погодные условия на поверхности Земли, обеспечивая механизм, с помощью которого КДК оказывает влияние на земную поверхность. [28]

2.4 Эль-Ниньо-Южное колебание (ЭНЮК). Индекс MEI V2

Эль-Ниньо/Южное колебание (ЭНЮК) — природное аномальное состояние тропической части Тихого океана, связанное с состоянием океана и атмосферы, — является основным фактором, предсказывающим глобальные климатические изменения. Они могут сохраняться в течение нескольких сезонов и, таким образом, оказывать серьёзное влияние на регионы. Таким образом, оценка состояния ЭНЮК в режиме реального времени важна для целого ряда климатических служб, которые информируют общество о реакции на изменения климата и инициируют политические действия в области водоснабжения, продовольственной безопасности, здравоохранения и общественной безопасности. [29]

ЭНЮК включает 3 фазы: Эль-Ниньо, Ла-Нинья и Нейтральная фаза.

Состояние Эль-Ниньо возникает, когда поверхностные воды в экваториальной части Тихого океана становятся теплее, чем обычно, а восточные ветры дуют слабее, чем обычно. Противоположное состояние называется Ла-Нинья. Во время этой фазы ЭНЮК вода холоднее, чем обычно, а восточные ветры сильнее. Эль-Ниньо обычно происходит раз в 3–5 лет. [30]

Последствия влияния Эль-Ниньо на климат — увеличение количества осадков на юге США и в Перу, что привело к разрушительным наводнениям, а также засуха в западной части Тихого океана, которая иногда сопровождается разрушительными лесными пожарами в Австралии. Наблюдения за состоянием тропической части Тихого океана считаются необходимыми для прогнозирования краткосрочных (от нескольких месяцев до 1 года) изменений климата. [31]

Последствия Ла-Нинья на климат, как правило, противоположны последствиям Эль-Ниньо. В тропиках колебания температуры океана во время Ла-Нинья противоположны колебаниям во время Эль-Ниньо.

В более высоких широтах Эль-Ниньо и Ла-Нинья являются одними из многих факторов, влияющих на климат. Однако влияние Эль-Ниньо и Ла-Ниньи в этих широтах наиболее заметно зимой. В континентальной части США в годы Эль-Ниньо зимние температуры выше нормы в северо-центральных штатах и ниже нормы на юго-востоке и юго-западе. В годы Ла-Нинья зимние температуры выше нормы на юго-востоке и ниже нормы на северо-западе. [32]

Для определения фазы ЭНЮК использовался индекс MEI V2. Он объединяет в себе как океанические, так и атмосферные переменные, позволяет в рамках одного индекса оценить ЭНСО. В частности, он даёт представление об интенсивности ЭНСО в реальном времени, а исторический анализ обеспечивает контекст для значимого сравнительного изучения меняющихся условий.

Многомерный индекс Эль-Ниньо/Южного колебания (ЭНСО), рассчитываемый раз в два месяца (MEI.v2), представляет собой временной ряд ведущей комбинированной эмпирической ортогональной функции (EOF) пяти различных переменных (давление на уровне моря (SLP), температура

поверхности моря (SST), зональные (U) и меридиональные (V) компоненты поверхностного ветра и исходящая длинноволновая радиация (OLR)) над тропическим Тихоокеанским бассейном (30°ю.ш.-30°с.ш. и 100°в.д.-70°з.д.). EOF рассчитываются для 12 перекрывающихся «сезонов», длящихся два месяца (декабрь-январь, январь-февраль, февраль-март и т. д., ноябрь-декабрь), чтобы учесть сезонность ЭНСО и уменьшить влияние более высокочастотной внутрисезонной изменчивости. Данные с 1979 г. по настоящее время.

В MEI.v2 поля SST, SLP, а также поверхностные зональные и меридиональные ветры получены на основе высококачественного глобального повторного анализа JRA-55. MEI.v2 также использует данные OLR из архива климатических данных NOAA (CDR) о ежемесячном исходящем длинноволновом излучении (OLR), версия 2.7. Для создания MEI.v2 все переменные интерполируются в общую сетку с шагом 2,5° по широте и долготе, а стандартизированные аномалии рассчитываются относительно базового периода 1980–2018 годов. [29]

В работе фазы ЭНЮК определялись по Рис.4.

YEAR	DJ	JF	FM	MA	AM	MJ	JJ	JA	AS	SO	ON	ND
2010	0.9	1.3	1.3	0.5	-0.1	-1.3	-2.4	-2.4	-2.3	-2.2	-2	-1.9
2011	-1.8	-1.6	-1.7	-1.7	-1.2	-1	-0.7	-0.8	-1.1	-1.3	-1.1	-1.2
2012	-1.1	-0.7	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	0.3	0	-0.3	-0.2	0	0
2013	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.7	-1.1	-0.8	-0.4	-0.3	-0.1	-0.2	-0.3
2014	-0.5	-0.4	0	-0.2	-0.2	0	0.4	0.2	-0.1	0.1	0.4	0.4
2015	0.2	0.1	0.2	0.3	1	1.9	1.8	2	2.2	2.2	1.9	1.9
2016	1.9	1.8	1.3	1.3	1.2	0.4	-0.5	-0.3	-0.3	-0.5	-0.5	-0.4
2017	-0.4	-0.4	-0.6	-0.2	0.2	-0.2	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	-0.7
2018	-0.8	-0.7	-0.8	-1.3	-0.9	-0.5	0	0.5	0.6	0.5	0.3	0.2
2019	0.1	0.5	0.8	0.3	0.2	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3	0.5	0.4
YEAR	DJ	JF	FM	MA	AM	MJ	JJ	JA	AS	SO	ON	ND
2020	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.2	-0.7	-0.9	-1	-1.1	-1.2	-1.1	-1.1
2021	-1.2	-1	-0.8	-0.9	-1.1	-1	-1.4	-1.3	-1.4	-1.5	-1.4	-1.2
2022	-1	-1	-1.3	-1.6	-1.6	-1.9	-2.2	-1.7	-1.7	-1.7	-1.5	-1.3
2023	-1.1	-0.9	-0.8	-0.4	-0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	0.5	0.9	1.1

Рисунок 4. Значения MEI V2

Глава 3. Полученные результаты и их анализ

Для того, чтобы оценить содержание озона на территории Российской Федерации и выяснить, наблюдались или не наблюдались озоновые дыры, а также проанализировать особенности их возникновения (если они наблюдались), для начала были построены графики поля геопотенциальной высоты (с помощью реанализа MERRA-2). Графики необходимы для определения случаев, когда Полярный стратосферный вихрь с обедненным содержанием озона смещался на территорию России. Выбранный период для исследования – с ноября 2013 г. по декабрь 2023 г.

После построения графиков и анализа поля геопотенциальной высоты для 10 зимних периодов, было выбрано 8 наиболее интересных случаев, в которых вихрь был сильно смещен на территорию Российской Федерации: февраль 2014 г, январь 2016 г, март 2016 г, декабрь 2017 г, декабрь 2018 г, декабрь 2019 г, январь 2021 г, февраль 2023 г.

Далее каждый выбранный случай был разделен на периоды по 5 дней, и для каждого периода также были построены графики поля геопотенциальной высоты, для более подробного анализа, чтобы выявить момент, когда вихрь был максимально смещен на территорию России.

Затем по спутниковым данным для выбранного 5 дневного периода для каждого выбранного зимнего месяца были построены графики концентраций озона. Графики были построены для каждого дня из 5, а после был выбран день, когда концентрации озона были минимальны.

Чтобы выяснить особенность смещения вихря для каждого из 8 случаев, были построены графики осцилляций ветра и аномалий температуры, то есть разница между фактически наблюдавшимся значением в конкретный случай и климатической нормой. Климатическая норма – средние значения за период с 1995 по 2024 г. Также были проанализированы колебания амплитуды планетарной волны с $m=1$.

Анализ выбранных случаев.

1. Февраль 2014 г.

Для данного случая было построено поле геопотенциальной высоты, осредненное за весь месяц (Рис. 1 в Приложении).

Для удобства анализа месяц был поделен на периоды по 5 дней. Сравнивая все периоды, выяснилось, что вихрь с минимальным давлением в центре был сильно смещен на территорию России с 6 по 10 февраля (График 2).

Geopotential height, lev 30 km, 6–10 FEB 2014

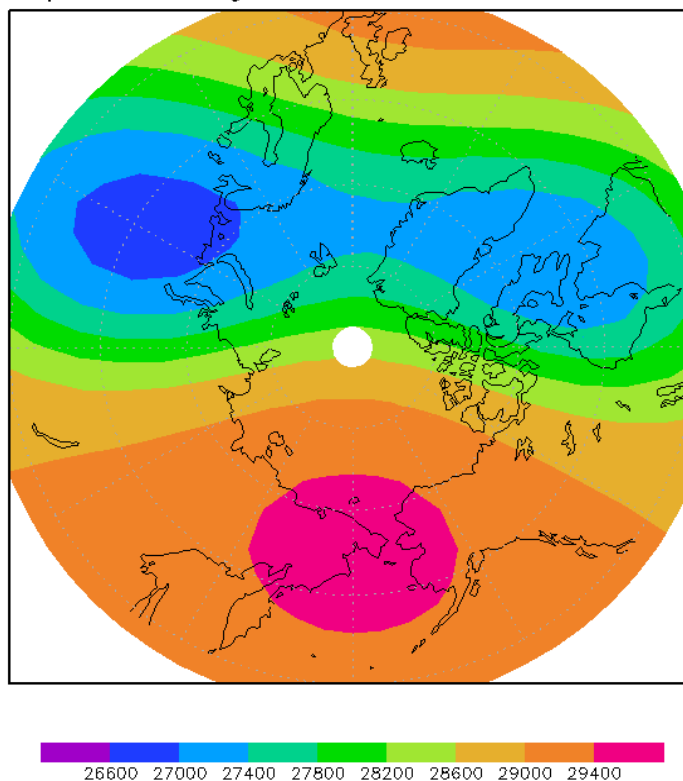


Рисунок 2. Поле геопотенциальной высоты в период с 6 по 10 февраля 2014 г, гп.м. Высота 30 км.

По данному графику видно, что минимальное давление в центре Полярного стратосферного вихря составило менее 2700 гп.м.

Ozone concentration, Dobson units, FEB 2014

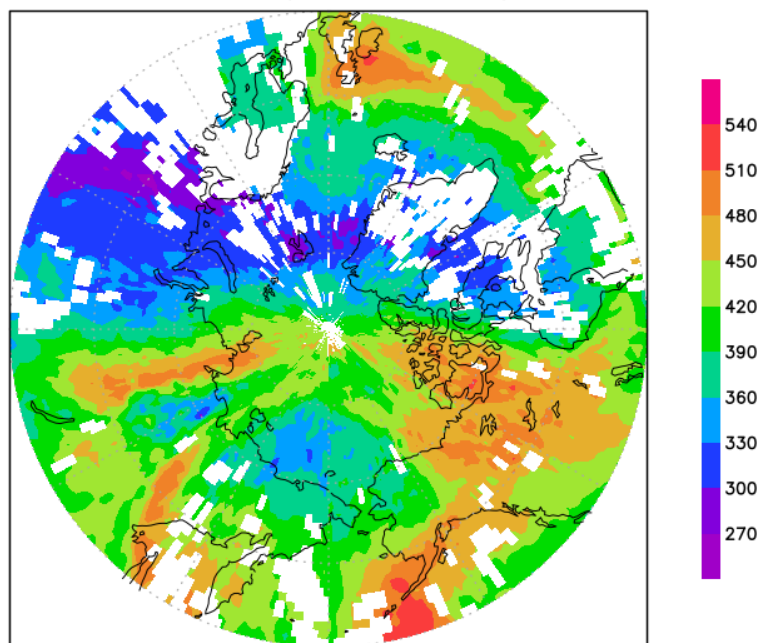


Рисунок 3. Концентрации озона 8 февраля 2014 г, ед.Д.

Проанализировав концентрации озона для каждого дня с 6 по 10 февраля, был сделан вывод о том, что минимум озона наблюдался 8 февраля (Рис. 3) и составил менее 270 ед.Д. Наблюдалось это на территории региона Центральной России.

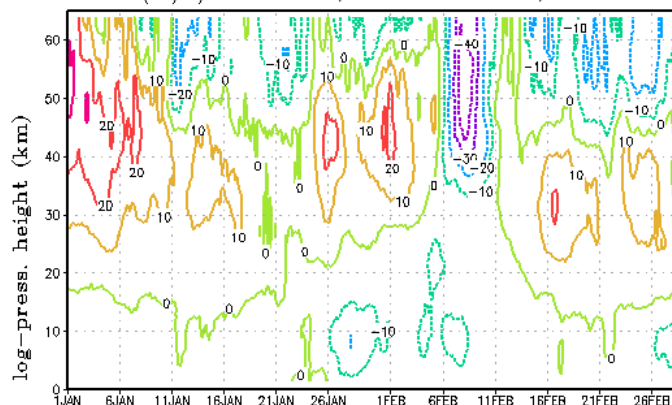
Сравнивая два графика (Рис. 2 и Рис. 3), можно сделать вывод о том, что минимальному давлению в центре вихря, соответствуют минимальные значения озона.

Анализ аномалий зонального ветра и температуры (Рис. 5).

Значения климатической нормы в Приложении (Рис. 4). Анализируя осцилляцию ветра (Рис. 5, верхняя панель) на высоте 45 км для 8 февраля (значение составило -40 м/с), можно сделать вывод о том, что вихрь был неустойчивый, а ветры поменяли свое направление с западного на восточное. Ветер был слабее по сравнению с климатической нормой. Аномалия температура на высоте 45 км в этот день была 10 К, что выше климатической нормы (Рис. 5, нижняя панель), это говорит о Внезапном стратосферном потеплении.

Оценка аномалий говорит о том, что возникшее ВСП, стало причиной смещения неустойчивого вихря на территорию Российской Федерации.

Zonal wind (m/s) – CLIMATE, LAT=62.5N 2016, JAN–FEB 20



Temperature (K) – CLIMATE, LAT=77.5N, JAN–FEB 2014

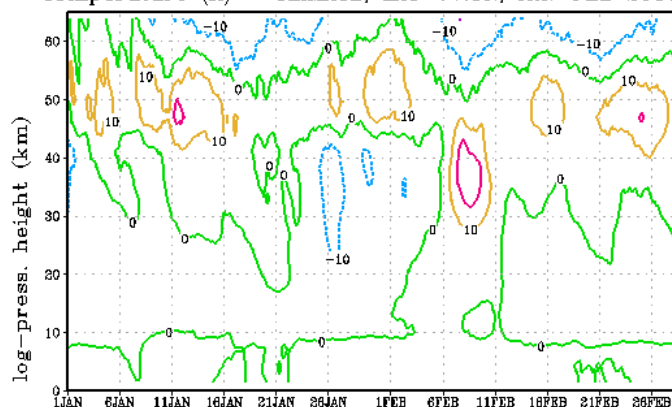


Рисунок 5. Высотно-временное распределение аномалии среднего зонального ветра (м/с) на 62,5° с.ш. (верхняя панель), и аномалии температуры (К) на 77,5° с.ш. (нижняя панель) за январь-февраль 2014 г.

Анализ колебаний амплитуды планетарной волны с $m=1$ (Рис. 6).

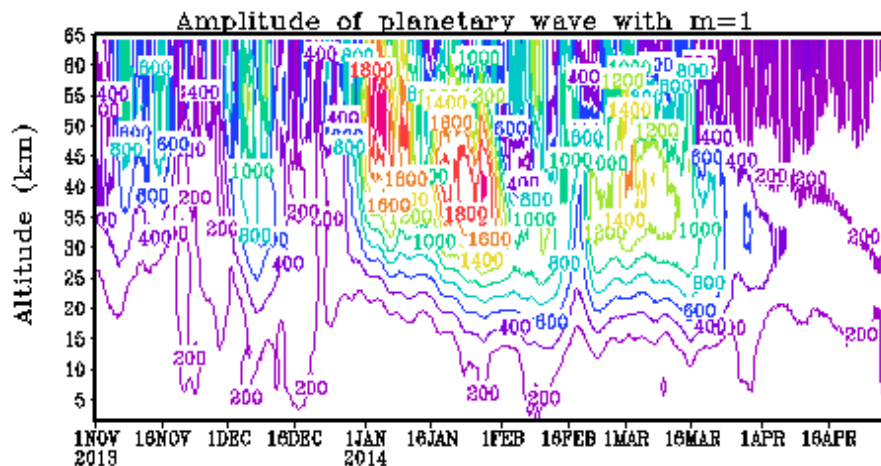


Рисунок 6. Колебания амплитуды планетарной волны с $m=1$ в поле геопотенциальной высоты в период с ноября 2013 по апрель 2014 г, на 62,5° с.ш., м.

Примерно за 2 недели до наблюдавшегося смещения вихря на территорию России (6-10 февраля) амплитуда волны возрастала (с 16 января по 27 февраля), максимальное значение наблюдалось 25 февраля и составило 2000 м, на высоте 45 км.

2. Январь 2016 г.

График поля геопотенциальной высоты, осредненного за весь месяц, в Приложении (Рис. 7).

Также, как и предыдущий случай, месяц был поделен на периоды по 5 дней. После сравнения периодов, оказалось, что центр вихря с минимальным давлением в центре был сильно смещен на территорию Российской Федерации в период с 26 по 31 января (Рис. 8).

Geopotential height, lev 30 km, 26–31 JAN 2016

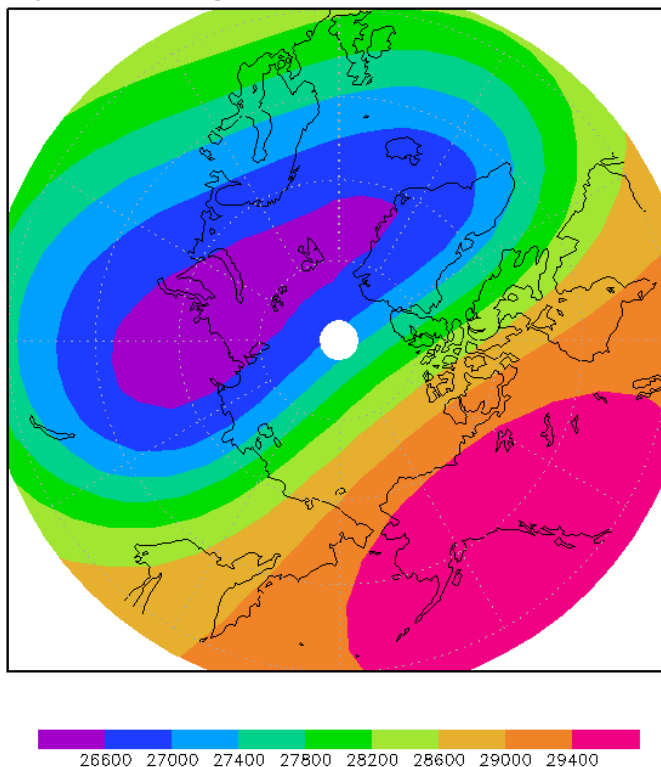


Рисунок 8. Поле геопотенциальной высоты в период с 26 по 31 января 2016 г, гп.м. Высота 30 км.

По графику видно, что минимальное давление в центре вихря составило менее 26600 гп.м.

Был проведен анализ концентраций озона для каждого дня выбранного периода и сделан вывод о том, то минимум озона наблюдался 28 января (Рис. 9).

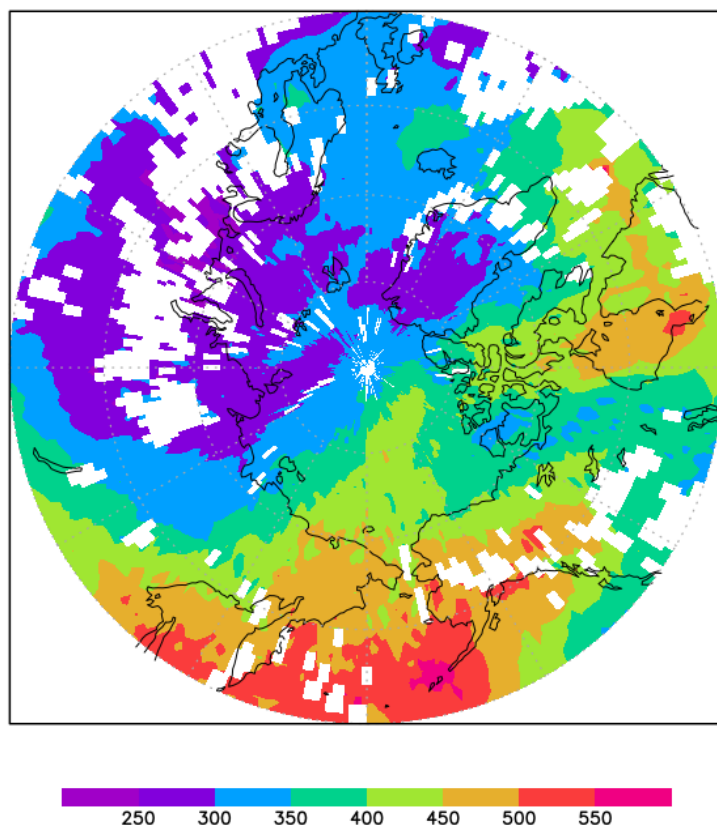


Рисунок 9. Концентрации озона 28 января 2016 г, ед.Д.

Минимум озона пришелся на территорию севера Урала и Сибири и составил менее 250 ед.Д.

Сопоставляя 2 графика (Рис. 8 и Рис.9), можно сделать такой же вывод, как и в предыдущем случае – минимальному давлению в центре вихря соответствуют минимальные значения озона.

Анализ аномалий зонального ветра и температуры (Рис. 10).

По Графику 10, верхняя панель видно, что аномалия зонального ветра 28 января составила -50 м/с, что говорит о неустойчивом вихре и смены направления ветров с западного на восточное. А аномалия температуры (20 К) говорит о развитии Внезапного стратосферного потепления.

В данном случае смещение неустойчивого вихря с обедненным содержанием озона на территорию Российской Федерации произошло в результате ВСП.

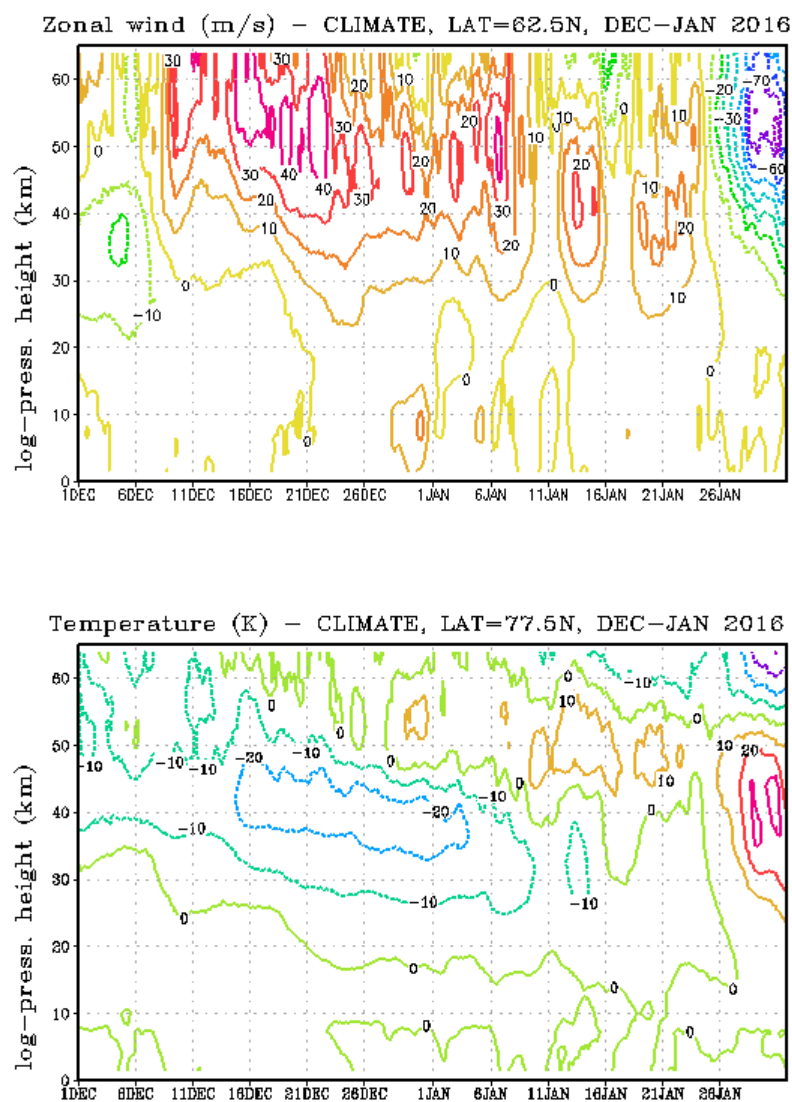


Рисунок 10. Высотно-временное распределение аномалии среднего зонального ветра (м/с) на $62,5^\circ$ с.ш. (верхняя панель), и аномалии температуры (К) на $77,5^\circ$ с.ш. (нижняя панель) за декабрь 2015- январь 2016 г.

Анализ колебаний амплитуды планетарной волны с $m=1$ (Рис. 11).

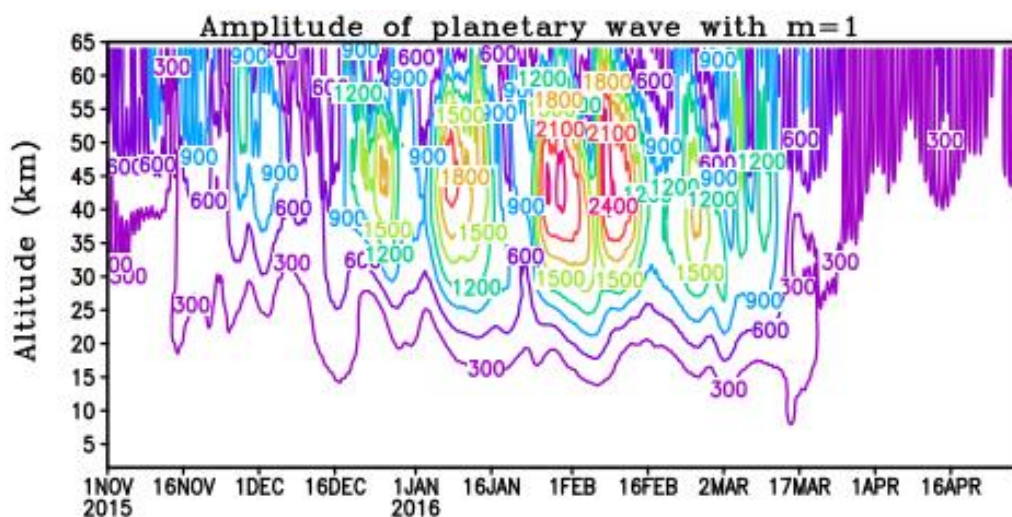


Рисунок 11. Колебания амплитуды планетарной волны с $m=1$ в поле геопотенциальной высоты в период с ноября 2015 по апрель 2016 г, на $62,5^\circ$ с.ш, м.

Примерно за 2 недели до наблюдавшегося минимума озона (28 января) амплитуда волны возрастала (с 1 по 16 января), максимальное значение наблюдалось 10 января и составило 2000 м, на высоте 45 км.

Эта ситуация интересна тем, что ОСО составляло и менее 220 ед.Д, наблюдалась озоновая «мини-дыра» (ОМД). Данный случай уже очень подробно рассматривался во многих научных публикациях, например, в статье [33], откуда был взят термин ОМД.

3. Март 2016.

График поля геопотенциальной высоты, осредненного за весь месяц, в Приложении (Рис. 12).

Месяц был поделен на периоды по 5 дней и был выбран тот период, в котором вихрь был сильно смещен на территорию Российской Федерации. Выбранный период – с 6 по 10 марта (Рис. 13).

Geopotential height, lev 30 km, 6–10 MAR 2016

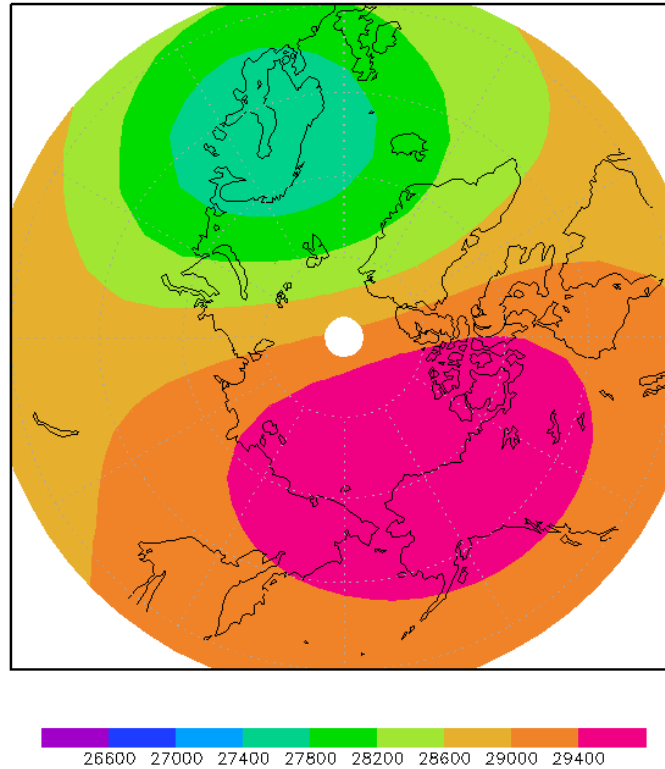


Рисунок 13. Поле геопотенциальной высоты в период с 6 по 10 февраля 2016, гп.м. Высота 30 км.

Минимальное давление в центре вихря составило менее 27800 гп.м.

Были проанализированы концентрации озона для периода с 6 по 10 марта, самые низкие концентрации наблюдались 9 марта (Рис. 14).

Ozone concentration, Dobson units, MAR 2016

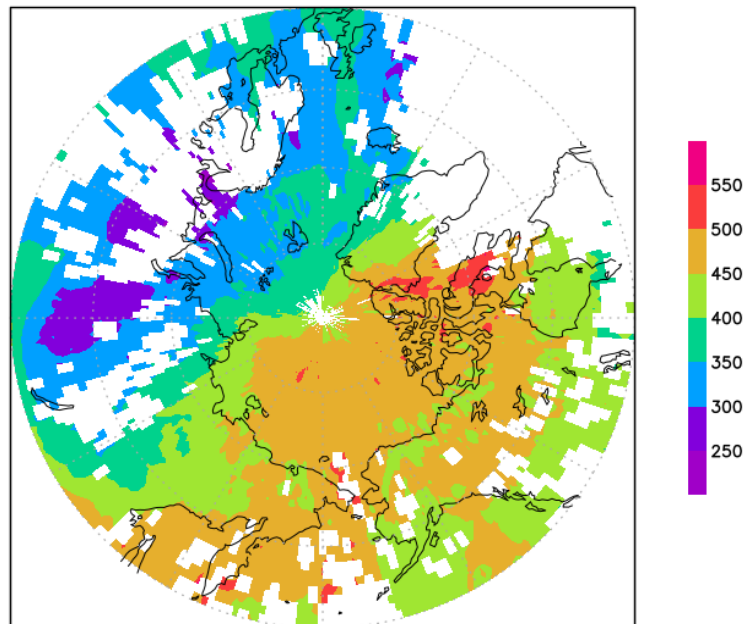


Рисунок 14. Концентрации озона 9 марта 2016 г, ед.Д.

Минимальные значения озона – менее 250 ед.Д и наблюдались они в районе Северо-Западного региона России.

Минимальному давлению в центре вихря соответствует минимум концентрации озона.

Анализ графиков аномалий зонального ветра и температуры (Рис. 15).

Осцилляции ветра составила -90 м/с на высоте 45 км (Рис. 15, верхняя панель), что свидетельствует об очень неустойчивом вихре и смене направления ветров на восточное. А аномалия температуры - 10 К на высоте 45 км (Рис.15, нижняя панель) говорит о ВСП.

Значит вихрь был слабый и сместился на территорию России в результате ВСП.

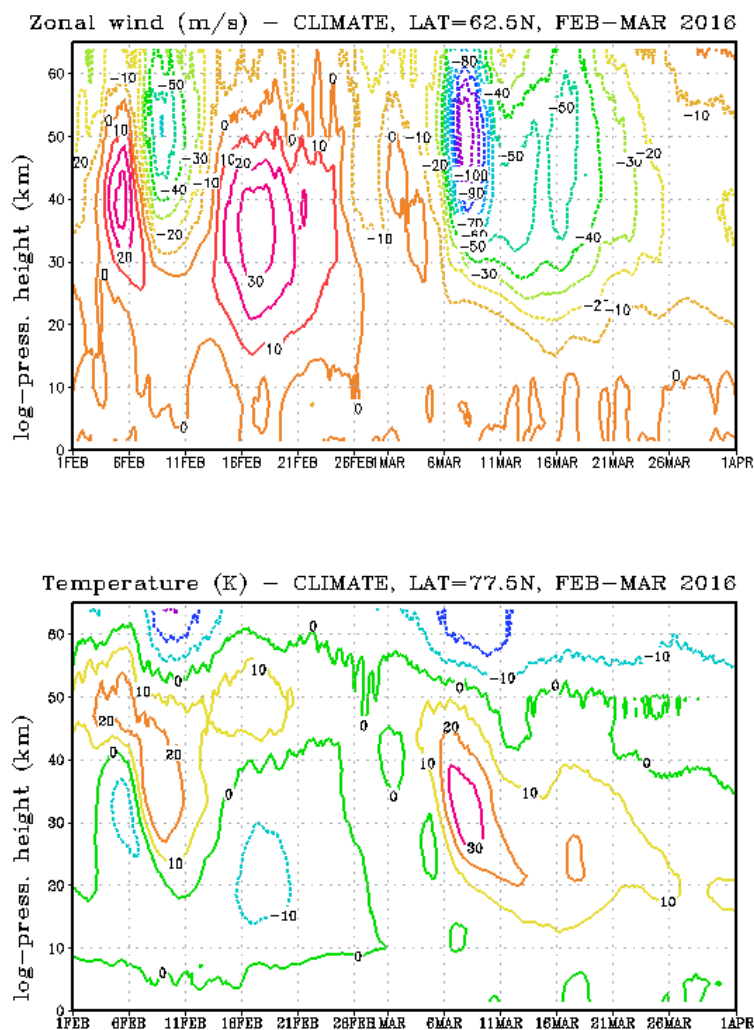


Рисунок 15. Высотно-временное распределение аномалии среднего зонального ветра (м/с) на 62,5° с.ш. (верхняя панель), и аномалии температуры (К) на 77,5° с.ш. (нижняя панель) февраль-март 2016 г.

Анализ колебаний планетарной волны с $m=1$ (Рис. 16).

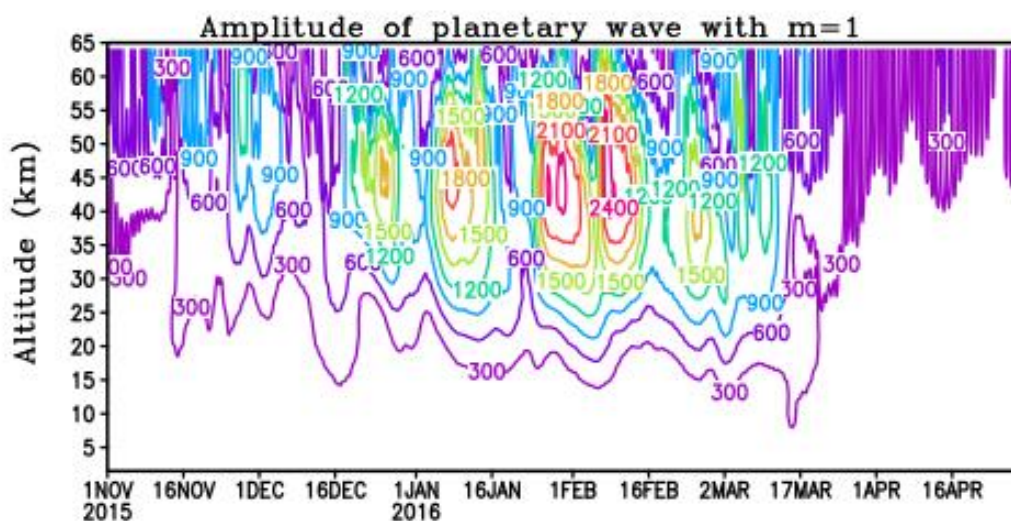


Рисунок 16. Колебания амплитуды планетарной волны с $m=1$ в поле геопотенциальной высоты в период с ноября 2015 по апрель 2016 г, на $62,5^\circ$ с.ш, м.

За две недели до наблюдаемого смещения вихря (6-10 марта) примерно с 16 февраля по 2 марта амплитуда планетарной волны возрастала. Максимальный скачок амплитуды наблюдался 25 февраля и составил 1800 м, на высоте 45 км.

4. Январь 2021 г.

График осредненного за месяц поля геопотенциальной высоты в Приложении (Рис. 17).

Месяц был поделен на периоды по 5 дней для определения момента, когда вихрь был максимально смещен на территорию России. Выбранный период – с 6 по 10 января (Рис. 18).

Минимальные значения давления в центре вихря составили менее 27400 гп.м.

Geopotential height, lev 30 km, 6–10 JAN 2021

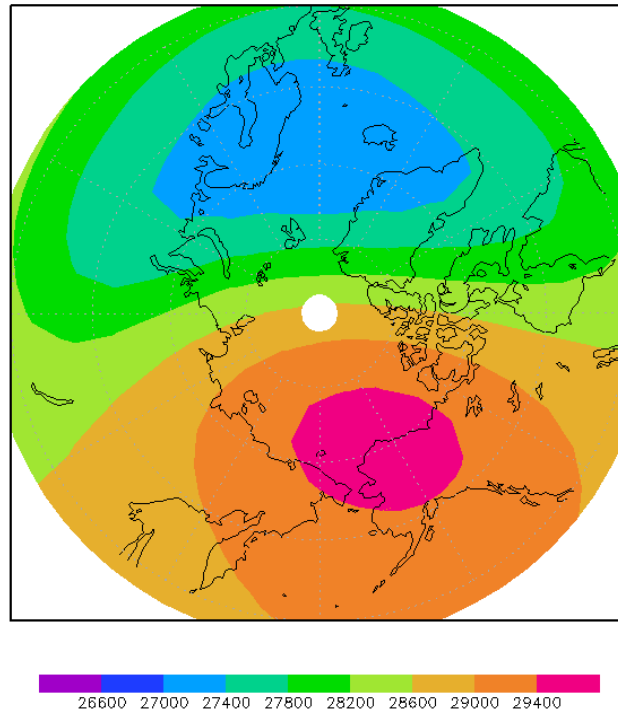


Рисунок 18. Поле геопотенциальной высоты в период с 6 по 10 января 2021 г, гп.м. Высота 30 км.

Проанализировав концентрации озона для каждого дня из выбранного периода, оказалось, что 6 января был минимум озона (Рис. 19).

Ozone concentration, Dobson units, JAN 2021

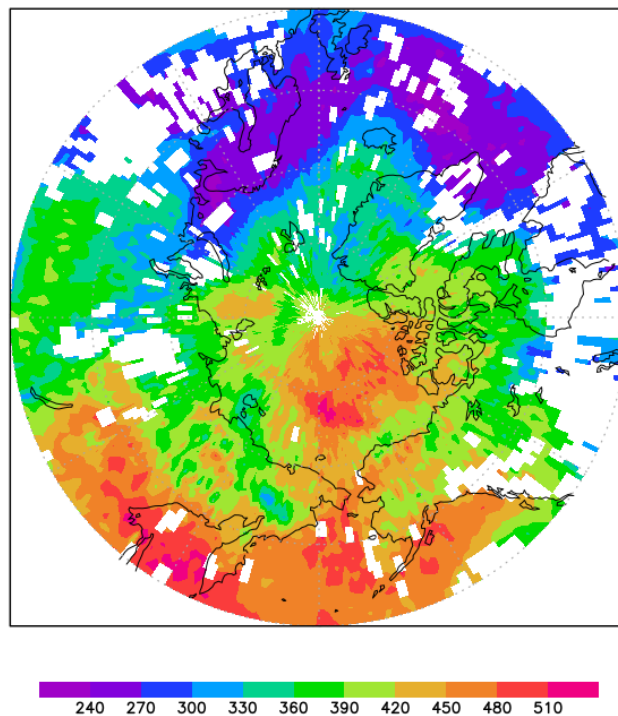


Рис. 19. Концентрации озона 6 января 2021 г, ед.Д.

Минимальные значения озона составили менее 270 ед.Д. в регионе Севера-Запада России.

Анализ аномалий зонального ветра и температуры (Рис. 20).

На Рис. 20, верхняя панель аномалия зонального ветра 6 января составила -80 м/с на высоте 45 км, что говорит о неустойчивости вихря и смене направления ветров с западного на восточное. А аномалия температуры (Рис. 20, нижняя панель) в этот день составила 20 К, на высоте 45 км.

Вихрь был неустойчивым и области с обедненным содержанием озона смещались на территорию России в результате Внезапного стратосферного потепления.

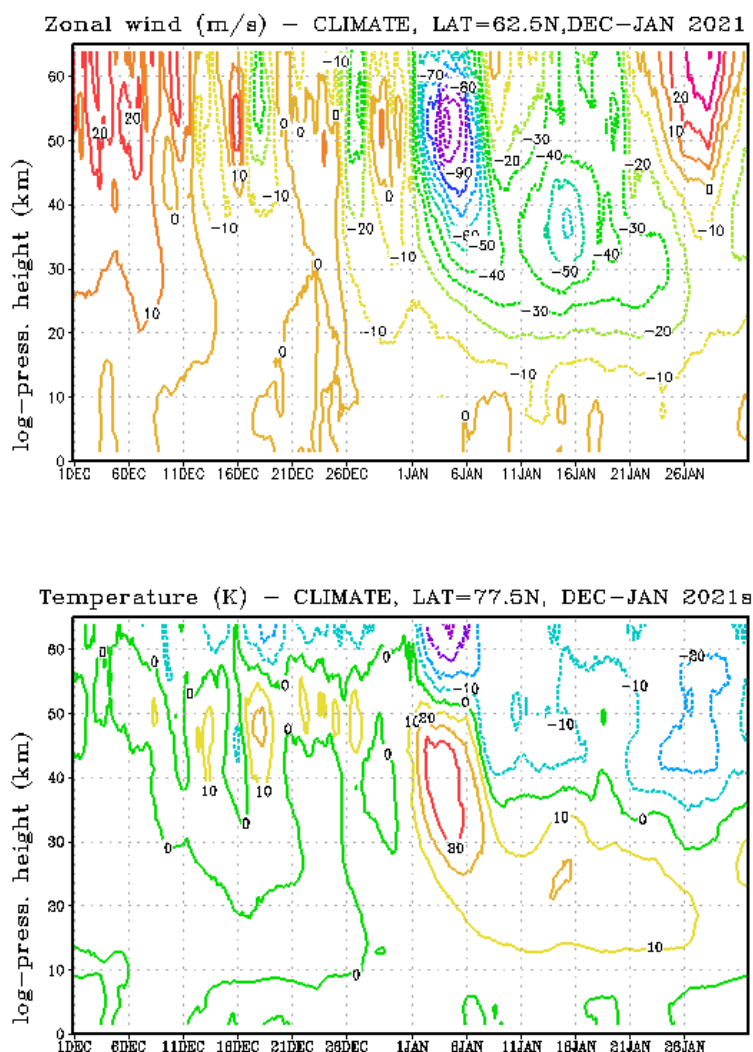


Рисунок. 20. Высотно-временное распределение аномалии среднего зонального ветра (м/с) на 62,5° с.ш. (верхняя панель), и аномалии температуры (К) на 77,5° с.ш. (нижняя панель) за декабрь 2020- январь 2021 г.

Анализ колебаний амплитуды планетарной волны с $m=1$ (Рис. 21).

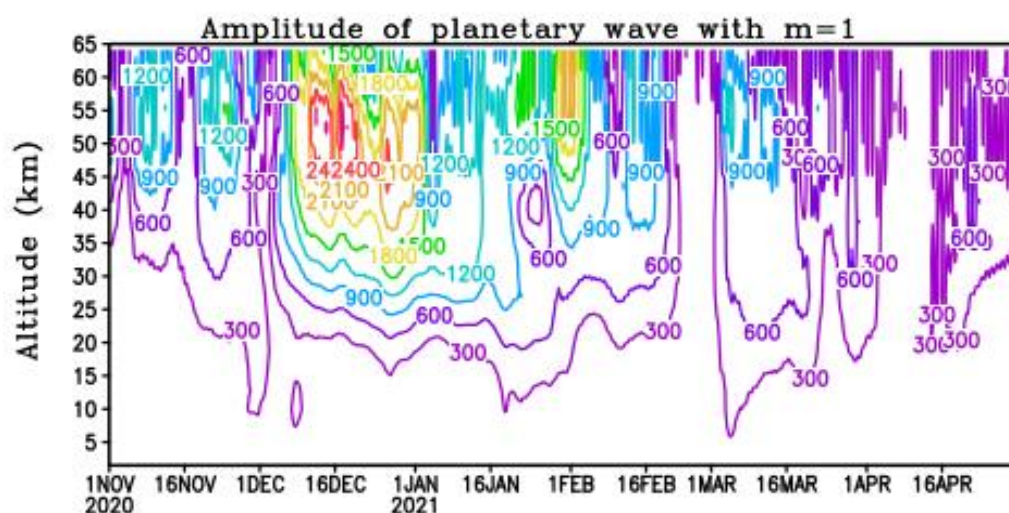


Рисунок 21. Колебания амплитуды планетарной волны с $m=1$ в поле геопотенциальной высоты в период с ноября 2020 по апрель 2021 г, на $62,5^\circ$ с.ш, м.

С 23 декабря по 1 января амплитуда планетарной волны с $m=1$ возрастала и максимальной значение наблюдалось 25 декабря и составило 2400 м, на высоте 45 км. Это наблюдалось примерно за 2 недели до смещения вихря.

5. Февраль 2023 г.

График поля геопотенциальной высоты, осредненное за месяц, в Приложении (Рис. 22).

Аналогично предыдущим случаям, месяц был поделен на периоды по 5 дней. Был выбран момент, когда полярный стратосферный вихрь был смещен на территорию России – с 16 по 20 февраля (Рис. 23).

Geopotential height, lev 30 km, 16–20 FEB 2023

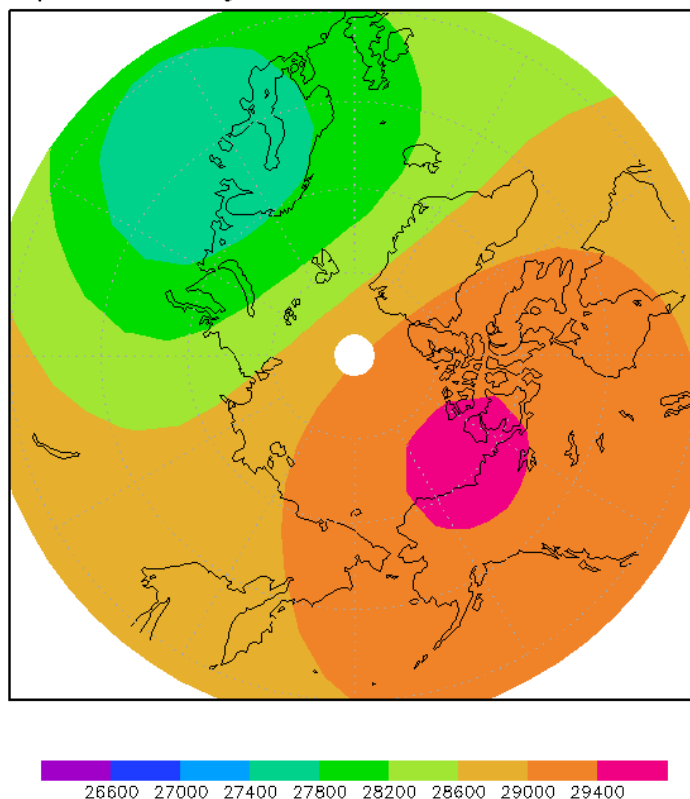


Рисунок 23. Поле геопотенциальной высоты в период с 16 по 20 февраля 2023 г, гп.м. Высота 30 км.

Минимальные значения давления в центре вихря составили менее 27800 гп.м.

Проанализировав концентрации озона для каждого дня из выбранного периода, оказалось, что минимальные значения наблюдались 16 февраля (Рис. 24).

Ozone concentration, Dobson units, FEB 2023

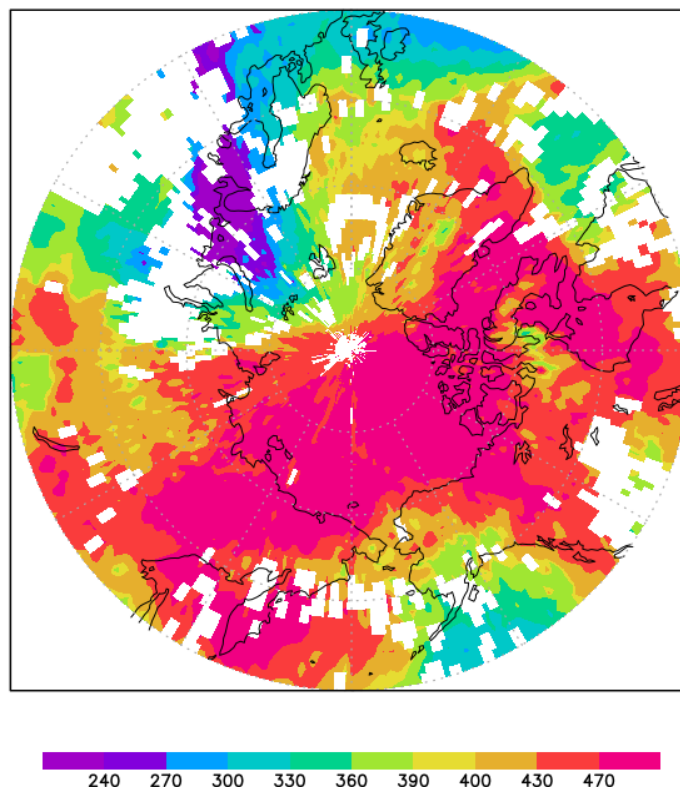


Рисунок 24. Концентрации озона 16 февраля 2023 г, ед.Д.

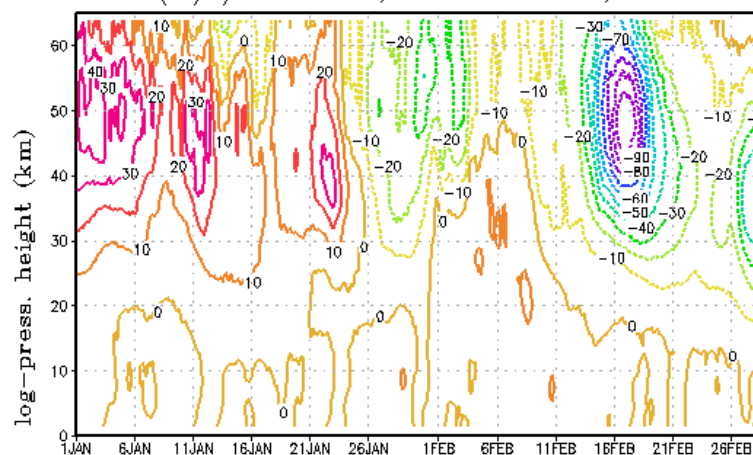
Минимальные значения концентраций озона составили менее 240 ед.Д, наблюдалось это над территорией Северо-Западного региона 16 февраля 2023 г.

Анализ аномалий зонального ветра и температуры (Рис. 25).

16 февраля на высоте 45 км аномалия зональной составляющей ветра оказалась -90 м/с (Рис. 25, верхняя панель), значит вихрь был неустойчивый и ветры поменяли свое направление с западного на восточное. Аномалия температуры на высоте 45 км составила 20 К (Рис. 25, нижняя панель), следовательно, наблюдалось Внезапное стратосферное потепление.

Вихрь смещался на территорию Российской Федерации в результате ВСП.

Zonal wind (m/s) – CLIMATE, LAT=62.5N 2016, JAN-FEB 2014



Temperature (K) – CLIMATE, LAT=77.5N, JAN-FEB 2023

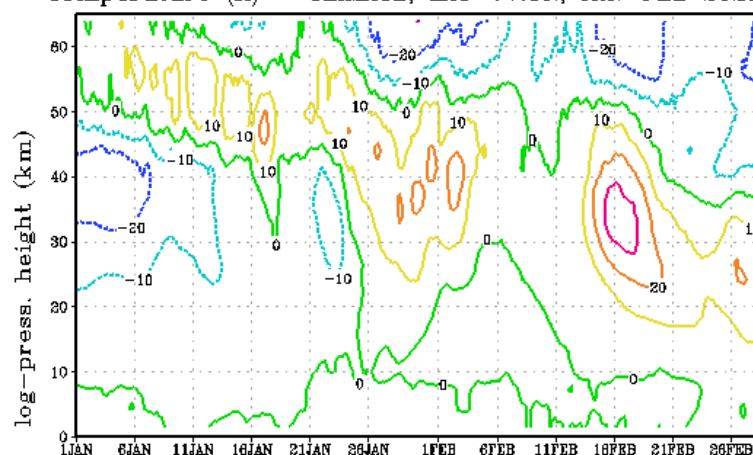


Рисунок 25. Высотно-временное распределение аномалии среднего зонального ветра (м/с) на 62,5° с.ш. (верхняя панель), и аномалии температуры (К) на 77,5° с.ш. (нижняя панель) за январь-февраль 2023 г.

Анализ колебаний амплитуды планетарной волны с $m=1$ (Рис. 26).

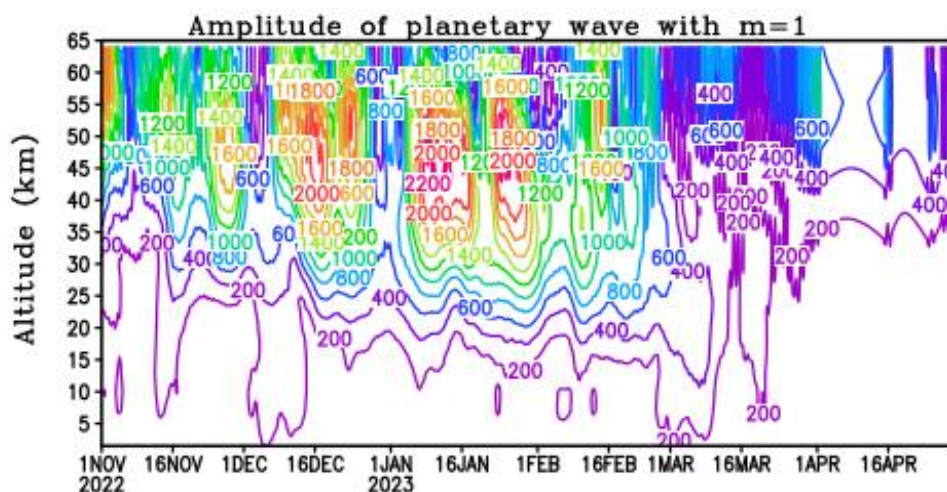


Рисунок 26. Колебания амплитуды планетарной волны с $m=1$ в поле геопотенциальной высоты в период с ноября 2022 по апрель 2023 г, на 62,5° с.ш, м

Примерно за 2 недели (с 22 января по 1 февраля) до смещения вихря на территорию Российской Федерации (16 февраля), наблюдались скачки амплитуды, максимальное значение наблюдалось 24 января и составило 2200 м, на высоте 45 км.

6. Декабрь 2017 г.

График поля геопотенциальной высоты, осредненный за месяц, представлен в Приложении (Рис.27).

Также, как и в предыдущих случаях, месяц был разделен на периоды по 5 дней. Выбранный период, где вихрь был максимально смещен на территорию России – с 16 по 20 декабря.

Geopotential height, lev 30 km, 16–20 DEC 2017

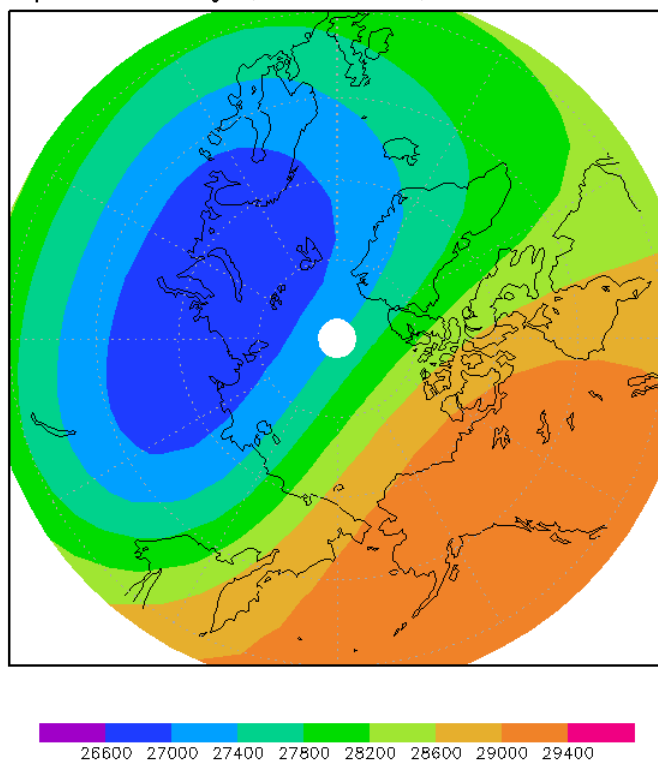


Рисунок 28. Поле геопотенциальной высоты в период с 16 по 20 декабря 2017 г, гп.м. Высота 30 км.

Минимальные значения в центре вихря – менее 27000 гп.м.

Проанализировав концентрации озона для каждого дня из выбранного периода, оказалось, что минимальные значения наблюдались 16 декабря (Рис. 29).

Ozone concentration, Dobson units, DEC 2017

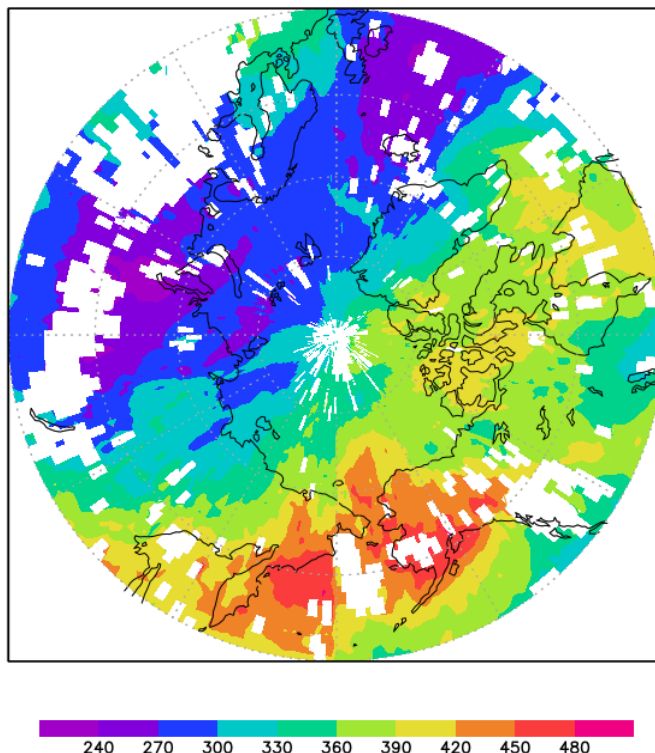


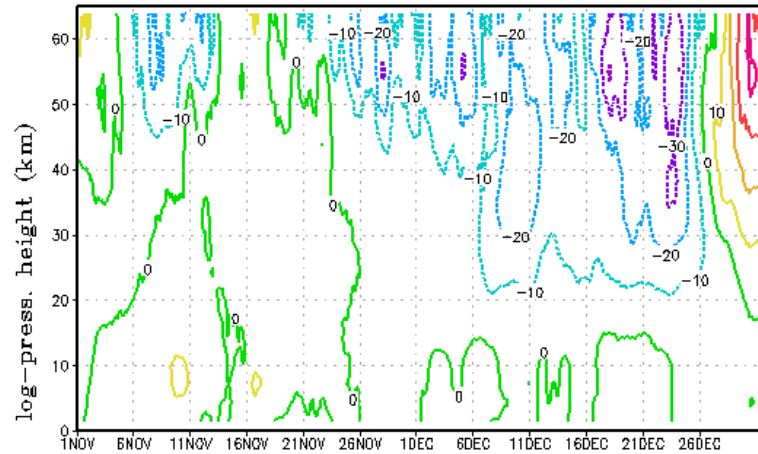
Рисунок 29. Концентрации озона 16 декабря 2017 г, ед.Д.

Минимальные значения озона – менее 240 ед.Д., наблюдались над территорией Западной Сибири.

Анализ аномалий зональной составляющей ветра и температуры (Рис. 30).

Осцилляции ветра на высоте 45 км составила -20 м/с (Рис. 30, верхняя панель). Что говорит о неустойчивом вихре и смене направлений ветра с западного на восточное. Температура на высоте 45 км была сильно близка к климатической норме (Рис. 30, нижняя панель). Внезапного стратосферного потепления не наблюдалось.

Zonal wind (m/s) – CLIMATE, LAT=62.5N 2016, NOV–DEC 2017



Temperature (K) – CLIMATE, LAT=77.5N, NOV–DEC 2017

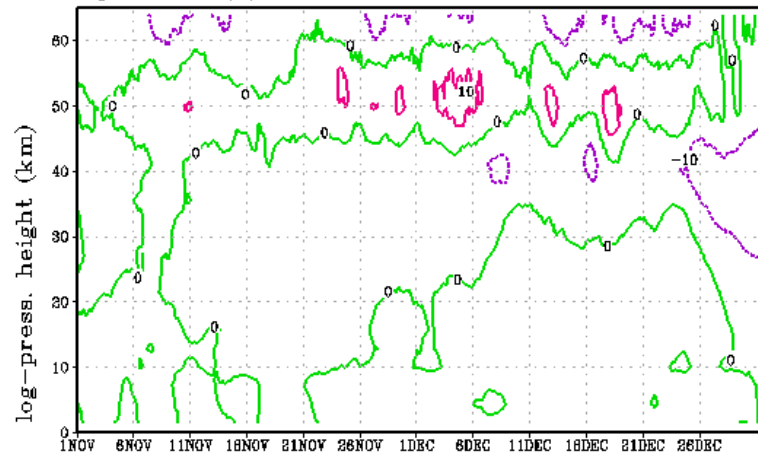


Рисунок 30. Высотно-временное распределение аномалии среднего зонального ветра (м/с) на 62,5° с.ш. (верхняя панель), и аномалии температуры (К) на 77,5° с.ш. (нижняя панель) за ноябрь–декабрь 2017 г.

Анализ колебаний амплитуды планетарной волны с $m=1$ (Рис. 31).

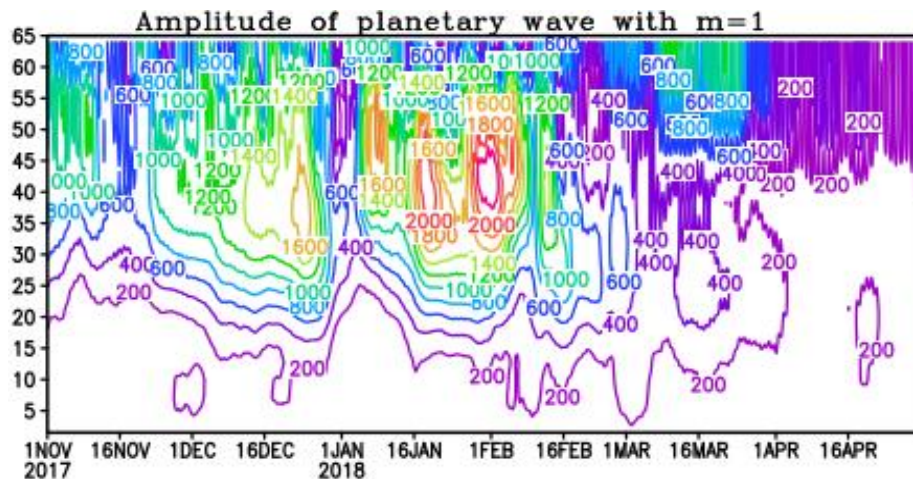


Рисунок 31. Колебания амплитуды планетарной волны с $m=1$ в поле геопотенциальной высоты в период с ноября 2017 по апрель 2018 г, на 62,5° с.ш, м.

Приблизительно за 2 недели до смещения вихря на территорию России (с 16 по 20 декабря) наблюдались небольшие колебания амплитуды волны (с 23 ноября по 8 декабря) с максимальными значениями 1200 м, на высоте 45 км.

7. Декабрь 2018 г.

График поля геопотенциальной высоты, осредненного за месяц, в Приложении (Рис. 32).

Случай был разделен на периоды по 5 дней, как и в предыдущих ситуациях, и выбранный период, когда вихрь был максимально смещен на территорию России – с 16 по 20 декабря (Рис. 33).

Geopotential height, lev 30 km, 16–20 DEC 2018

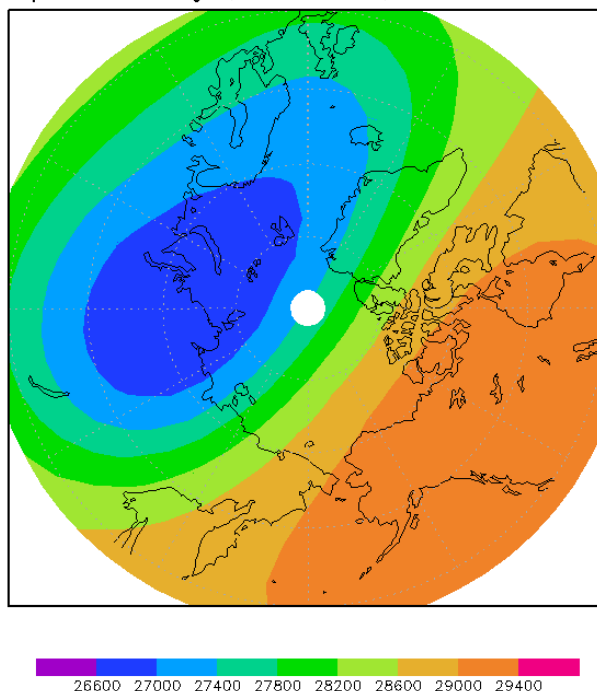


Рисунок 33. Поле геопотенциальной высоты в период с 16 по 20 декабря 2018 г, гп.м. Высота 30 км.

Минимальное значение давления в центре вихря – менее 27000 гп.м.

Оценив концентрации озона в каждый день из выбранного периода, оказалось, что минимум озона наблюдался 18 декабря.

Ozone concentration, Dobson units, DEC 2018

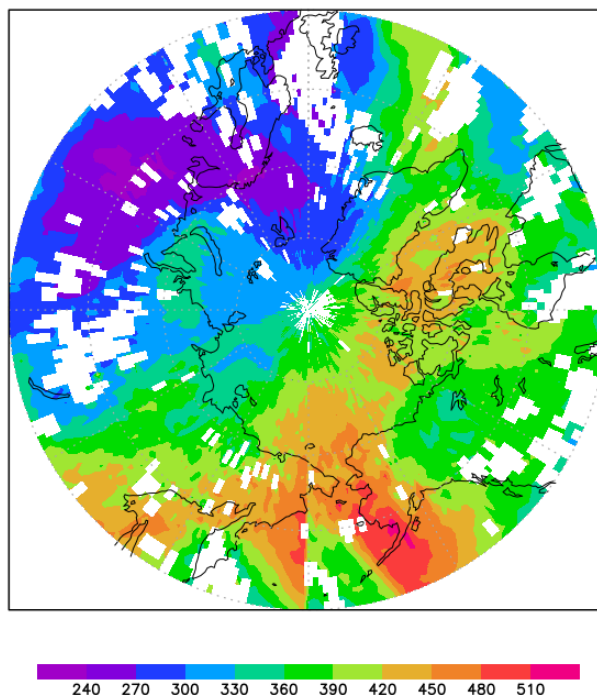


Рисунок 34. Концентрации озона 18 декабря 2018 г, ед.Д.

Минимальные концентрации озона наблюдались в районе Урала и составили менее 240 ед.Д.

Анализ аномалий зональной составляющей ветра и температуры (Рис. 35).

Осцилляция ветра на высоте 45 км составила -20 м/с (Рис.35 верхняя панель). Что говорит о неустойчивом вихре и смене направлений ветра с западного на восточное. Температура на высоте 45 км была сильно близка к климатической норме (Рис. 35, нижняя панель). Внезапного стратосферного потепления не наблюдалось.

Ситуация схожа с декабрем 2017 г.

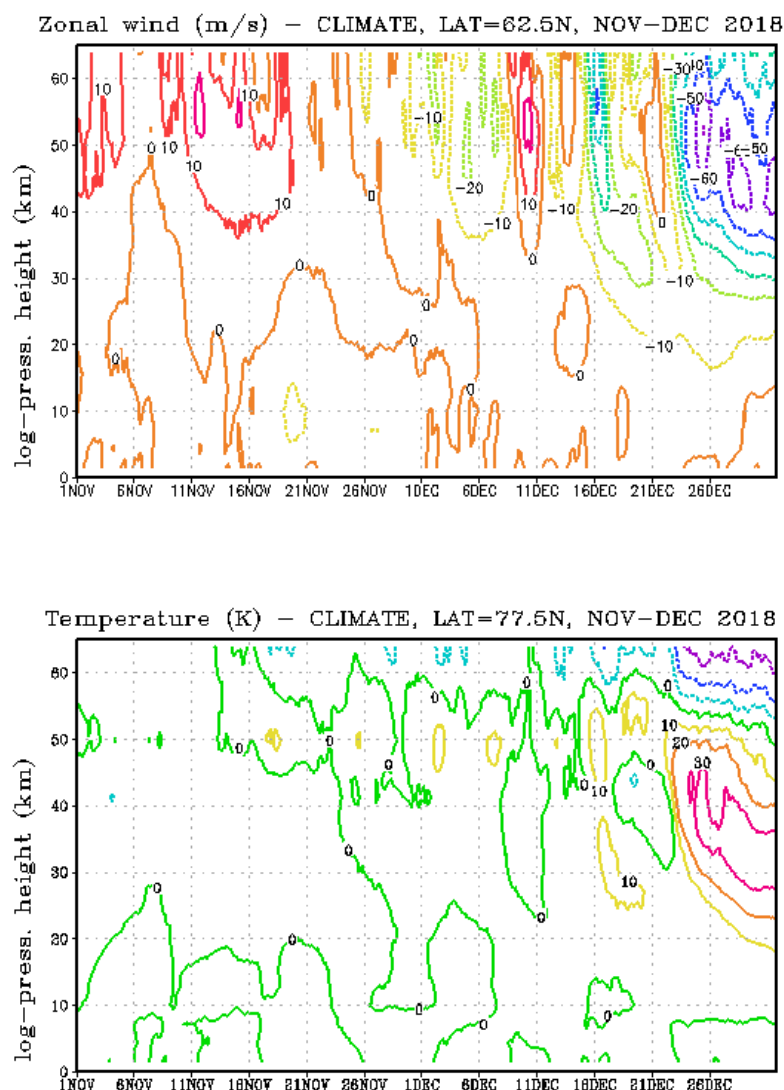


Рисунок 35. Высотно-временное распределение аномалии среднего зонального ветра (м/с) на $62,5^\circ$ с.ш. (верхняя панель), и аномалии температуры (К) на $77,5^\circ$ с.ш. (нижняя панель) за ноябрь-декабрь 2018 г.

Анализ колебаний амплитуды планетарной волны с $m=1$ (Рис. 36).

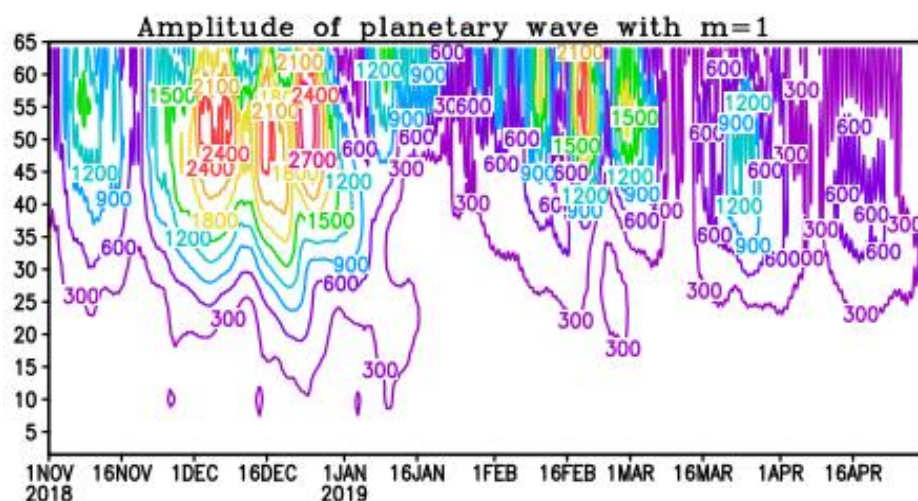


Рисунок 36. Колебания амплитуды планетарной волны с $m=1$ в поле геопотенциальной высоты в период с ноября 201 по апрель 2019 г, на $62,5^\circ$ с.ш, м.

С 23 ноября по 8 декабря, примерно на высоте 45 км, наблюдалось возрастание амплитуды волны, максимальное значение наблюдалось 2 и 5 декабря и составило 2400 м. Сразу после первого возрастания началось второе, которое наблюдалось с 10 по 19 декабря, то есть в момент смещения вихря на территорию России, а максимальное значение наблюдалось 16 декабря и составило 2400 м.

8. Декабрь 2019 г.

График поля геопотенциальной высоты, осредненного за весь месяц, в Приложении (Рис. 37).

Так же, как и в предыдущих случаях, был выбран период, когда вихрь был максимально смещен на территорию России – с 11 по 15 декабря (Рис. 38).

Geopotential height, lev 30 km, 11–15 DEC 2019

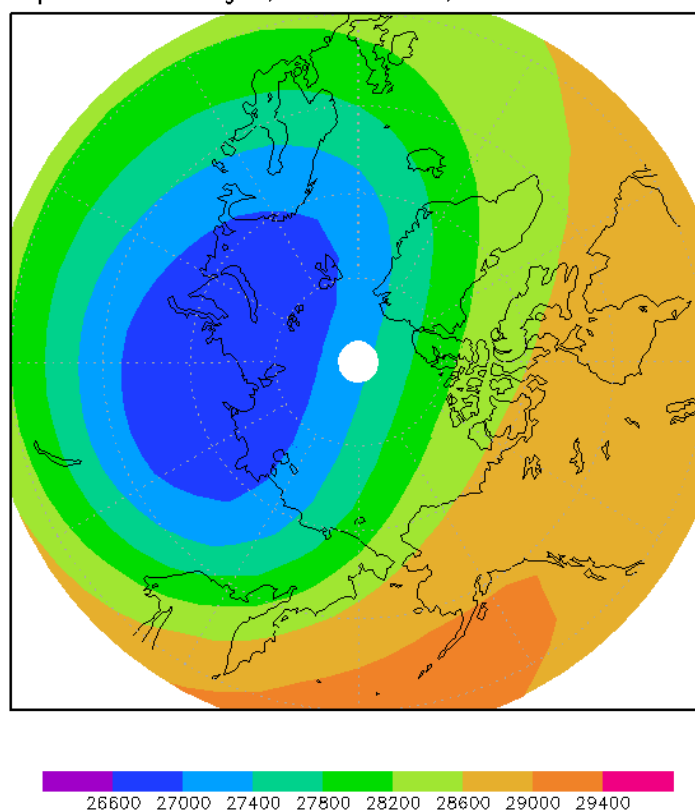


Рисунок 38. Поле геопотенциальной высоты в период с 11 по 15 декабря 2019 г, гп.м. Высота 30 км.

В центре вихря минимум давления составил менее 27000 гп.м.

Для каждого дня из выбранного периода были оценены концентрации озона. 13 декабря наблюдались самые низкие концентрации (Рис. 39).

Ozone concentration, Dobson units, DEC 2019

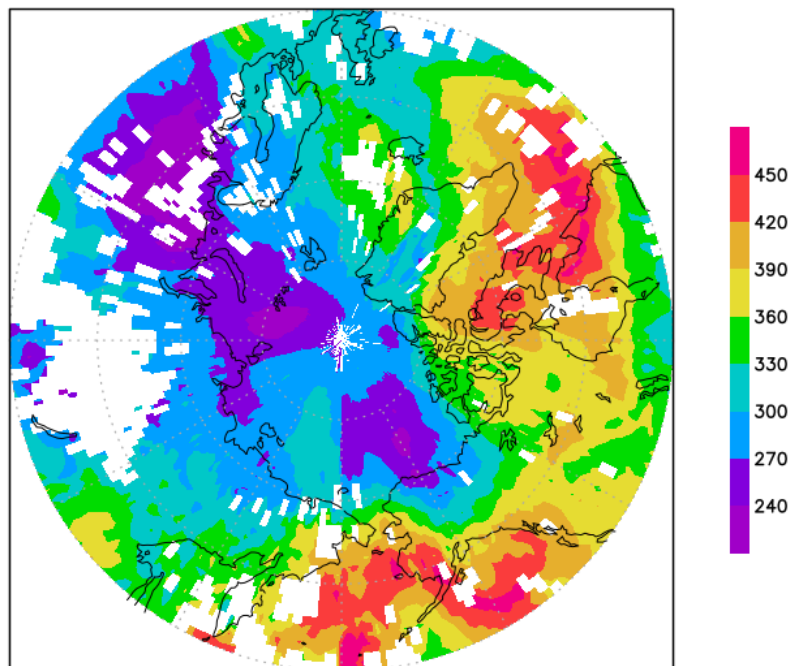


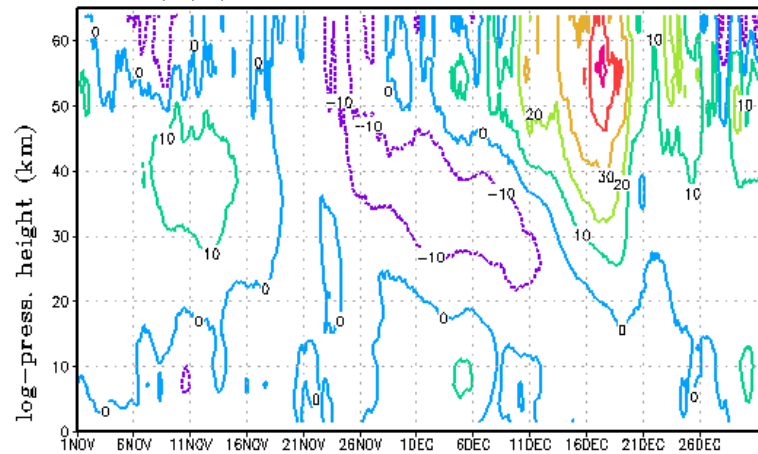
Рисунок 39. Концентрации озона 13 декабря 2019 г, ед.Д.

Минимум озон наблюдался над территорией Урала и Центральной России и значения опускались ниже 240 ед.Д.

Анализ аномалий зональной составляющей ветра и температуры (Рис. 40).

В момент смещения вихря на территорию России аномалия зональной составляющей ветра была 20 м/с, на высоте 45 км (Рис. 40, верхняя панель), что выше климатической нормы. Вихрь был устойчивый. А аномалия температуры -10 К, на высоте 45 км (Рис. 40, нижняя панель), что ниже климатической нормы.

Zonal wind (m/s) – CLIMATE, LAT=62.5N 2016, NOV–DEC 2019



Temperature (K) – CLIMATE, LAT=77.5N, NOV–DEC 2019

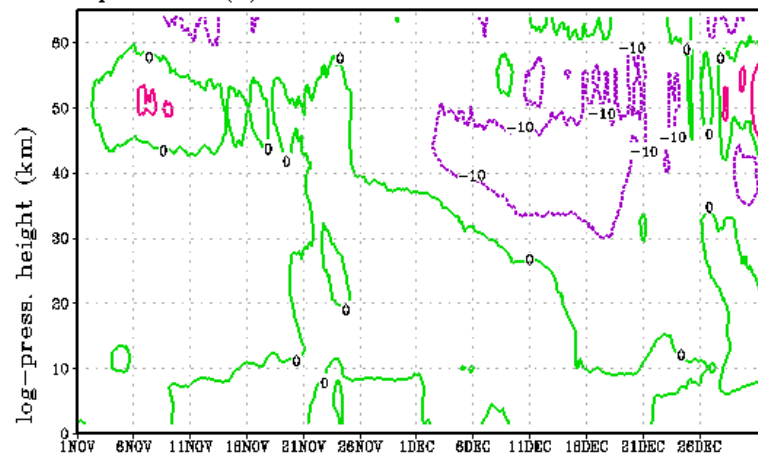


Рисунок 40. Высотно-временное распределение аномалии среднего зонального ветра (м/с) на 62,5° с.ш. (верхняя панель), и аномалии температуры (К) на 77,5° с.ш. (нижняя панель) за ноябрь–декабрь 2019 г.

Анализ колебаний амплитуды планетарной волны с $m=1$ (Рис. 41).

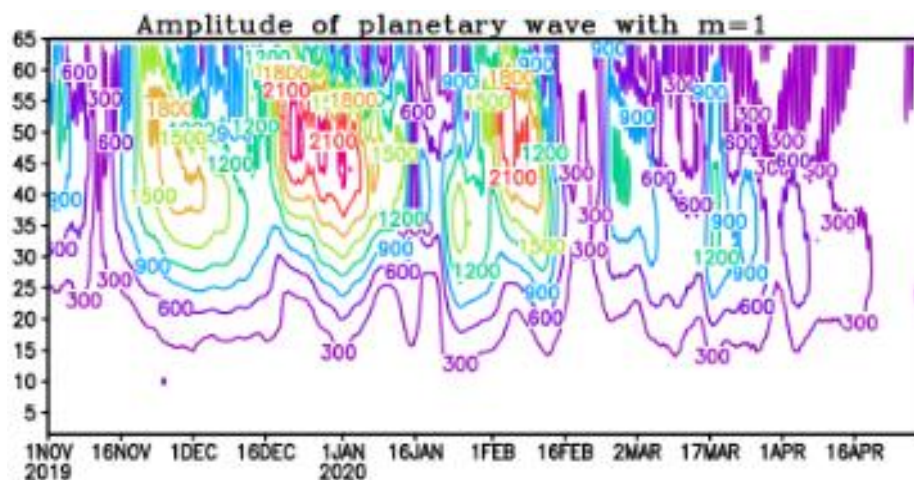


Рисунок 41. Колебания амплитуды планетарной волны с $m=1$ в поле геопотенциальной высоты в период с ноября 2019 по апрель 2020 г, на 62,5° с.ш, м.

Примерно за 2 недели (с 16 ноября по 8 декабря) до смещения вихря на территорию России (11-15 декабря) амплитуда волны возрастала, максимум наблюдался с 23 ноября по 1 декабря, на высоте 45 км, и составил 1800 м.

Проведя анализ для всех вышеописанных случаев, можно сделать вывод о том, что для 5 случаев (февраль 2014 г, январь 2016 г, март 2016 г, январь 2021 г, февраль 2023 г) причиной смещения Полярного стратосферного вихря на территорию Российской Федерации стало Внезапное стратосферное потепление. А для 3 случаев (декабрь 2017 г, декабрь 2018 г, декабрь 2019 г) причиной смещения, вероятно, стало колебание амплитуды планетарной волны с $m=1$. Однако, анализируя другие ситуации смещения вихря для декабря, выяснилось, что такая ситуация наблюдается не всегда. Например, в декабре 2013 г и в декабре 2014 г смещения вихря на территорию России не происходило вообще.

Также для более детального анализа причины смещения вихря были определены фазы КДК и фазы Эль-Ниньо-Южное колебание (Табл. 1).

Таблица 1. Фазы КДК и Южного колебания для каждого из выбранных случаев.

	ФАЗА КДК	ФАЗА Эль-Ниньо
1. ДЕК 2017	Восточная	Ла-Нинья
2. ДЕК 2018	Западная	Нейтральная
3. ДЕК 2019	Переход к восточной	Нейтральная
4. ЯНВ 2016	Западная	Эль-Ниньо
5. ФЕВ 2014	Западная	Нейтральная
6. МАР 2016	Западная	Эль-Ниньо
7. ЯНВ 2021	Переход к восточной	Ла-Нинья
8. ФЕВ 2023	Западная	Ла-Нинья

Как видно из таблицы, фаза Южного колебания не влияет на смещение вихря. А фаза КДК, напротив, влияет, в 7 из 8 случаев наблюдается западная фаза. В декабре 2019 и в январе 2021 года наблюдалось начало перехода к восточной фазе, значит, можно считать, что наблюдалась западная фаза. Значит, КДК оказывает сильное влияние на Полярный стратосферный вихрь.

Заключение

В данной работе были рассмотрены основные характеристики озона, причины смещения Полярного стратосферного вихря, а также причины разрушения озона.

Подводя итоги всей работы можно сделать вывод о том, что механизмы образования озоновых дыр, а также причины смещения и деформации Полярного стратосферного вихря не до конца изучены.

В процессе данной работы были сделаны следующие выводы:

- Было рассмотрено 10 зимних периодов (ноябрь-март 2013-2023). Из них были выявлены наиболее интересные 8 случаев, в которых Стратосферный полярный вихрь был сильно смещен на территорию Российской Федерации (февраль 2014, февраль 2016, март 2016, декабрь 2017, декабрь 2018, декабрь 2019, декабрь 2020, январь 2021);
- Во всех перечисленных случаях концентрации озона варьировались от 270 до 240 ед.Д;
- В 5 случаях (февраль 2014, февраль 2016, март 2016, декабрь 2020, январь 2021) причиной смещения вихря стало внезапное стратосферное потепление;
- В трех случаях (декабрь 2017, декабрь 2018, декабрь 2019) причиной смещения стали колебания амплитуды планетарной волны с $m=1$;
- Ни в одном из рассмотренных случаев не наблюдались концентрации озона меньше 200 ед.Д, то есть озоновые дыры.

Тем не менее работа актуальна, так как истощение озонового слоя ведет к образованию озоновых дыр и, как следствие, к увеличению потока ультрафиолетового излучения к поверхности Земли, а также это может приводить к изменению климата. Анализ причин и ситуаций, наблюдающихся в

атмосфере, которые вызывают истощение озонового слоя необходимы для прогнозирования ситуаций, ведущих к образованию озоновых дыр.

Список литературы

1. Кашкин В. Б., Хлебопрос Р. Г. Озоновые дыры - «Дети» стратосферных вихрей // Наука из первых рук. 2007. №1 (13).
2. Озон в атмосфере: химия и процессы разрушения [Электронный ресурс] // Центр. прибреж. физич. океанографии Олд Доминион ун-та (ССРО). – URL: http://www.ccpo.odu.edu/SEES/ozone/class/Chap_5/5_2.htm (дата обращения: 06.06.2025).
3. Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data [Электронный ресурс] / NASA Goddard Space Flight Center // NASA Ozone Watch. – URL: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 06.06.2025).
4. Иванов А.А., Петров Б.С. Взаимодействие системы "атмосферный озон – климат" // Журнал экологической физики. 2011. № 4 (98), С. 12–30.
5. Егоров Валерий Михайлович МИФ ОБ ОЗОНЕ // Проблемы Науки. 2023. №7 (185).
6. Solomon S. Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history // Reviews of Geophysics. 2006. Vol. 37, № 3. P. 275–316.
7. Кашкин В. Б. Исследование антарктического озонового циркумполярного вихря с использованием данных спутникового дистанционного зондирования // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2015. №2.
8. A.A. Cheremisin, A.V. Kushnarenko, V.N. Marichev, S.V. Nikolashkin, P.V. Novikov., 2014: Arctic polar stratospheric vortex and clouds. <http://www.scert.ru/f/219/MainPart/Podnebesnyh.pdf>
9. Rebecca Lindsey, Understanding the Arctic polar vortex, 2021. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/understanding-arcticpolar-vortex>

10. Руднева Марина Александровна, Кочеткова Ольга Сергеевна, Мордвинов Владимир Иванович Долговременные изменения внезапных стратосферных потеплений // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2013.
11. Baldwin, M.; Birner, T.; Brasseur, G.; Burrows, J.; Butchart, N.; Garcia, R.; Geller, M.; Gray, L.; Hamilton, K.; Harnik, N.; et al. 100 Years of Progress in Understanding the Stratosphere and Mesosphere. Meteorol. Monogr. 2019, 59, 27.1–27.61.
12. Matsuno, T. A dynamical model of stratospheric sudden warming. J. Atmos. Sci. 1971, 28, 1479–1494.
13. Pogoreltsev, A.; Savenkova, E.; Aniskina, O.; Ermakova, T.; Chen, W.; Wei, K. Interannual and intraseasonal variability of stratospheric dynamics and stratosphere-troposphere coupling during northern winter. J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2015, 136, 187–200.
14. Albers, J.R.; Birner, T. Vortex Preconditioning due to Planetary and Gravity Waves prior to Sudden Stratospheric Warmings. J. Atmos. Sci. 2014, 71, 4028–4054.
15. Ern, M.; Trinh, Q.; Kaufmann, M.; Krisch, I.; Preusse, P.; Ungermann, J.; Zhu, Y.; Gille, J.; Mlynczak, M.; Russell, J., III; et al. Satellite observations of middle atmosphere gravity wave absolute momentum flux and of its vertical gradient during recent stratospheric warmings. Atmos. Chem. Phys. 2016, 16, 9983–10019.
16. О.С.Кочеткова, В.И. Мордвинов, М.А. Руднева Анализ факторов, влияющих на возникновение стратосферных потеплений // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 8 С. 719-726.
17. A.K.Smith, J.Perlwitz Middle Atmosphere | Planetary Waves <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00229-2>
18. Интернет-ресурс: <https://www.britannica.com/science/polar-vortex>

19. Charney, J. G., & Drazin, P. G. (1961). Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 66(1), 83–109. <https://doi.org/10.1029/JZ066i001p00083>.
20. Hu, D., Guan, Z., Tian, W., & Ren, R. (2018). Recent strengthening of the stratospheric Arctic vortex response to warming in the central North Pacific. *Nature Communications*, 9(1), 1697. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04138-3>
21. Bourassa A. E., Degenstein D. A., Llewellyn E. J. Polar Stratospheric Clouds: Satellite Observations, Processes and Role in Ozone Depletion // *Reviews of Geophysics*. 2021. Vol. 59, iss. 2.
22. S.Bekki, F.Lefevre, Stratospheric ozone: History and concepts and interactions with climate // *The European physical journal conferences*. 2009. P. 113-136.
23. Кашкин В. Б., Рублева Т. В. Исследование трендов спутниковых оценок общего содержания озона с использованием сингулярного спектрального анализа // *Исследование Земли из космоса*. 2009. № 4. С. 9–16
24. Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) [Электронный ресурс] / Global Modeling and Assimilation Office, NASA Goddard Space Flight Center. - Greenbelt, MD: NASA, 2024. - URL: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/> (дата обращения: 06.06.2025).
25. Bosilovich, M. G., R. Lucchesi, and M. Suarez, 2016: MERRA-2: File Specification. GMAO Office Note No. 9 (Version 1.1), 73 pp, available from http://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/office_notes.
26. A-Train Symposium Team *Aqua and A-Train: 10 Years of Advances in Earth Observations*: technical report / NASA A-Train Program Office. Pasadena, CA: NASA Jet Propulsion Laboratory, 2012. 42 p. (NASA/JPL Publication 12-5).
27. NASA Goddard Space Flight Center Quasi-Biennial Oscillation (QBO) Data [Электронный ресурс] / Atmospheric Chemistry and Dynamics Laboratory.

Greenbelt, MD: NASA, 2024. URL: https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/qbo/#intro (дата обращения: 06.06.2025).

28. Newman, P. A., L. Coy, S. Pawson, and L. R. Lait (2016), The anomalous change in the QBO in 2015–2016, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 8791–8797, doi:10.1002/2016GL070373.

29. NOAA Physical Sciences Laboratory Multivariate ENSO Index (MEI) [Электронный ресурс] / U.S. Department of Commerce. — Boulder, CO: NOAA, 2024. — URL: <https://psl.noaa.gov/enso/mei/> (дата обращения: 06.06.2025).

30. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) El Niño and La Niña [Электронный ресурс]: educational resource collection / U.S. Department of Commerce. Silver Spring, MD: NOAA, 2024. URL: <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/weather-atmosphere/el-nino> (дата обращения: 06.06.2025).

31. NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory What is El Niño? [Электронный ресурс] / U.S. Department of Commerce. Seattle, WA: NOAA PMEL, 2024. URL: <https://www.pmel.noaa.gov/el-nino/what-is-el-nino> (дата обращения: 06.06.2025).

32. NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL) What is La Niña? [Электронный ресурс] / U.S. Department of Commerce. Seattle, WA: NOAA PMEL, 2024. URL: <https://www.pmel.noaa.gov/el-nino/what-is-la-nina> (дата обращения: 06.06.2025).

33. Никифоров Е.Г., Варгин П.Н., Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лукьянов А.Н. Озоновая «Мини-дыра» над севером Урала и Сибири // Труды Гидрометцентра России. 2016. С. 168-180.

Приложение

Geopotential height, lev 30 km, 1–28 FEB 2014

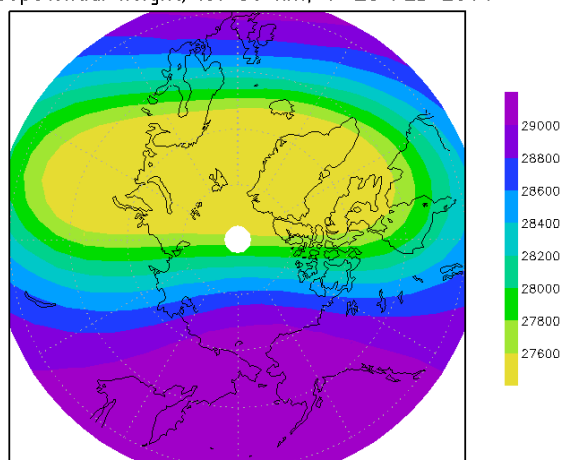


Рисунок 1. Поле геопотенциальной высоты, осредненное за весь февраль 2014 г, гп.м.
Высота 30 км.

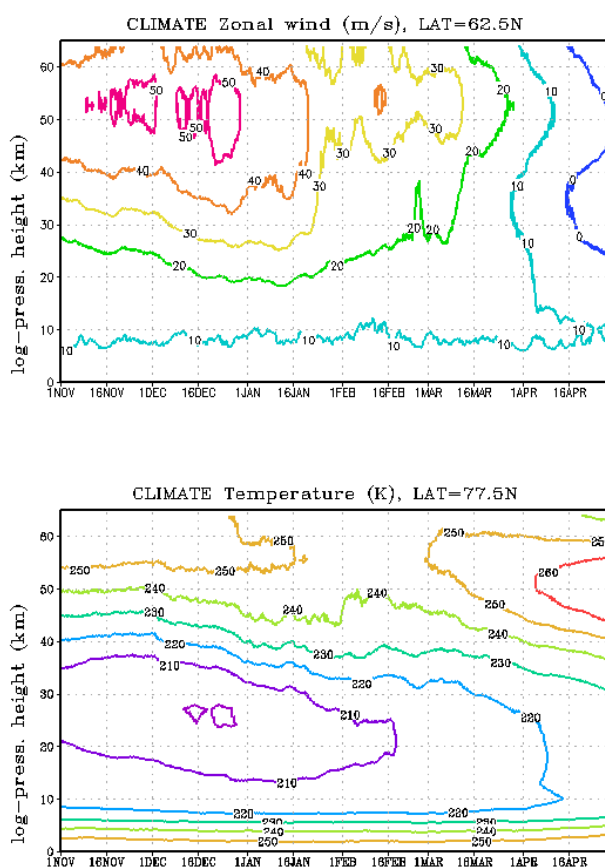


Рисунок 4. Осредненное за 1995-2024 г. высотно-временное распределение зонального ветра (м/с) на 62,5° с.ш. (верхняя панель), и температуры (К) на 77,5° с.ш. (нижняя панель) за ноябрь-апрель.

Geopotential height, lev 30 km, 1–30 JAN 2016

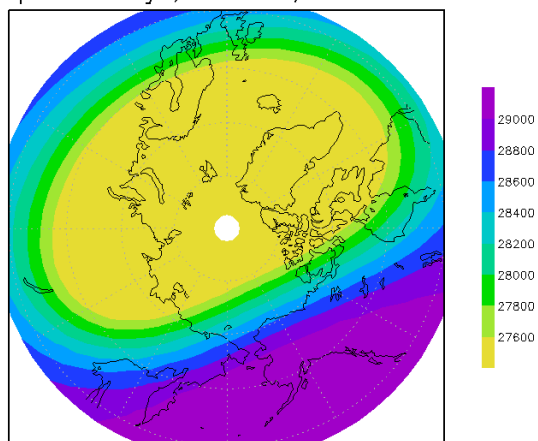


Рисунок 7. Поле геопотенциальной высоты, осредненное за весь январь 2016 г, гп.м. Высота 30 км.

Geopotential height, lev 30 km, 1–30 MAR 2016

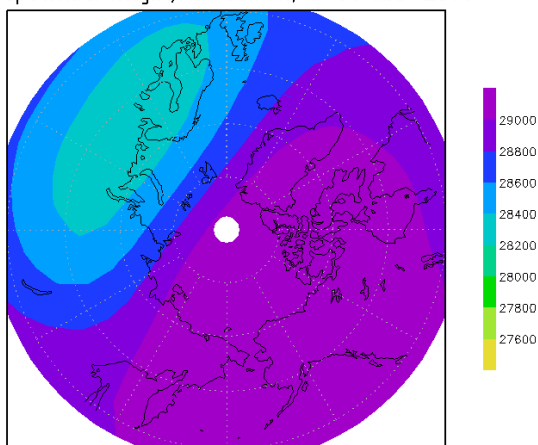


Рисунок 12. Поле геопотенциальной высоты, осредненное за весь март 2016 г, гп.м. Высота 30 км.

Geopotential height, lev 30, JAN 2021

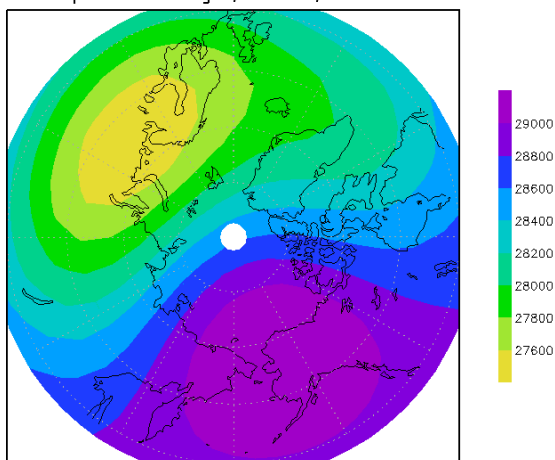


Рисунок 17. Поле геопотенциальной высоты, осредненное за весь январь 2021 г, гп.м. Высота 30 км.

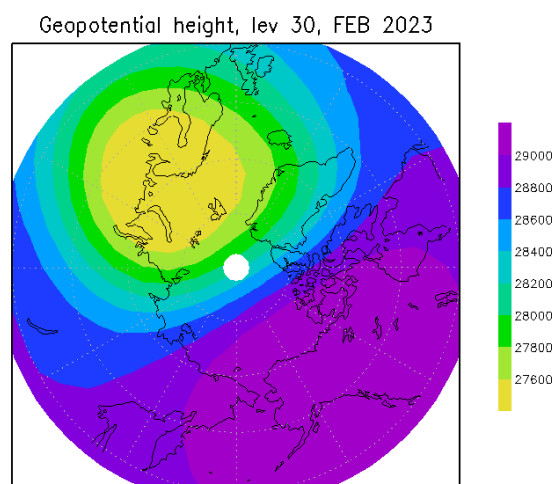


Рисунок 22. Поле геопотенциальной высоты, осредненное за весь февраль 2023 г, гп.м.
Высота 30 км.

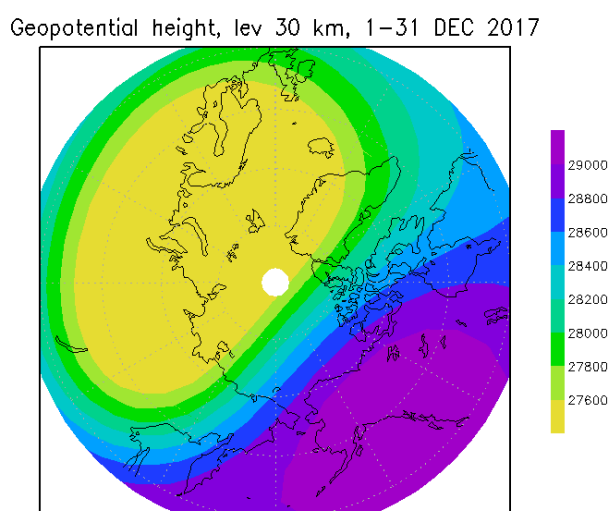


Рисунок 27. Поле геопотенциальной высоты, осредненное за весь декабрь 2017 г, гп.м.
Высота 30 км.

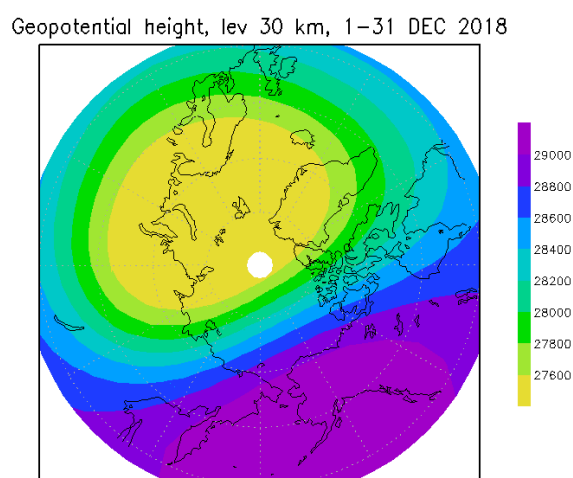


Рисунок 32. Поле геопотенциальной высоты, осредненное за весь декабрь 2018 г, гп.м.
Высота 30 км.

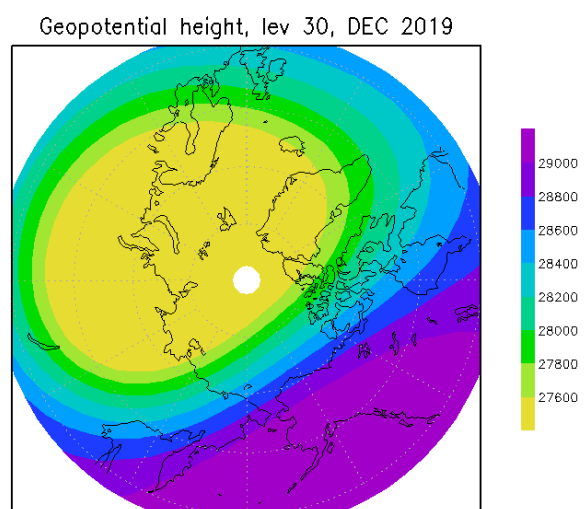


Рисунок 37. Поле геопотенциальной высоты, осредненное за весь декабрь 2019 г, гп.м.
Высота 30 км.