



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: «Океан и атмосфера: аспекты взаимодействия»

Исполнитель Сапогова Анна Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

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

Топтунова Ольга Николаевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 10 » июня 2024 г.

Санкт-Петербург
2025

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Взаимодействие стратосферных и тропосферных процессов в климатической системе	5
1.1 Эль-Ниньо Южное колебание и его глобальные эффекты.....	5
1.2 Циркуляция Брюера-Добсона как основной механизм стратосферного переноса.....	10
1.3 Квазидвухлетнее колебание и его роль в динамике атмосферы	12
1.4 Стратосферный полярный вихрь	15
Глава 2. Данные для анализа.....	20
2.1 Индекс MEI.v2	20
2.2 Данные квазидвухлетнего колебания	22
2.3 Реанализ MERRA-2.....	24
Глава 3. Методы и анализы расчётов	25
3.1 Норма распределения озона в стратосфере.....	25
3.2 Аномалии содержания озона	28
3.3 График ящик с усами	51
Заключение	59
Список литературы	61

Введение

Взаимодействие океана и атмосферы охватывает множество аспектов, таких как теплообмен, циркуляция воздушных масс, формирование облачности и осадков, а также химические процессы. В данной работе основное внимание уделяется влиянию фаз Эль-Ниньо Южного колебания и квазидвухлетнего колебания на состояние стратосферного вихря и озонового слоя.

Главным элементом, который связывает эти процессы, является циркуляция Брюера-Добсона - глобальный механизм переноса воздушных масс в стратосфере. Она играет ключевую роль в распределении озона и других химических соединений, а также в формировании стратосферных вихрей. Изменения интенсивности и направления циркуляции Брюера-Добсона, вызванные фазами ЭНЮК и КДК, могут приводить к значительным аномалиям в содержании озона и динамике стратосферы.

Целью данной работы является исследование влияния различных фаз ЭНЮК и фаз квазидвухлетнего колебания на состояние стратосферного вихря, с акцентом на изменения в распределении озона. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ архивных данных индексов MEI.v2 и КДК за период 1980-2024 гг.
2. Исследовать влияние фаз ЭНЮК и КДК на распределение озона, на основе данных реанализа MERRA-2.
3. Оценить влияние различных фаз ЭНЮК и КДК на содержание озона.

Научная новизна исследования заключается в комплексном анализе взаимодействия океанических и атмосферных процессов, включая их влияние на стратосферный вихрь и озоновый слой, с использованием современных методов обработки данных и моделирования.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения полученных результатов для улучшения климатических моделей и прогнозирования изменений в стратосфере, что может быть полезно для оценки долгосрочных климатических тенденций и их последствий.

Структура работы соответствует поставленным задачам и включает введение, три главы, заключение и список литературы. В первой главе рассматриваются теоретические основы взаимодействия процессов тропосферы и стратосферы, во второй - данные исследования, а в третьей - методы исследования и анализ результатов.

Глава 1. Взаимодействие стратосферных и тропосферных процессов в климатической системе

1.1 Эль-Ниньо Южное колебание и его глобальные эффекты

Эль-Ниньо Южное колебание (ЭНЮК) — это совместное изменение температуры поверхности океана (ТПО) и атмосферного давления. Оно признано самым сильным межгодовым колебанием глобальной климатической системы. ЭНЮК состоит из нескольких фаз: тёплой фазы Эль-Ниньо, которая чаще всего сменяется холодной — Ла-Нинья. Отрицательная фаза южного колебания соответствует положительной фазе Эль-Ниньо, а положительная — отрицательной Ла-Нинья. Если никакие аномалии не наблюдаются, то проходит нейтральная фаза [1]. При изменении ТПО в экваториальной зоне Тихого океана происходят сдвиги в глубинной конвекции атмосферы, которые приводят к корректировке глобальной циркуляции Уокера [2].

Южное колебание (ЮК) — колебание приземного давления между юго-восточной частью Тихого океана и зоной Северной Австралии и Индии. ЮК тесно связано с изменениями температуры поверхности моря, интенсивностью пассатов и количеством осадков. Измерение давления происходит на уровне моря между станциями на о. Таити и в г. Дарвине [3].

Обычно в Тихом океане восточные пассаты дуют на запад вдоль экватора и переносят тёплые воды из Северной и Южной Америки в сторону Азии. В процессе апвеллинга из глубин поднимается холодная вода, чтобы заменить тёплые воды. Эль-Ниньо и Ла-Нинья нарушают эти условия, например, из-за незначительных колебаний пассатов, циклонов в западной части Тихого океана или случайных изменений водных течений. Периоды этих явлений составляют от 9 до 12 месяцев, а появляются они каждые 2-7 лет [4]. Рисунок 1 наглядно показывает разницу между Эль-Ниньо и Ла-Нинья в отношении температур, давления, альбедо и ветров.

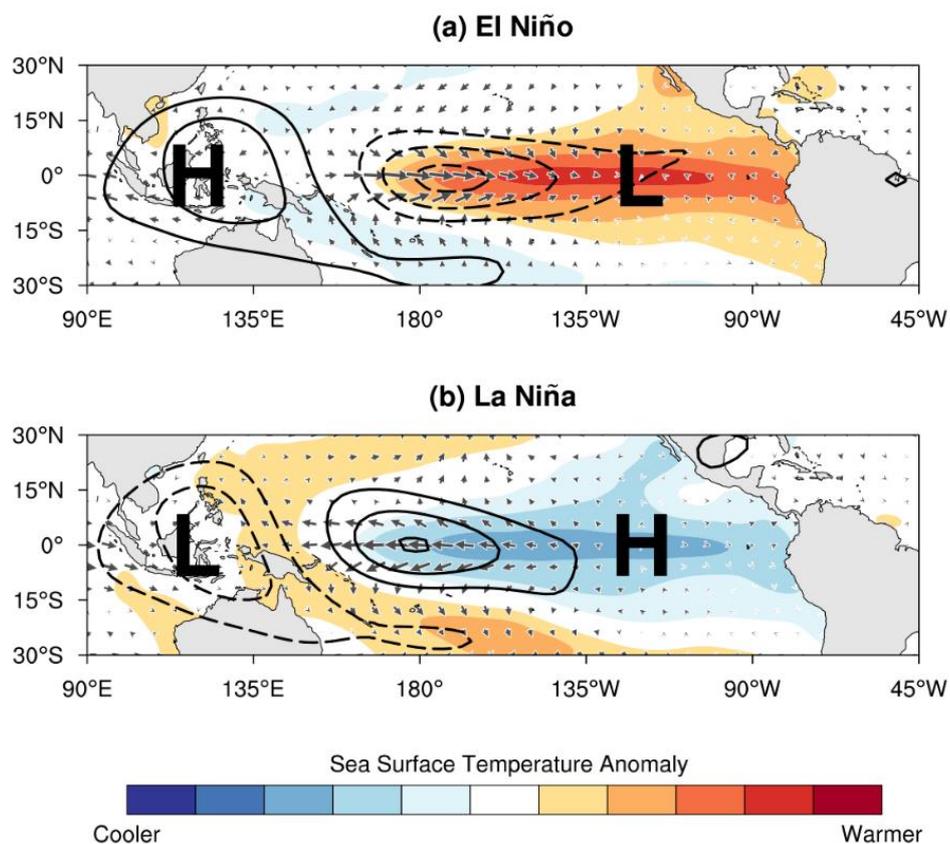


Рисунок 1. Схематическое изображение температуры поверхности моря (заштрихована), альbedo (контуры), поверхностные зональные и меридиональные ветры (векторы) и давление на уровне моря (обозначено буквами «Н» и «L», которые указывают на центр высокого и низкого давления соответственно) при явлениях Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Во время Эль-Ниньо поверхностные воды в тропических регионах центральной и восточной части Тихого океана становятся теплее, чем обычно (рисунок 2). Это изменение связано с атмосферой и ветрами, дующими над Тихим океаном. Восточные пассаты ослабевают и иногда могут смениться на западные ветры. Огромные массы тёплой воды перемещаются из западной части Тихого океана в сторону Северной и Южной Америки, поэтому термоклин углубляется. Уменьшается подъём холодных глубинных вод, останавливая или меняя направление течений вокруг экватора и вдоль западного побережья Южной и Центральной Америки.

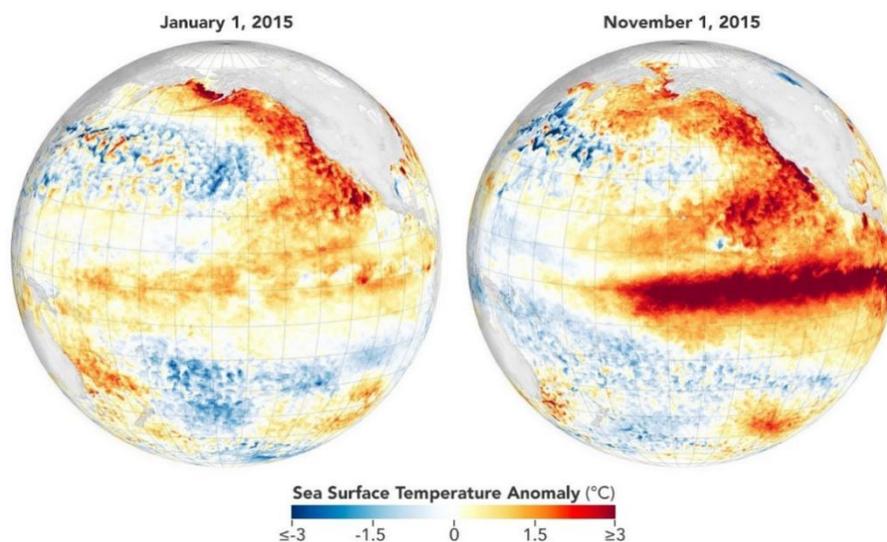


Рисунок 2. Повышение ТПО при Эль-Ниньо видно за ноябрь 2015 года.

После всех этих изменений в засушливых регионах Перу, Чили, Мексики и юго-западе США часто идут дожди и выпадает снег. Так как высокие температуры приводят к тому, что воздух у поверхности поднимается (восходящие движения), увлажняется и становится конвективным. А более влажные регионы Амазонии и северо-востока США пребывают в многомесячных засухах. Из-за того, что над более прохладной частью океана воздух начинает опускаться (нисходящие движения) и высыхать.

Недавние исследования показывают, что классический Эль-Ниньо стал возникать реже. В конце XX века стал более распространённым другой тип Эль-Ниньо. Его тёплые температуры поверхности моря в центральной части Тихого океана сопровождаются более низкими температурами на востоке и западе. Этот тип Эль-Ниньо, называемый Эль-Ниньо Модоки, отличается от канонического Эль-Ниньо расположением максимальных аномалий ТПО и их интенсивностью (более низкой), а также последующими климатическими изменениями [6]. Разница ТПО двух типов показана на рисунке 3.

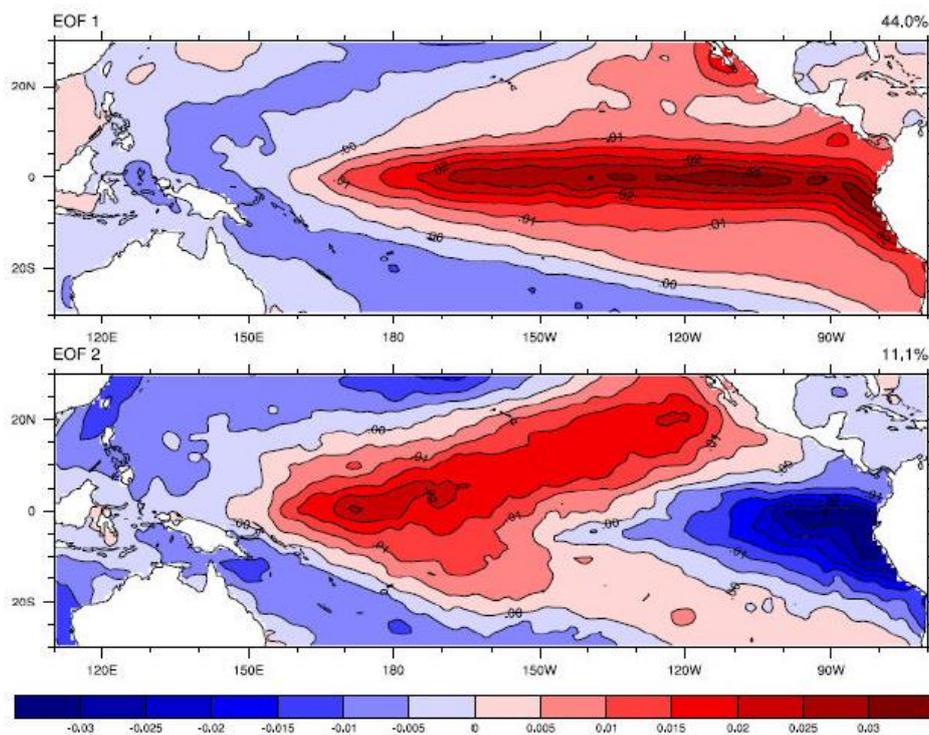


Рисунок 3. ТПО при Эль-Ниньо (сверху) и Эль-Ниньо Мадоки (внизу).

Во время явления Ла-Ниньо пассаты становятся сильнее, они выталкивают больше тёплой воды в сторону Азии. Апвеллинг у западного побережья Америки усиливается, вынося на поверхность холодные богатые питательными веществами воды, из-за чего термоклин поднимается. в Тихом океане эти воды направляют струйное течение на север. На рисунке 4 показано влияние этих условий на ТПО.

Явление приводит к засухе на юге США. Потому что усиливаются нисходящие движения и уменьшаются конвективные потоки. Образуются обильные дожди и наводнения на северо-западе Тихоокеанского региона и в Канаде. Так как усиливаются восходящие движения и увеличивается количество конвективных потоков. Ла-Нинья также может привести к более сильному сезону ураганов [4].

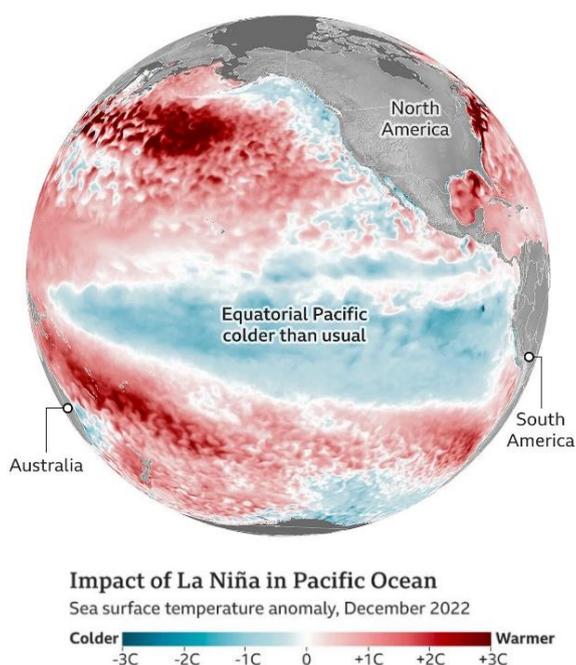


Рисунок 4. Понижение ТПО при Ла-Нинья за декабрь 2022 года.

Эль-Ниньо, как правило, характеризуются более широким диапазоном продольного расположения максимальной аномалии температуры поверхности моря в экваториальной части Тихого океана. А события Ла-Нинья обычно достигают пика в более западной части экваториальной части Тихого океана [2].

События Эль-Ниньо и Ла-Нинья в тропической части Тихого океана оказывают значительное воздействие на глобальную циркуляцию атмосферы и океана. ЭНЮК в основном влияет на климат в тропической части Тихого океана, но массивное перераспределение температуры океана, облаков, осадков и ветров может повлиять на погодные условия в других частях света [5]. Стоит отметить, что при Эль-Ниньо конвекция сильнее, чем при Ла-Нинья.

Воздействие ЭНЮК также распространяется выше тропосферы, влияя на состав и циркуляцию стратосферы в тропиках. Про влияние на состав стратосферы мы поговорим сейчас, а циркуляцию рассмотрим в следующем параграфе.

По данным спутников и климатических моделей Эль-Ниньо приводит к снижению уровня озона в тропической нижней стратосфере. При сильном событии изменения концентрации озона могут достигать 15%. Это снижение

связано с аномально сильным тропическим переносом воздушных масс, который переносит воздух с низким содержанием озона в нижнюю стратосферу. В верхней стратосфере Эль-Ниньо приводит к увеличению концентрации озона из-за фотохимических и динамических процессов. Ла-Нинья наоборот: увеличивает уровень озона в тропической нижней стратосфере [2].

1.2 Циркуляция Брюера-Добсона как основной механизм стратосферного переноса

В первых исследованиях понятие «Циркуляция Брюера-Добсона» использовалось для описания глобальной массовой циркуляции. Согласно которой, тропосферный воздух поднимется в стратосферу в тропиках, затем движется к полюсам и опускается в средних и высоких широтах. Эту модель выдвинули Алан Брюер и Гордон Добсон для наблюдения за озоном и водяным паром, хотя их обсуждения со стороны физики не смогли полностью подкрепиться теорией. В настоящее время этот термин используется для обозначения основных особенностей среднего массового переноса в стратосфере и не привязывается к какой-то конкретной модели [7].

Циркуляция Брюера-Добсона (ЦБД) определяет перенос и время пребывания в атмосфере основных радиационно-активных парниковых газов и оказывает дополнительное влияние на климат на поверхности за счёт нисходящей связи. Нижняя часть стратосферы (10–25 км) является главным регионом в условиях меняющегося климата. Количество её основных парниковых газов (озон и водяной пар) регулируется адвекцией, перемешиванием и химическими процессами. Озон в основном образуется в стратосфере (10–50 км) и напрямую зависит от интенсивности стратосферной циркуляции в тропиках.

При разрушение планетарных волн Россби и гравитационных волн передаётся импульс, вызывающий меридиональный (с севера на юг) перенос

массы. Стратосферная средняя меридиональная циркуляция (ЦБД) определяется как медленная циркуляция, при которой поднимающиеся в тропиках воздушные массы перемещаются в стратосфере к полюсам и опускаются в средних и высоких широтах через её малую и глубокую ветви.

Вызванный разрушением волн в стратосфере и изменяющийся в субсезонных и десятилетних временных масштабах, ЦБД модулируется естественной изменчивостью, включая Эль–Ниньо Южное колебание [8].

Большинство исследований прямого влияния ЭНСО на ЦБД сосредоточены на изменениях интенсивности тропического апвеллинга и механизмах (взаимодействие волн со средним потоком), которые приводят к её ускорению или замедлению. При Эль–Ниньо усиливается конвекция в тропиках, которая генерирует планетарные волны. Это ускоряет циркуляцию Брюэра–Добсона и охлаждает экваториальную стратосферу. Во время Ла–Нинья происходит противоположный эффект [9].

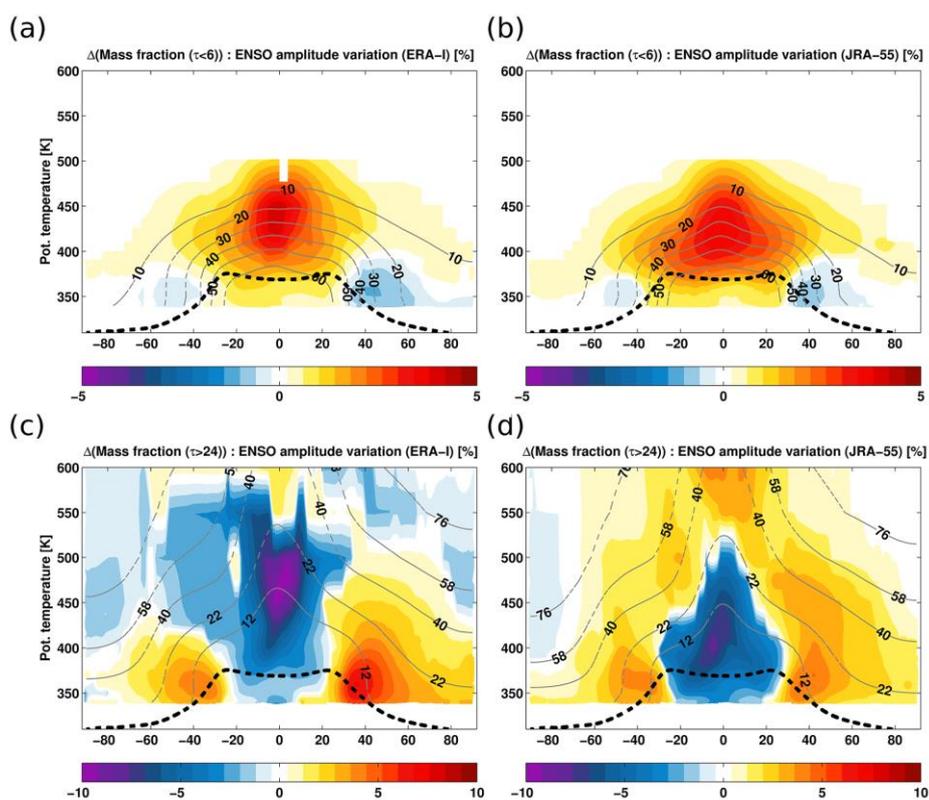


Рисунок 5. Влияние Эль–Ниньо на молодые и старые воздушные массы, время транзита <6 месяцев (a, b) и >24 месяцев (c, d) соответственно.

Также было проведено исследование, одно из полученных изображений показано на рисунке 5. Во время Эль-Ниньо доля молодых воздушных масс со временем транзита менее 6 месяцев (а, b) увеличивается во всей тропической нижней стратосфере и распространяется к полюсам в слое от 400 до 500 К. Эти изменения доли молодых воздушных масс соответствуют усилению малой ветви. Напротив, при температуре ниже 400 К перенос молодого тропического воздуха к полюсам ослабевает. Таким образом, Эль-Ниньо явно усиливает малую ветвь ЦБД (420–500 К) и ослабляет переходную ветвь (370–420 К). Доли воздушных масс с временем транзита более 24 месяцев (с, d) последовательно демонстрируют значительное уменьшение в тропиках и значительное увеличение во внетропических зонах. Изменения, вызванные ЭНЮК, при температуре выше 600 К (не показано) менее заметны, следовательно, влияние ЭНЮК на ЦБД в основном ограничивается областью ниже — переходной и малой ветвями [9].

1.3 Квазидвухлетнее колебание и его роль в динамике атмосферы

В тропической стратосфере глубокие слои ветров, дующих с восточного и западного направлений, опоясывают земной шар и регулярно опускаются из верхних слоёв стратосферы в тропическую тропопаузу. Это квазидвухлетнее колебание (КДК), полный цикл которого обычно длится ~28 месяцев (одно из самых крупных струйных течений на планете). КДК влияет на климатические явления за пределами тропической стратосферы, в том числе на перенос озона.

Модели климата и прогнозирования всё чаще способны имитировать стратосферные колебания, напоминающие КДК, но демонстрируют распространённые систематические ошибки, такие как слабая амплитуда в нижней части тропической стратосферы. Неопределённость в отношении волн, вызывающих колебания, в частности потоков импульса от мелкомасштабных

гравитационных волн, возбуждаемых глубинной конвекцией, затрудняет их моделирование.

Ожидается, что более точное представление о процессах, управляющих КДК, приведёт к более точным прогнозам колебаний и их последствий, а также более надёжным прогнозам поведения КДК в условиях изменения климата [10].

Конвекция в тропической тропосфере создает широкий спектр волн, в том числе гравитационные, инерционно-гравитационные, волны Кельвина и Россби-гравитационные волны. Эти волны имеют различные длины волн (вертикальные и горизонтальные) и фазовые скорости. Они распространяются в стратосфере, передавая восточный и западный зональный импульс. Большая часть этого зонального импульса оседает на стратосферных уровнях, вызывая зональные аномалии ветра КДК. Для каждой волны вертикальный профиль зонального ветра определяет уровень критического значения, на котором накапливается импульс (или ниже которого он накапливается). Критические уровни для этих волн частично зависят от зон сдвига КДК. Некоторые гравитационные волны распространяются по всей стратосфере и создают КДК вблизи мезопаузы.

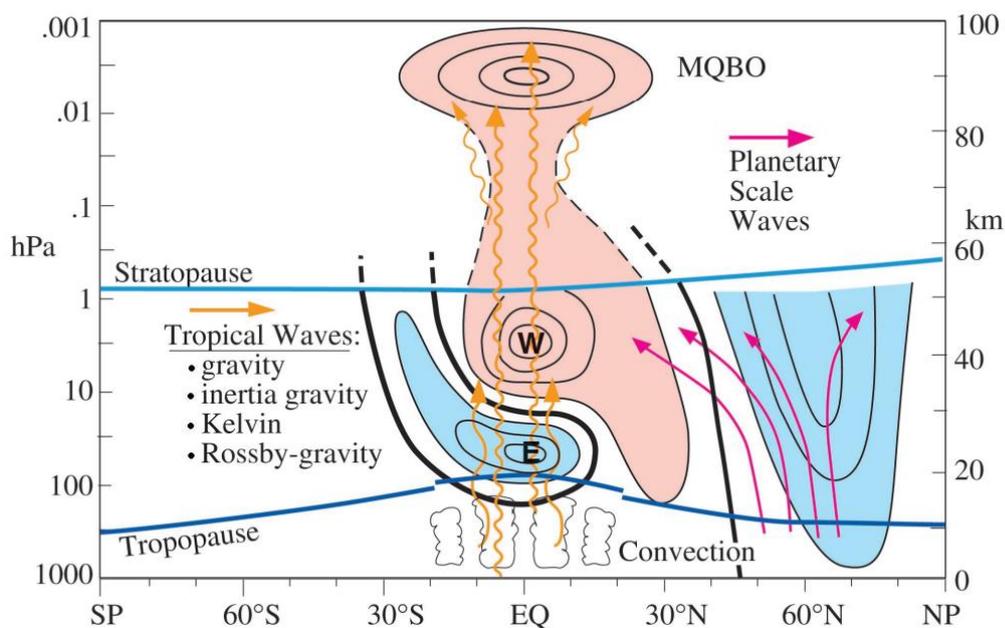


Рисунок 6. Обзор динамики квазидвухлетнего колебания в зимний период северного полушария.

На рисунке 6 изображена динамика КДК в зимний период северного полушария. Диаграмма охватывает тропосферу, стратосферу и мезосферу от полюса до полюса. Схематично показывает различия в зональном ветре между восточной и западной фазами. Оранжевыми стрелками показано распространение различных волн в тропиках. Слева (прямая оранжевая стрелка) КДК движут восходящие гравитационные волны, инерционно-гравитационные волны, волны Кельвина и Россби-гравитационные волны. Распространение волн планетарного масштаба в средних и высоких широтах указано розовыми стрелками. Чёрные контуры указывают на разницу в средних значениях зональных ветров между восточной и западной фазами. Восточная фаза окрашена в голубой цвет (E), а западная в светлый оранжево-розовый цвет (W). В тропиках голубые контуры изображают наблюдаемые значения ветра, когда КДК направлен на восток. КДК в мезосфере показан на высоте примерно 80 км [11].

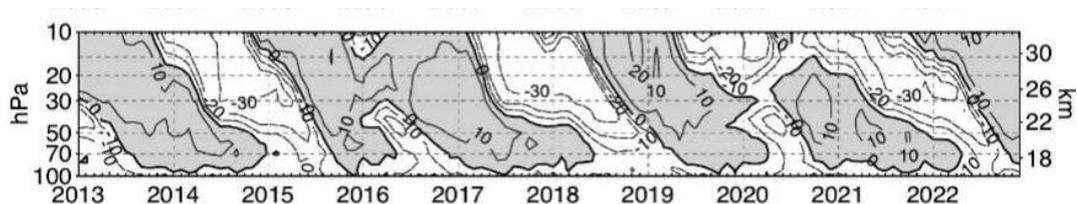


Рисунок 7. График зонального ветра (распределение среднемесячной скорости).

На рисунке 7 изображён график зонального ветра, где показано высотное временное распределение среднемесячной скорости среднего зонального ветра в экваториальной стратосфере. Серые участки — западные ветры, белые — восточные, единицы измерения — метры в секунду. Распределение демонстрирует медленное опускание фаз, которые имеют разное направление, и периодическую смену направления скорости среднего зонального ветра на высотах; скорость восточного и западного направлений варьируется от 10 до 30 м/с [12].

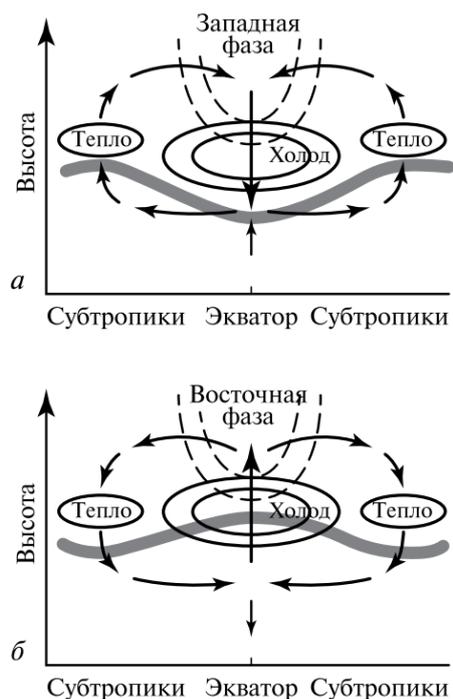


Рисунок 8. Схематическое изображение меридиональной циркуляции в разные фазы фазах КДК. Пунктирные линии — изолинии скорости зонального ветра, сплошные линии — отклонения изотерм, толстые линии — тропопауза.

На рисунке 8 показана меридиональная циркуляция фаз КДК. При западной фазе (рисунок 3а) ветры спускаются в тропической стратосфере и отклоняют движения воздуха, которые направлены к экватору. Из-за этого тропосфера нагревается и опускается в тропических широтах, но поднимается и охлаждается во внетропических широтах. Когда проходит восточная фаза, происходит обратный процесс (рисунок 3б) [12]. Значит, в стратосфере при восточной фазе КДК меридиональный перенос к полюсам усиливается. Это приводит к увеличению содержания озона в средних и высоких широтах. Также повышается интенсивность циркуляции Брюера-Добсона. Восточная фаза ослабляет меридиональный перенос, производя обратный эффект.

1.4 Стратосферный полярный вихрь

В литературе по атмосферным наукам термин «полярный вихрь» чаще всего используется как сокращение от «циркумполярный вихрь» и относится

к западному (с запада на восток) планетарному потоку, который окружает полюс в средних или высоких широтах [13].

Хотя полярные вихри иногда описывают как простирающиеся от средней тропосферы до верхней стратосферы, на самом деле в атмосфере Земли есть два совершенно разных полярных вихря: тропосферный вихрь и стратосферный вихрь.

Тропосферные и стратосферные циркумполярные вихри схематически изображены на рисунке 9 и хорошо видны на климатологических картах средних зональных ветров, показанных на рисунке 10. Широта, на которой зональный ветер достигает своего максимума в полушарии, может считаться приблизительной границей полярного вихря. На рисунке 9 видно, что на этой широте (около 100 гПа) наблюдается явный вертикальный разрыв. Также следует отметить, что вихрь в тропосфере намного больше, чем вихрь в стратосфере, и что они не связаны напрямую. Тропосферный вихрь существует круглый год, стратосферный полярный вихрь существует только с осени до весны [14].

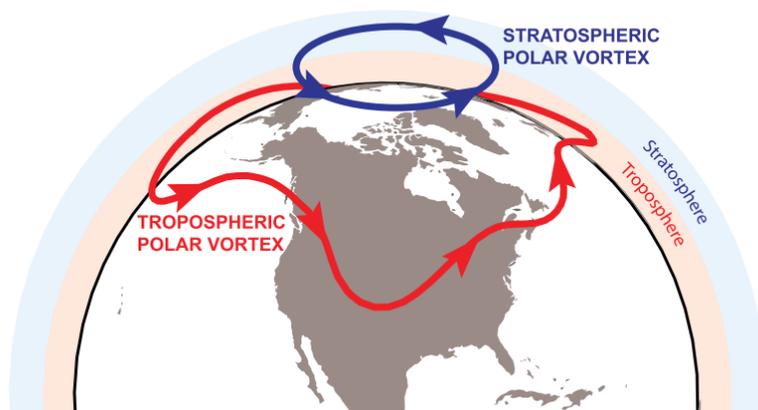


Рисунок 9. Схема стратосферных и тропосферных полярных вихрей.

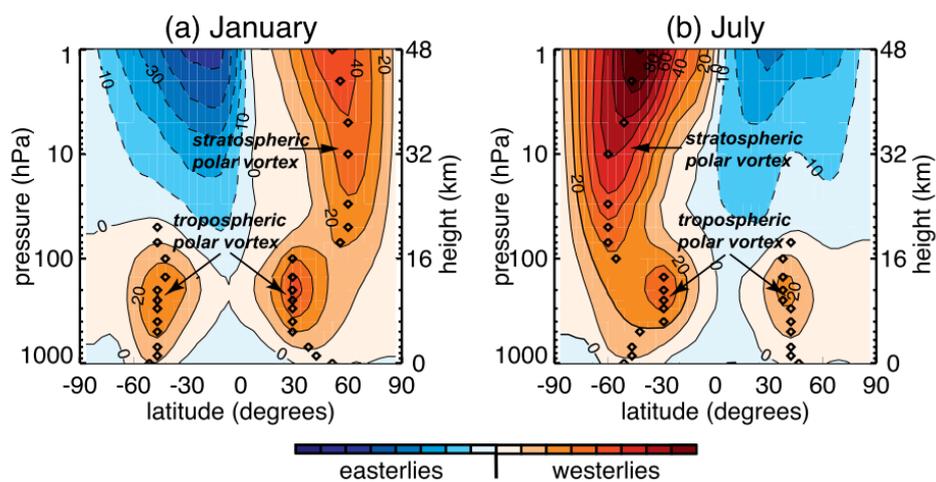


Рисунок 10. Средний зональный ветер в январе и июле. Ромбиками отмечен полушарный максимум зонального ветра на каждом уровне давления и приблизительный край полярного вихря для этого полушария.

Первые упоминания об этих циркумполярных западных ветрах в стратосфере относятся к концу 1940-х годов. В ранних работах использовалось словосочетание «циркумполярный вихрь», но к концу 1950-х и 1960-м годам, стало распространённым сокращение „полярный вихрь“.

Сильные циркумполярные западные ветры, определяющие стратосферный полярный вихрь, достигают максимальной силы примерно на 60° широты, чуть выше тропопаузы (~ 100 гПа) и в мезосфере (выше 1 гПа; рисунок 11). Стратосферный вихрь также можно определить, как сплошную область низкого геопотенциального уровня, ограниченную западными ветрами, как показано на рисунке 11a за январь 2014 года (толстый контур — это геопотенциальная высота, представляющая собой край вихря) [14].

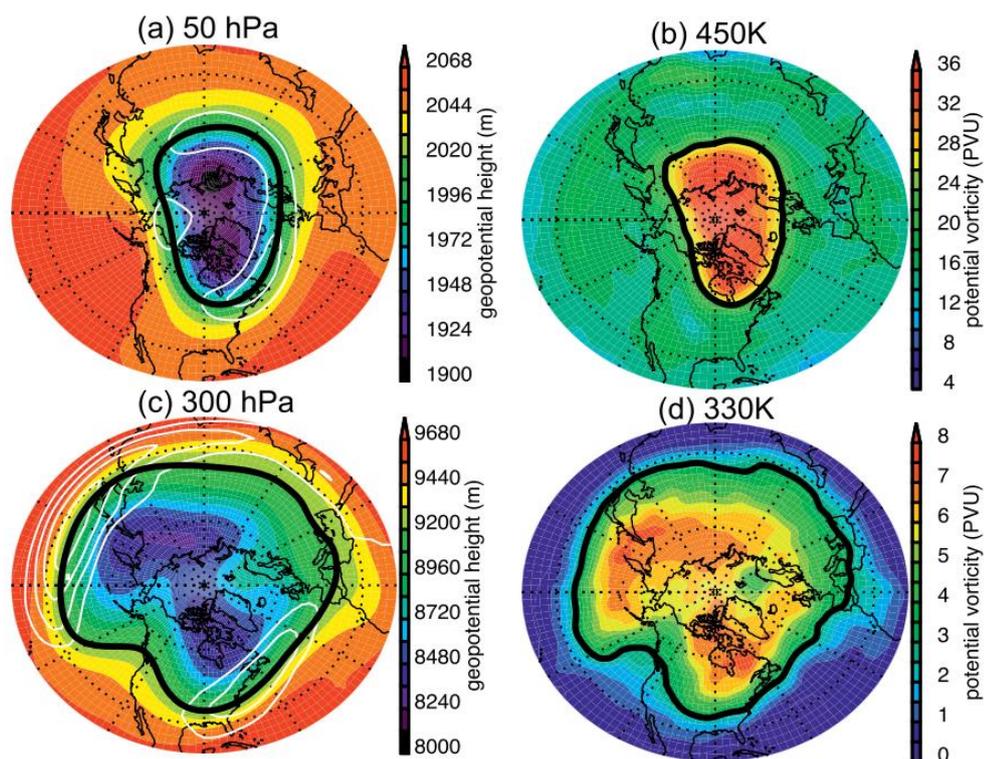


Рисунок 11. Карты, иллюстрирующие (а), (б) стратосферные и ©, (д) тропосферные вихри в январе 2014 года. С помощью геопотенциальной высоты (заштриховано) и зональных ветров (белые контуры) — а и с. И потенциальной завихренности — б, д. Толстые чёрные контуры показывают границы вихрей, определённых с помощью геопотенциальной высоты или потенциальной завихренности.

Однако в большинстве исследований последних десятилетий вихрь определялся как область с высокой потенциальной завихренностью (ПЗ; рисунок 11б). ПЗ пропорциональна произведению завихренности (показатель скорости вращения воздушных масс) и стратификации (степень, в которой воздушная масса, перемещённая вертикально, стремится вернуться на исходную высоту, как вода на поверхности озера).

Градиенты ПЗ (на границе полярного вихря более резкие) обеспечивают восстанавливающий механизм для распространения волн Россби. Волны Россби — низкочастотные возмущения во внетропической тропосфере

и стратосфере, и, грубо говоря, все крупномасштабные возмущения полярного вихря.

Стратосферный полярный вихрь возникает каждую зиму из-за крупномасштабных температурных градиентов между средними широтами и полюсом. Он формируется осенью, когда в полярных регионах нет солнечного тепла и усиливается зимой. Затем разрушается, когда весной в полярные регионы возвращается солнечный свет, а высокоширотные ветры становятся слабыми восточными [15]. Если бы солнечное тепло в точности уравновешивало инфракрасное охлаждение (радиационное равновесие), то стратосферный полярный вихрь был бы сильнее, а на полюсе было бы холоднее, чем сейчас. Волны Россби, возбуждаемые в тропосфере, распространяются в стратосферу и выводят вихрь из состояния радиационного равновесия. Они ослабляют его и искажают форму, отклоняя её от круговой симметрии вокруг полюса.

Крупные топографические и сухопутно-морские контрасты в Северном полушарии генерируют более сильные волны, которые распространяются вверх, чем в Южном полушарии. Поэтому северный стратосферный вихрь более слабый и искажённый, чем южный [16]. Это также приводит к большей временной изменчивости вихря в Северном полушарии, включая так называемые внезапные стратосферные потепления (ВСП). Они заключаются в резком повышении температуры в полярных регионах и разрушении стратосферного вихря в середине зимы. ВСП происходят в среднем примерно раз в два года в Северном полушарии. В Южном полушарии ВСП был зарегистрирован только один раз, в сентябре 2002 года.

Глава 2. Данные для анализа

2.1 Индекс MEI.v2

Ежемесячный индекс многомерного Эль-Ниньо Южного колебания (MEI.v2) — это временной ряд ведущей комбинированной эмпирической ортогональной функции пяти различных переменных. В эти переменные входит: давление на уровне моря, температура поверхности моря, зональные и меридиональные компоненты поверхностного ветра и уходящее длинноволновое излучение над тропическим Тихоокеанским бассейном (30° ю. ш. — 30° с. ш. и 100° в. д. — 70° з. д.) [17].

Чтобы учесть сезонность Эль-Ниньо и уменьшить влияние более высокой внутрисезонной изменчивости, эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) рассчитываются для 12 перекрывающихся двухмесячных «сезонов» (декабрь–январь, ... ноябрь–декабрь).

MEI.v2 является расширением оригинального MEI, разработанного Уолтером и Тимлином (1993). Он рассчитывался с использованием 6 переменных в качестве косвенных показателей условий атмосферы и океана, связанных с ЭНЮК.

В MEI.v2 поля температуры поверхности моря (ТПО), давления на уровне моря, а также зональных и меридиональных поверхностных ветров получены из высококачественного глобального повторного анализа JRA-55. В отличие от этого, в оригинальном MEI использовались наблюдения с морских судов на основе Международного комплексного набора данных об атмосфере океана (ICOADS), а также температура приземного воздуха и давление на уровне моря. MEI.v2 также использует данные о месячном исходящем длинноволновом излучении из базы климатических данных NOAA версии 2.7. В оригинальном MEI использовались данные о доле облачного покрова ICOADS.

Для создания MEI.v2 все переменные интерполируются в общую сетку с шагом 2,5° по широте и долготе. Стандартизированные аномалии

рассчитываются относительно базового периода с 1980 по 2018 год. Как и в случае с MEI, MEI.v2 рассчитывается как ведущий временной ряд главных компонент эмпирической ортогональной функции стандартизированных аномалий вышеуказанных 5 объединённых переменных над тропической частью Тихого океана в период с 1980 по 2018 год. Анализ ЭОФ основан на ковариационной матрице, область анализа такая же, как и для исходного MEI (30° ю. ш. — 30° с. ш. и 100° в. д. — 70° з. д., за исключением Атлантического океана и материковых регионов). Перед анализом ЭОФ применяется широтно-долготная взвешенная оценка.

Индексы равные или превышающие 0,5 °C указывают на условия тёплой фазы Эль-Ниньо. Индексы, которые меньше или равны -0,5 °C связаны с условиями холодной фазы Ла-Нинья [18].

На основе базы климатических данных NOAA была составлена таблица 1. В ней приведены данные индексов MEI.v2 во время положительной и отрицательной фаз ЭНЮК. Выбран период 1987 по 2021 гг. в ноябре и декабре. Выбор этих месяцев был сделан из-за ряда причин:

1. Наибольшая активность Эль-Ниньо и Ла-Нинья происходит в зимние месяцы.
2. В ноябре и декабре полярный стратосферный вихрь наиболее стабилен, что снижает влияние естественной динамики на исследуемые процессы.
3. В этот период ВСП происходят реже, чем в январе–феврале. Это позволяет избежать искажений, связанных с резкими стратосферными аномалиями.

Также годы были выбраны во время чётких фаз КДК, которые мы разберём в следующем параграфе.

Таблица 2. Годы положительной фазы Эль-Ниньо и отрицательной фазы Ла-Нинья в ноябре и декабре.

Год	Ноябрь	Декабрь
1986	0.64	1.06
1987	0.90	0.79
1991	1.04	1.23
1992	0.62	0.73
2000	-0.86	-0.79
2005	-0.70	-0.70
2006	1.00	0.64
2008	-0.98	-1.01
2009	1.04	0.95
2010	-2.01	-1.86
2015	1.94	1.93
2017	-0.62	-0.74
2020	-1.13	-1.14
2021	-1.39	-1.20
2022	-1.53	-1.28
2023	0.91	1.13

2.2 Данные квазидвухлетнего колебания

Данные по КДК получают с помощью радиозондов, ассимилированных данных NASA GSFC/GMAO и спутников NASA. Наблюдения радиозондов хранятся в Метеорологической службе Сингапура в обсерватории верхних слоёв атмосферы (код станции 48698). Станция расположена по координатам 1.3 северной широты, 103.9 восточной долготы на высоте 21 метр [19].

Данные в таблице 2 представляют собой ежемесячные средние значения зонального ветра на высоте 50гПа, полученные из ежедневных измерений в Сингапуре. Единицы измерения — м/с.

Восточная фаза КДК соответствует отрицательным значениям, а западная — положительным. Выбран период с 1987 по 2021 гг. в ноябре и декабре. Причины выбора месяцев перечислены в прошлом параграфе. Года выбирались при совмещении чётких фаз КДК и событий Эль-Ниньо или Ла-Нинья. Так как часть зимних сезонов находилось в переходных фазах КДК, они были исключены при анализе.

Таблица 2. Годы восточных и западных фаз КДК.

Год	Ноябрь	Декабрь
1986	-8.01	-10.51
1987	9.23	8.41
1991	-12.27	-12.68
1992	6.33	8.19
2000	-15.07	-14.56
2005	-29.55	-25.04
2006	10.10	6.21
2008	9.13	10.46
2009	-13.83	-15.57
2010	12.16	10.97
2015	12.79	11.39
2017	-17.20	-18.12
2020	11.15	10.37
2021	-19.78	-21.58
2022	12.45	11.70
2023	-19.80	-22.69

2.3 Реанализ MERRA-2

MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2) — это глобальный атмосферный реанализ, разработанный NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) в рамках программы Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) [20]. Он включает период с 1980 годов до нашего времени.

MERRA-2 в отличие от набора данных MERRA позволяет ассимилировать современные данные о гиперспектральном излучении и микроволновых наблюдениях, а также наборы данных о радиозатмениях GPS. Помимо этого, он использует данные о профилях озонового слоя, полученные NASA в конце 2004 года. Пространственное разрешение остаётся примерно таким же (около 50 км в широтном направлении), как и в MERRA. MERRA-2 — это первый долгосрочный глобальный повторный анализ, который ассимилирует космические наблюдения за аэрозолями и отражает их взаимодействие с другими физическими процессами в климатической системе [20].

MERRA-2 предоставляет данные в формате NetCDF с временным разрешением от 1 часа до 1 месяца. Это могут быть данные температуры, ветра, ТПО, осадков, давления на уровне моря, концентрации озона и так далее.

Преимуществом реанализа является высокое вертикальное разрешение в стратосфере, что актуально для исследований стратосферного полярного вихря. Так как мы учитываем квазидвухлетнее колебание и исключаем внезапные стратосферные потепления, временного ряда данной модели с 1980 года нам достаточно.

Глава 3. Методы и анализы расчётов

Распределение озона в стратосфере неравномерно, максимум приходится примерно на 25 км. Поэтому в данной работе стратосфера разделена на нижнюю (100-70 гПа), среднюю (50-30 гПа) и верхнюю (20-7 гПа) части. Из-за ветвей циркуляции Брюера-Добсона перенос озона происходит неравномерно, поэтому связь ЭНЮК с этими частями стратосферы проявляется по-разному. Причины выбора месяцев и годов были перечислены во 2 главе.

3.1 Норма распределения озона в стратосфере

Для оценки состояния озона и выявления его аномальных изменений были использованы значения нормы. Они показывают среднее содержание озона в стратосфере на основе многолетних данных. Это позволяет минимизировать влияние краткосрочных колебаний и выявить климатические тенденции.

В данном исследовании норма распределения озона была рассчитана за период с 1980 по 2024 гг. Единицы измерения — массовая доля (килограмм озона на килограмм воздуха). Вычисления производились по формуле:

$$\text{Норма} = \text{Данные озона} / 45$$

С помощью этих данных в программе OpenGrads были сделаны рисунки. На них показаны распределения нормы содержания озона в стратосфере над северным полюсом в трёх слоях за ноябрь и декабрь.

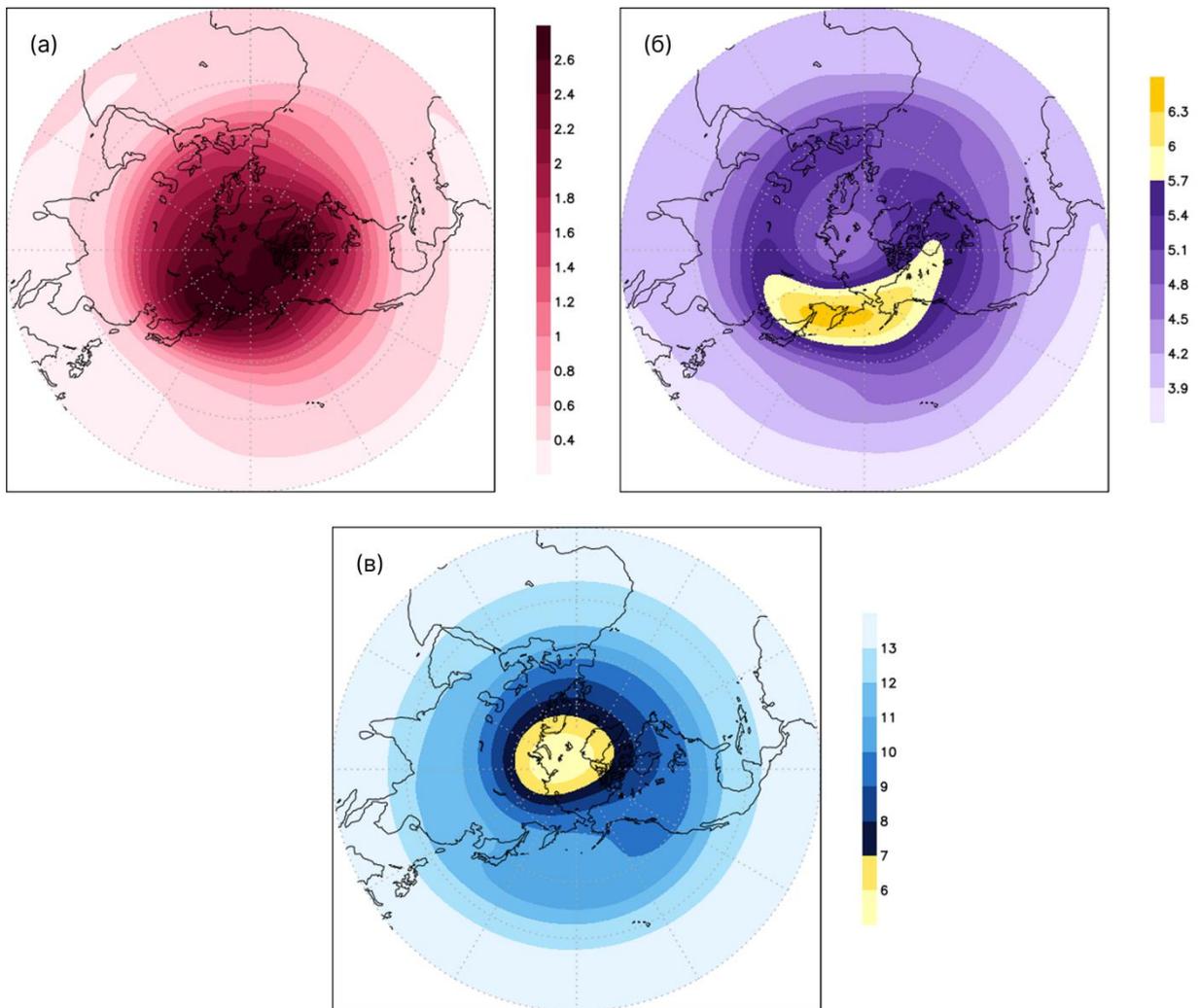


Рисунок 3.1. Норма распределения озона ($\times 10^{-6}$ кг/кг) в нижней (а), средней (б) и верхней (в) стратосфере над северным полюсом в ноябре.

Рассмотрим рисунок 3.1. В ноябре содержание озона изменялось в диапазоне от $0,4$ до 13×10^{-6} кг/кг. В нижней стратосфере минимальные значения находятся в экваториальной зоне. Максимальные значения наблюдались в приполярных регионах. Они немного смещены в сторону северо-восточной Азии и Канадского Арктического архипелага. В средней стратосфере сохраняется экваториальный минимум. Максимум сильно смещается в район Охотского и Берингова морей. Средние и высокие значения образуют большой вихрь вокруг более низких значений. Это связано с особенностями меридионального переноса воздушных масс в условиях формирующегося полярного вихря. В верхней стратосфере происходит другое распределение:

максимум содержания размещён в экваториальной зоне, а минимум — в полярных широтах без выраженного смещения.

Так как за единицы измерения мы взяли массовую долю, значения в верхней стратосфере самые высокие, а в нижней самые низкие. Это связано с тем, что при массовых соотношениях озона при различных уровнях давления разная плотность. Поэтому при одинаковом абсолютном количестве озона при давлении 10 гПа соотношение озона при смешивании будет выше, чем при давлении 50 гПа, из-за меньшей плотности воздуха.

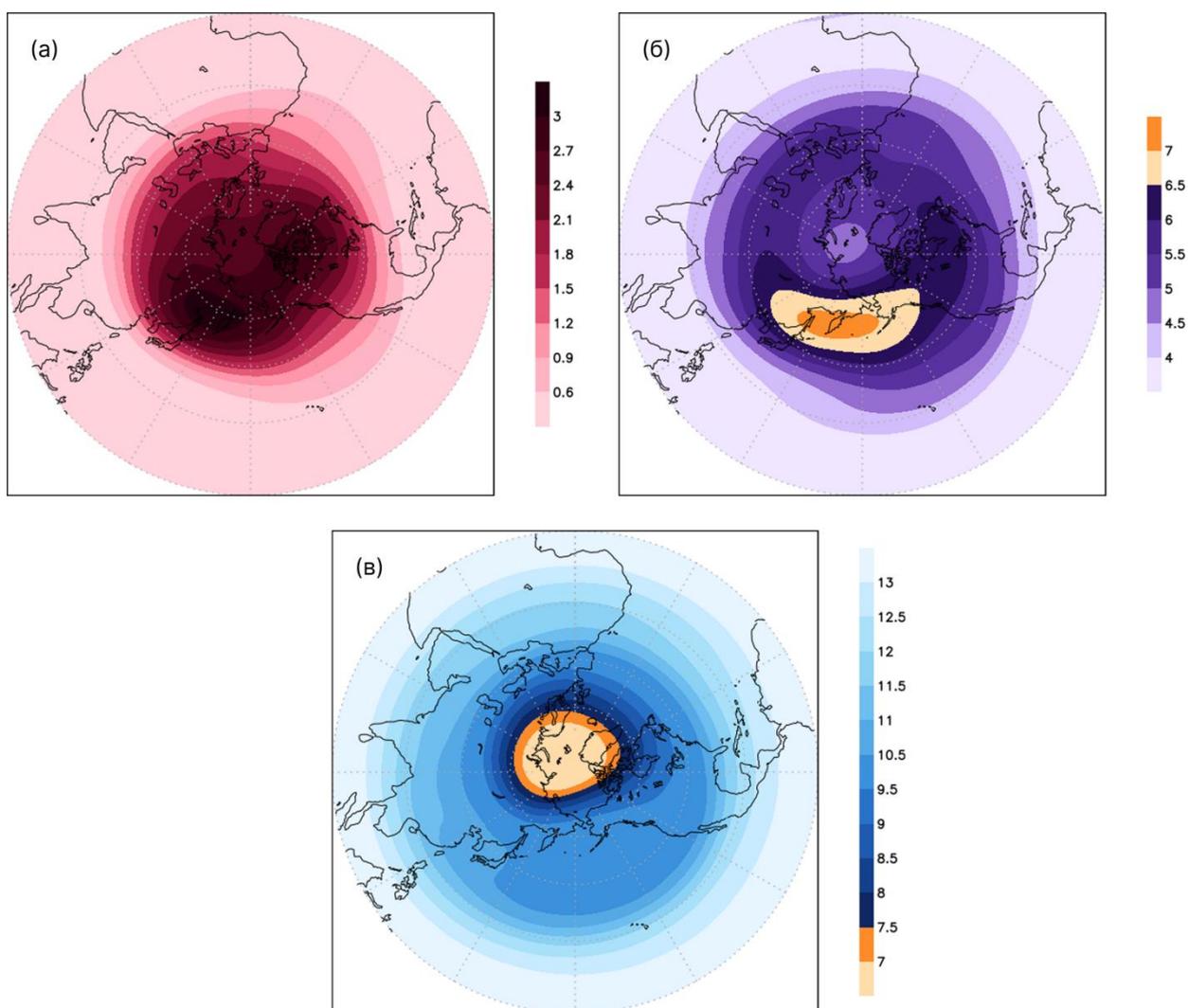


Рисунок 3.2. Норма распределения озона ($\times 10^{-6}$ кг/кг) в нижней (а), средней (б) и верхней (в) стратосфере над северным полюсом в декабре.

На рисунке 3.3 (в декабре) наблюдается увеличение концентраций озона во всех слоях стратосферы. В нижней стратосфере максимум смещается ещё больше — в сторону Охотского моря и Камчатки. Это может быть связано с усилением волновой активности в период углубления полярного вихря. В средней стратосфере сохраняется структура распределения озона — минимальные значения на экваторе, а максимальное в северо-западной части Тихого океана. В Верхней стратосфере, кроме повышения значений ничего не изменилось.

Определённые тенденции в распределении нормы содержания озона можно объяснить механизмами меридионального переноса воздушных масс и особенностями вертикального распределения плотности атмосферы. Формирование и развитие полярного вихря тоже влияют на это распределение.

3.2 Аномалии содержания озона

В данном параграфе проводится анализ пространственно-временного распределения аномалий содержания озона в трёх слоях стратосферы за ноябрь и декабрь. Выбранные года соответствуют наличию явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья и полных фаз КДК. Было сделано разделение на четыре группы: Эль-Ниньо и западная фаза КДК, Эль-Ниньо и восточная фаза КДК, Ла-Нинья и западная фаза КДК, Ла-Нинья и восточная фаза КДК. Это необходимо для выявления закономерностей в динамике озонового слоя на разных высотных уровнях в холодный сезон. Акцент будет направлен на полярный круг в средней и верхней стратосфере.

Анализ основан на расчёте озоновых аномалий в абсолютных и процентных величинах. Абсолютная аномалия определяется по формуле:

Аномалия = Текущее значение – Норма

, где «Норма» — многолетнее среднее значение озонового содержания за соответствующий месяц.

Использование аномалий в процентах позволяет сопоставлять отклонения от нормы между разными слоями стратосферы, несмотря на различие в абсолютных значениях озонового содержания. Благодаря этому можно более наглядно выявить степень увеличения или уменьшения озонового слоя. А также способствует определить региональные и высотные особенности его изменения в рассматриваемые месяцы. Вычисление производилось по формуле:

$$\text{Аномалия в процентах} = (\text{Аномалия} / \text{Норма}) \times 100$$

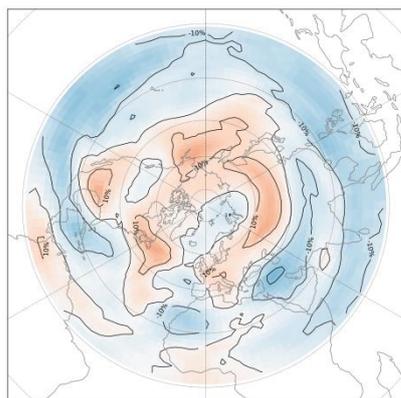
Для визуализации результатов были построены картографические поля процентных аномалий на заданных изобарических уровнях. Построение было проведено в программе OpenGrads.

Нижняя

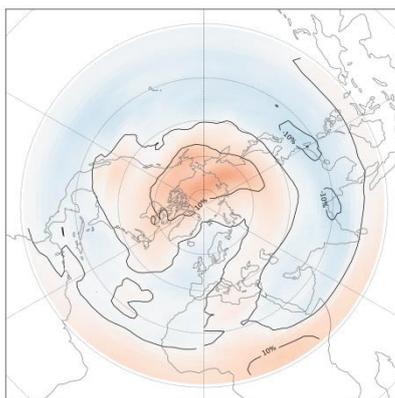
Средняя

Верхняя

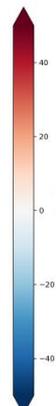
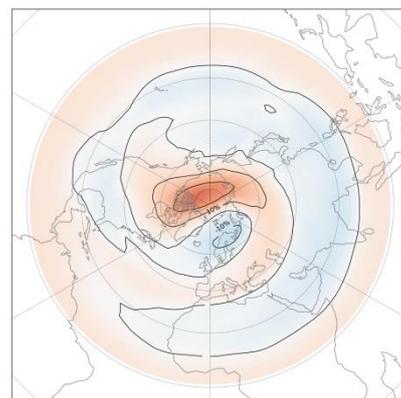
O3 anomalies (low layer) 1987



O3 anomalies (middle layer) 1987



O3 anomalies (upper layer) 1987



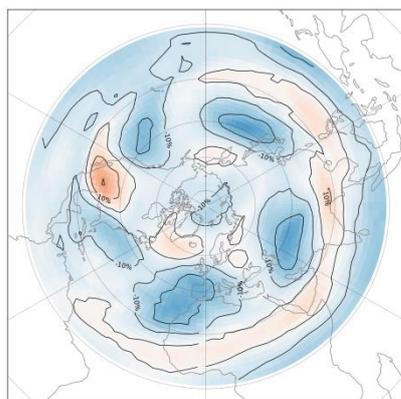
Год: 1987

Нижняя

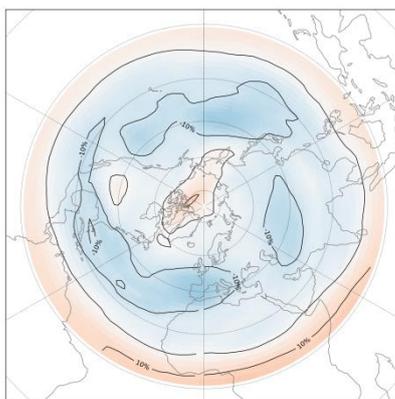
Средняя

Верхняя

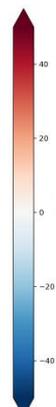
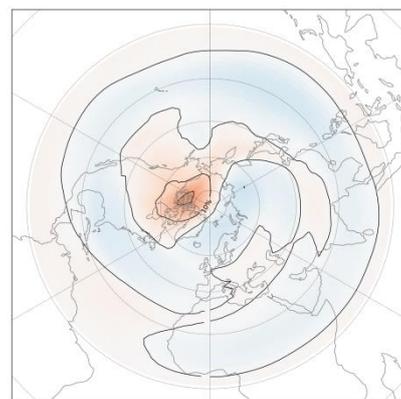
O3 anomalies (low layer) 1992



O3 anomalies (middle layer) 1992



O3 anomalies (upper layer) 1992



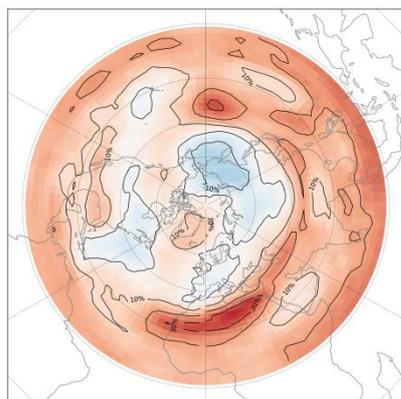
Год: 1992

Нижняя

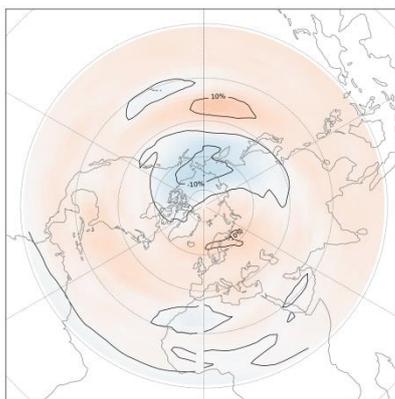
Средняя

Верхняя

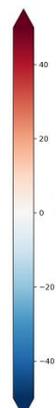
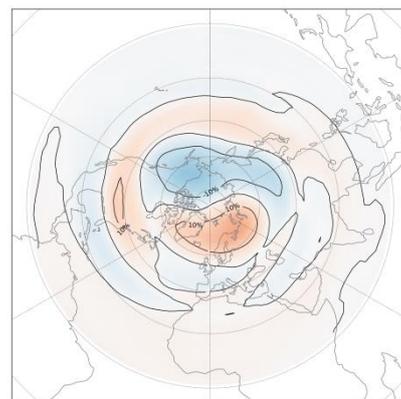
O3 anomalies (low layer) 2006



O3 anomalies (middle layer) 2006



O3 anomalies (upper layer) 2006

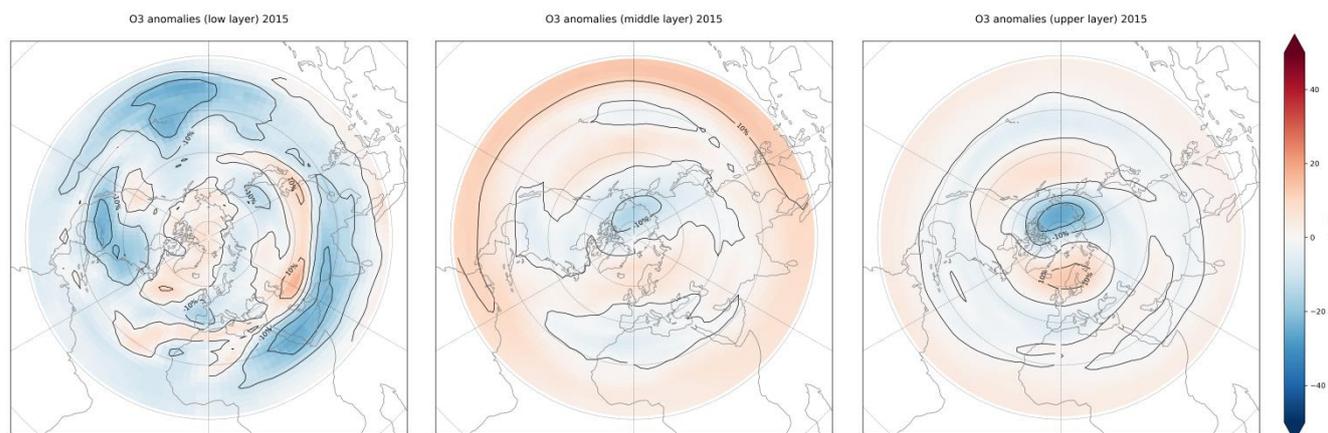


Год: 2006

Нижняя

Средняя

Верхняя



Год: 2015

Рисунок 3.3. Аномалии озона при Эль-Ниньо и западной фазе КДК в ноябре в 1987, 1992, 2006 и 2015 гг.

В нижней стратосфере похожие распределения аномалий наблюдаются только в 1987 и 2015 годах. Основная часть положительных аномалий расположена в пределах полярного круга, а области отрицательных аномалий - ближе к экватору. В 1992 году преобладают отрицательные аномалии, распределённые неравномерно. В 2006 году почти по всей нижней стратосфере наблюдаются положительные аномалии, но есть небольшие участки с отрицательными значениями.

В средней стратосфере наблюдается определённое сходство между 1987 и 1992 годами. В 1987 году положительные аномалии имеют большую интенсивность и распространение, в основном над Северной Америкой и восточной Европой. В 2006 и 2015 годах распределение аномалий также имеет схожие черты. Отрицательные значения (от -10%) находятся в районе Берингова пролива. Более слабые отрицательные аномалии распространяются на западную часть Северной Америки и восточную часть Евразии. Положительные аномалии с интенсивностью менее +10% охватывают Гренландию и западные регионы Евразии. В большинстве лет создаётся ощущение, что на фоне отрицательных аномалий образовались области положительных.

Такая же ситуация наблюдается в верхней стратосфере, но в данном случае отрицательные аномалии имеют небольшое завихрение. Сохраняются общие черты, однако аномалии становятся более выраженными и приобретают спиралевидную структуру. В 1987 и 1992 годах положительные аномалии от +10% и выше наблюдаются над акваторией Северного Ледовитого океана, преимущественно в районе Берингова пролива. В 1992 году эта область смещена в сторону Канадского Арктического архипелага. Отрицательные аномалии занимают противоположную часть океана. Визуально формируются две противоположно ориентированные спирали - положительных и отрицательных аномалий. В 2006 и 2015 годах области отрицательных аномалий с интенсивностью более 10% расположены в районе Берингова пролива. Положительные аномалии такой же интенсивности смещены в другую часть Северного Ледовитого океана.

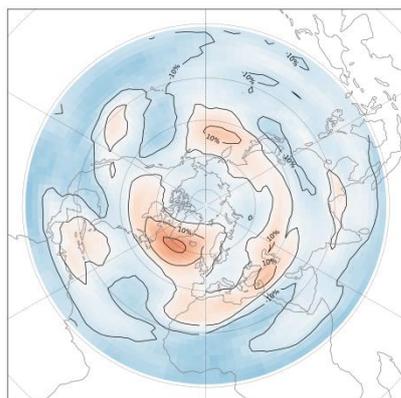
В целом для верхней стратосферы характерны более высокие амплитуды аномалий и наличие сложной вихревой структуры, в отличие от средней. В 1987, 1992 и в 2006, 2015 годах прослеживается взаимно противоположное распределение положительных и отрицательных аномалий в средней и верхней стратосфере.

Нижняя

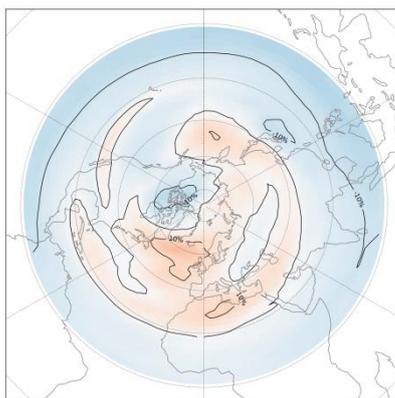
Средняя

Верхняя

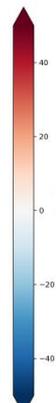
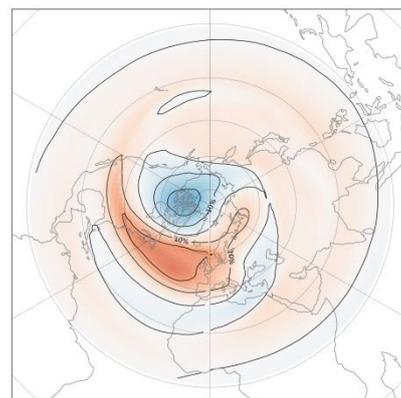
O3 anomalies (low layer) 1986



O3 anomalies (middle layer) 1986



O3 anomalies (upper layer) 1986



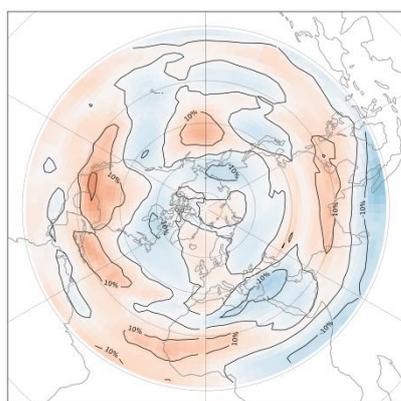
Год: 1986

Нижняя

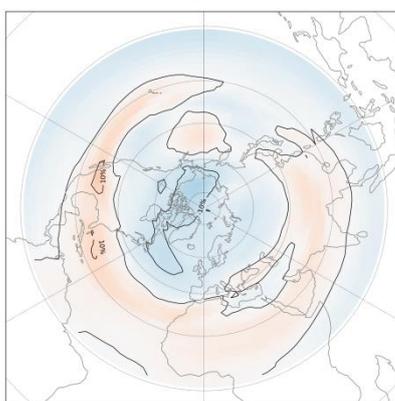
Средняя

Верхняя

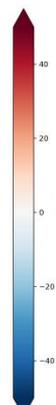
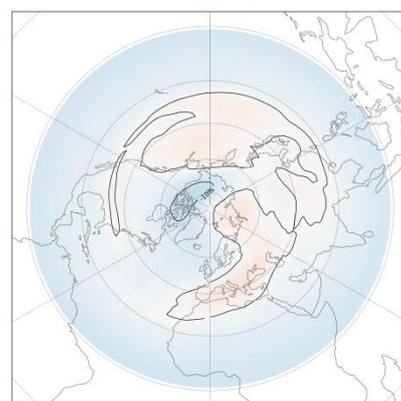
O3 anomalies (low layer) 1991



O3 anomalies (middle layer) 1991



O3 anomalies (upper layer) 1991



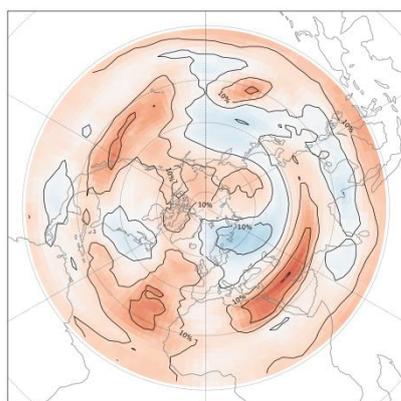
Год: 1991

Нижняя

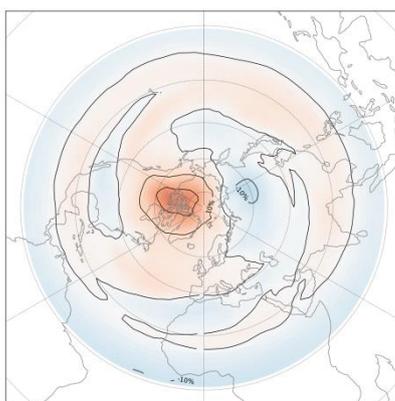
Средняя

Верхняя

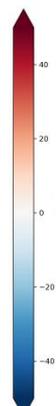
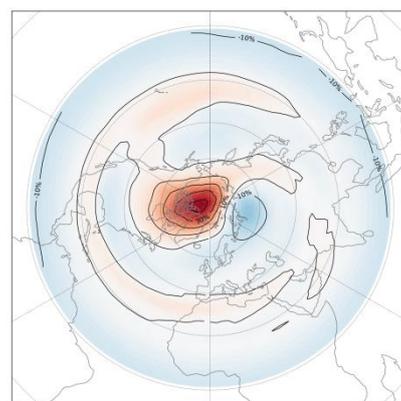
O3 anomalies (low layer) 2009



O3 anomalies (middle layer) 2009



O3 anomalies (upper layer) 2009

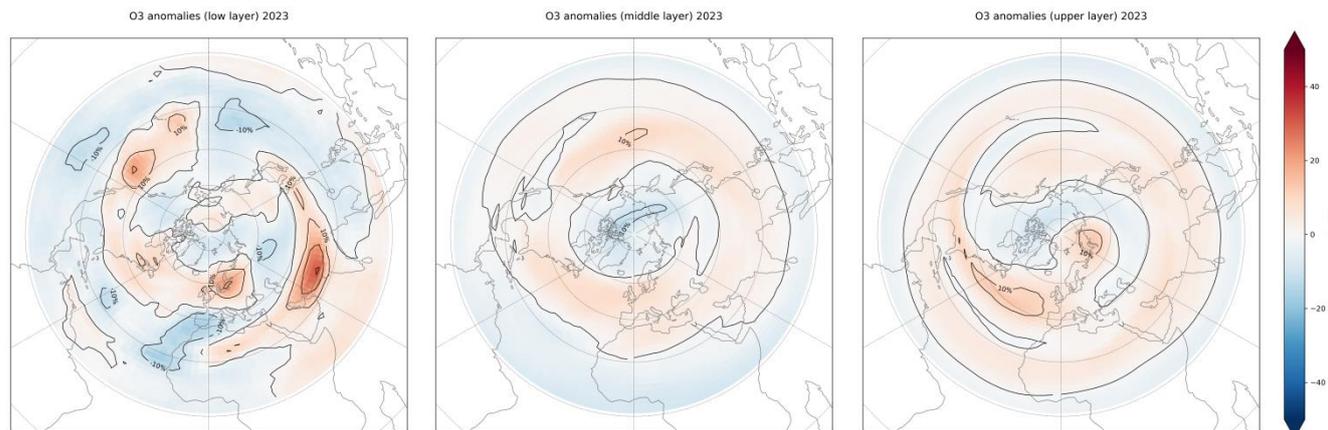


Год: 2009

Нижняя

Средняя

Верхняя



Год: 2023

Рисунок 3.4. Аномалии озона при Эль-Ниньо и восточной фазе КДК в ноябре в 1986, 1991, 2009 и 2023 гг.

В нижней стратосфере все года имеют похожее распределение аномалий. Присутствуют и положительные, и отрицательные аномалии, но их интенсивность и расположение изменяются. В большинстве случаев распределение хаотично, а значения низкие. В 1986 и 2023 годах основную площадь занимают отрицательные аномалии, а в 2009 и 1991 - положительные. Самые обширные отрицательные аномалии наблюдаются в 1986 году ближе к экватору. Можно заметить, что в 2009 году больше положительных аномалий, а также есть достаточно большой участок с аномалиями более 20%.

В средней стратосфере во все годы на области фоне слабых отрицательных аномалий появляются участки, отдалённо напоминающие кольцо с положительными аномалиями. В 1991 и 2023 годах полярный круг охватывают небольшие участки с аномалиями более -10% и небольшими положительными аномалиями. В 1986 и 2009 годах появляются более сильные положительные аномалии. И если в 1986 году они незначительно превышали 10%, то в 2009 году значения превышали 20%.

Верхняя стратосфера почти во все годы показала схожее расположение аномалий. В 1991 и 2023 годах интенсивность не изменилась, лишь переместились области с положительными аномалиями. Также в 2023 году в

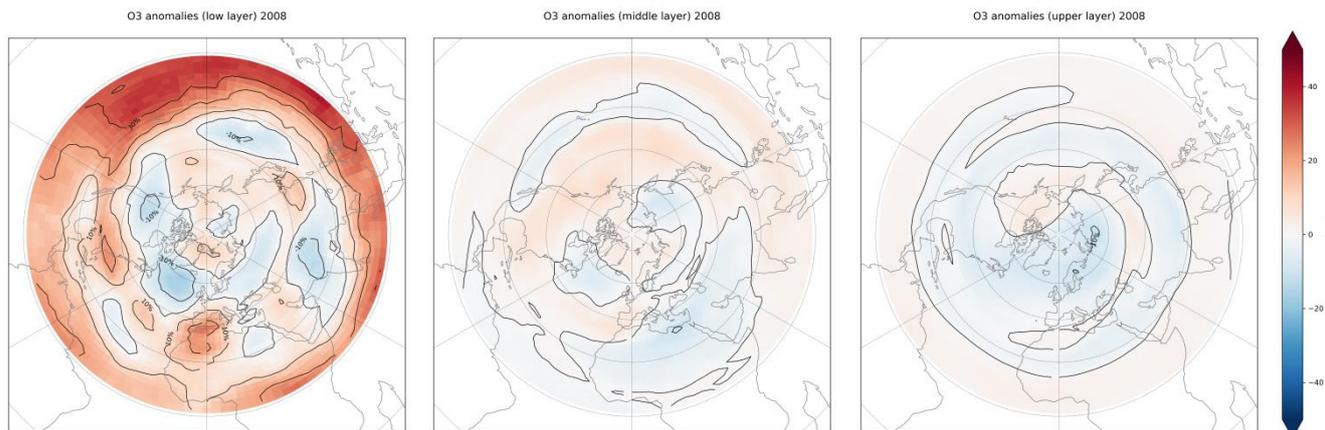
полярном круге появились аномалии более 10%. В 1986 году положительные аномалии заняли почти всю область. Те области, где в средней стратосфере положительные и отрицательные аномалии превышали 10%, увеличились и стали превышать 20%. В 2009 году положительные аномалии, равные 10% в средней стратосфере, стали превышать значения в 40%, а отрицательные аномалии изменили только радиус.

В итоге, в верхней стратосфере в двух случаях увеличивалось распространение и интенсивность аномалий, а в двух других изменилось только расположение положительных аномалий. Общая картина двух слоёв стратосферы создаёт впечатление появления положительных аномалий на фоне отрицательных в виде кольцеобразной области.

Нижняя

Средняя

Верхняя

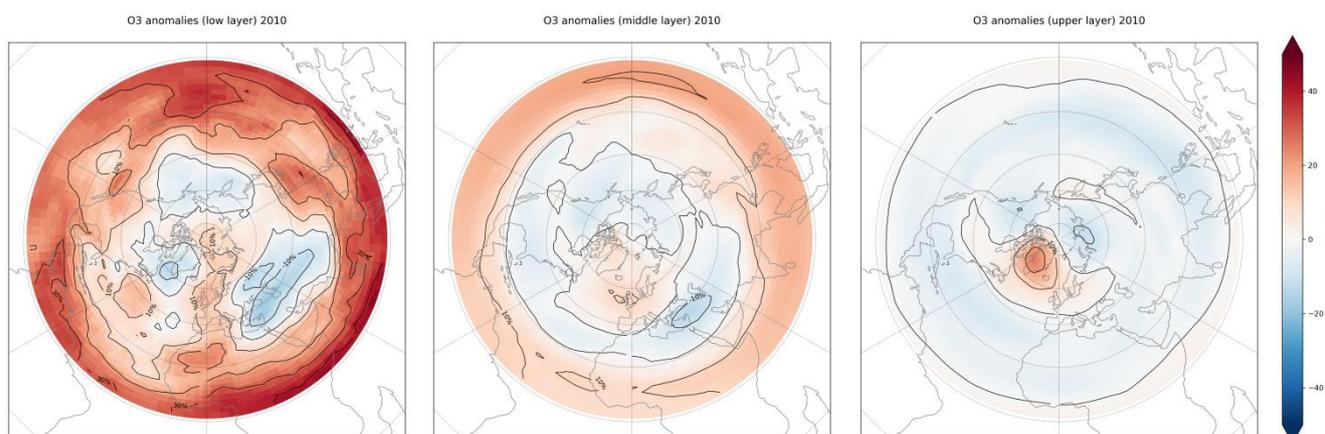


Год: 2008

Нижняя

Средняя

Верхняя

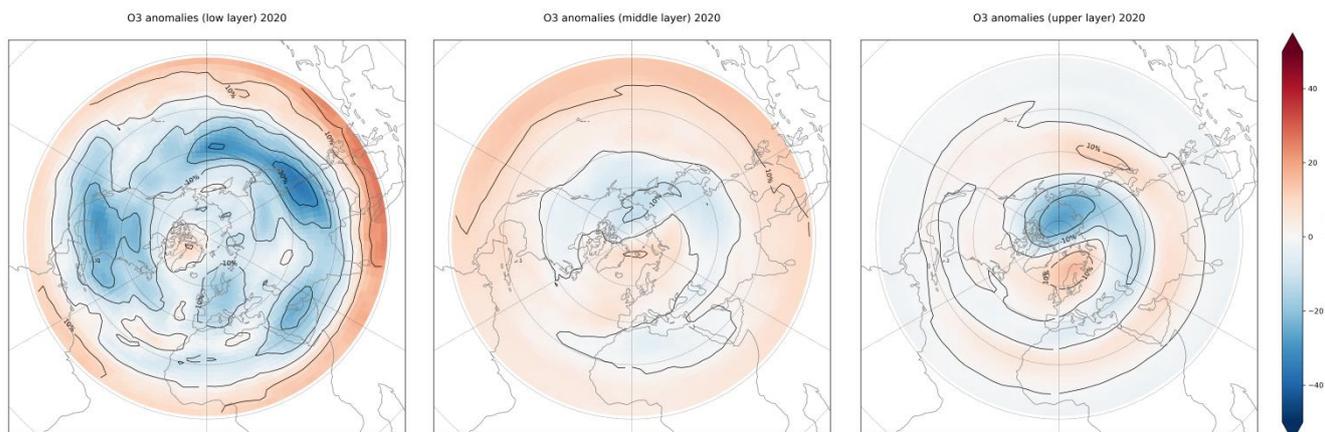


Год: 2010

Нижняя

Средняя

Верхняя

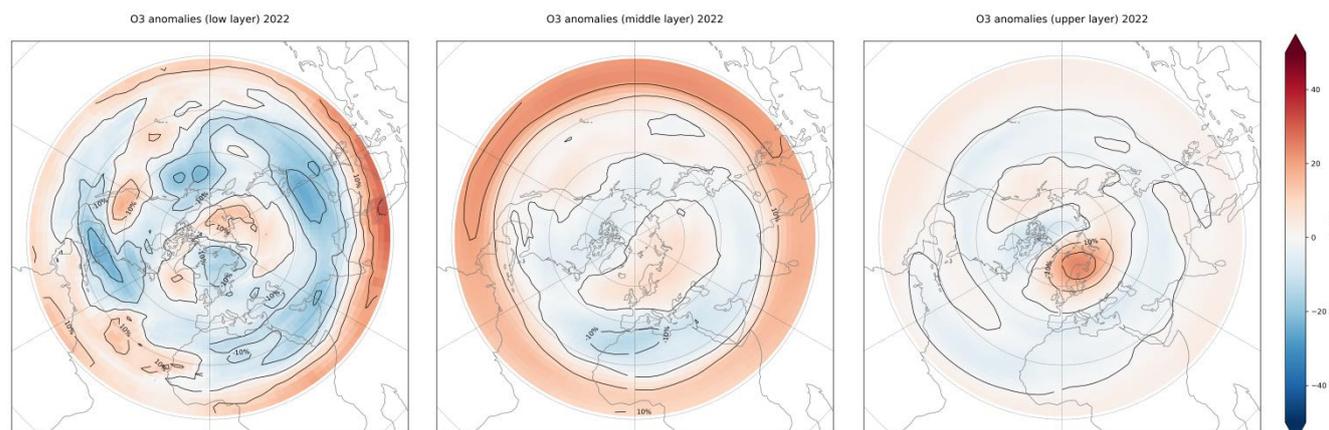


Год: 2020

Нижняя

Средняя

Верхняя



Год: 2022

Рисунок 3.5. Аномалии озона при Ла-Нинья и западной фазе КДК в ноябре в 2008, 2010, 2020 и 2022 гг.

В нижней стратосфере вдоль экватора и в половине случаев до средних широт наблюдаются сильные положительные аномалии. Они окружают хаотично расположенные отрицательные аномалии. В 2008 и 2010 годах содержание озона на экваторе на обширных участках увеличивается более чем на 30%. Аномалии больше 20% распространяются до средних широт. В полярном круге попеременно сменяются положительные и отрицательные аномалии, достигающие до 10% и более. В 2010 году интенсивность и масштабы аномалий выше, чем в 2008. Схожее распределение и интенсивность аномалий наблюдаются в 2020 и 2022 годах. Высокие положительные аномалии, превышающие 20%, локализованы на экваторе. Более обширные области отрицательных аномалий, иногда достигающие 30% и более, расположены в средних и высоких широтах. Но сохраняется периодическое повышение аномалий в некоторых местах. В первой схожей группе лет преобладают интенсивные положительные аномалии на экваторе, а в высоких широтах равное количество отрицательных и положительных. Во второй группе на экваторе больше положительных, а в средних и высоких широтах - отрицательных аномалий.

Средняя стратосфера повторяет расположение аномалий, но с меньшей интенсивностью, в среднем около 10%. Самые низкие показатели наблюдаются в 2008 году, а самые высокие, местами превышающие 20%, - в 2022. В высоких широтах видно, что первую половину занимает область снижения озона, а вторую половину - повышение. Эти области слабые и равны по интенсивности.

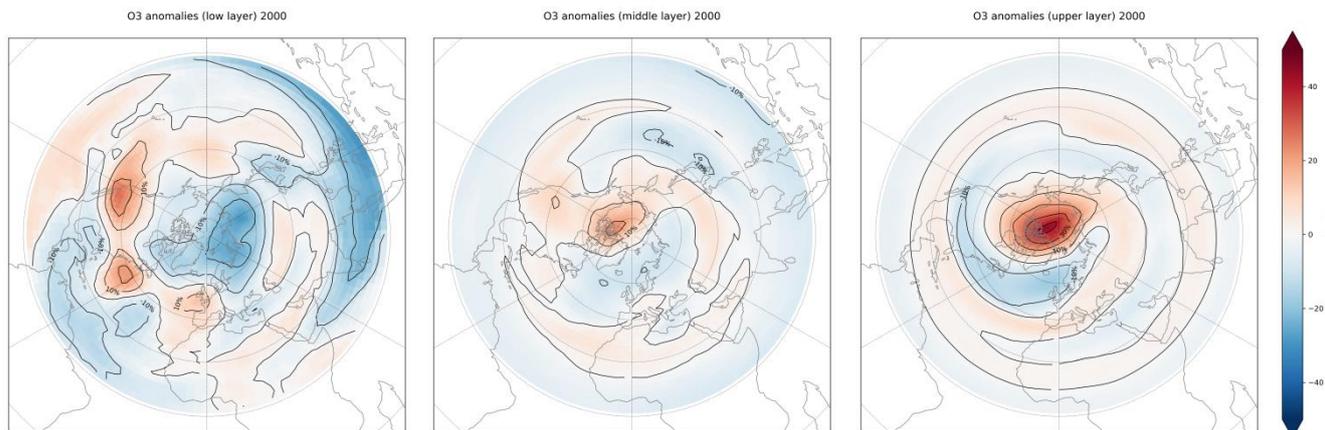
В верхней стратосфере положение аномалий повторяется, как и в средней. В 2008 году аномалии не увеличиваются, но появляются чёткие границы между положительными и отрицательными значениями, при этом последние увеличили свою площадь. В 2010 году область с повышенным содержанием озона достигает более 20%, а область с пониженным содержанием не изменяет значения. В 2020 году отрицательные аномалии превышают 20%, а положительные - более 10%, и они создают спиралевидную структуру. В 2022 году повышение содержания озона превышает 20%, значения отрицательных аномалий не изменились.

Нижняя и средняя стратосферы похожи друг на друга, но в нижней показатели аномалий выше. Верхняя стратосфера повторяет основное расположение аномалий, но на экваторе положительные аномалии сильно снижаются, а в полярном круге интенсивность аномалий увеличивается.

Нижняя

Средняя

Верхняя

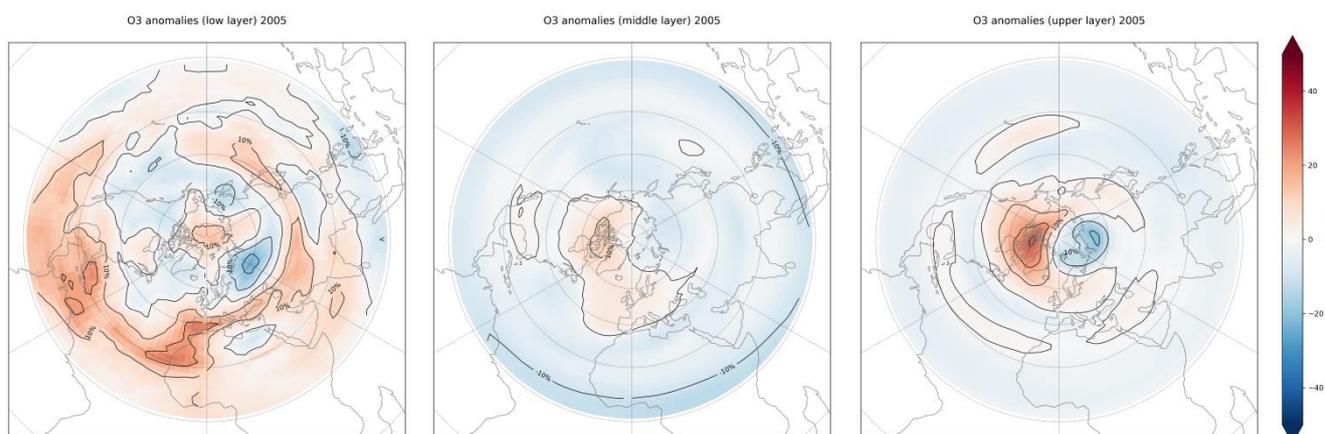


Год: 2000

Нижняя

Средняя

Верхняя

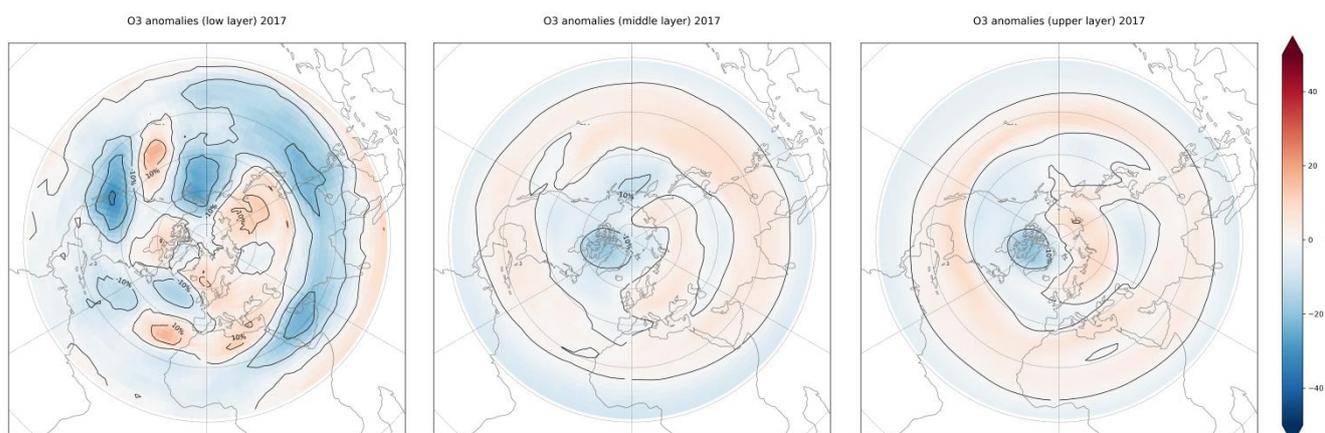


Год: 2005

Нижняя

Средняя

Верхняя

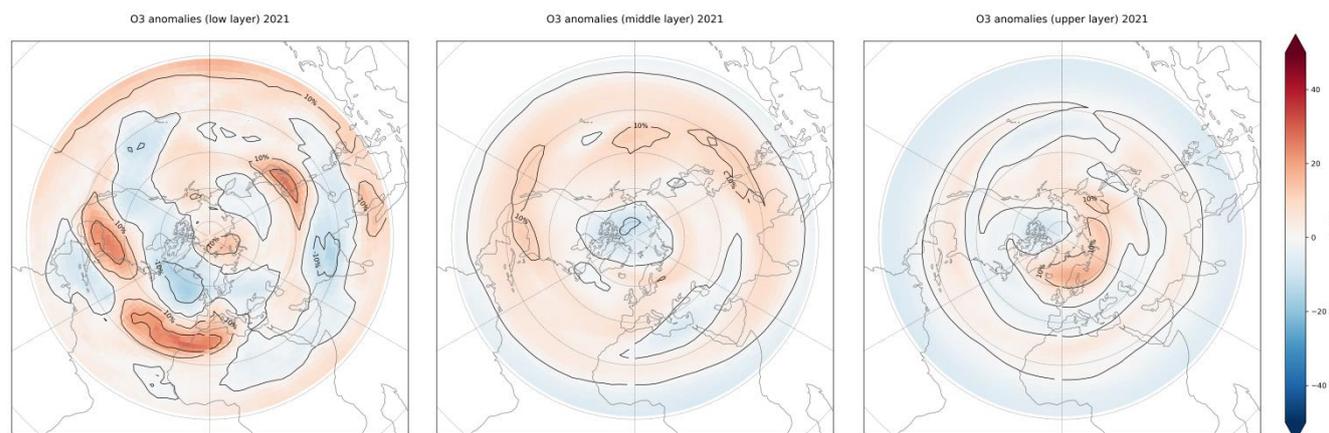


Год: 2017

Нижняя

Средняя

Верхняя



Год: 2021

Рисунок 3.6. Аномалии озона при Ла-Нинья и восточной фазе КДК в ноябре в 2000, 2005, 2017 и 2021 гг.

В нижней стратосфере в 2000 и 2017 годах преобладают сильные отрицательные аномалии. Самые большие области аномалий (более 10%) наблюдаются в районах южной Европы. В 2000 году в основном преобладают отрицательные аномалии выше 10%, частично превышающие 20%. По краям полярного круга расположены положительные аномалии, достигающие до 10%. В 2017 году количество положительных и отрицательных аномалий примерно равно, но отрицательные имеют большие значения (около 20%). В 2005 и 2021 годах в основном доминируют положительные аномалии. Самые интенсивные фрагменты расположены в области южной части Северной Америки и северной части Атлантического океана. На полюсе распределение положительных и отрицательных аномалий равноценно.

В средней стратосфере на фоне отрицательных аномалий располагаются зоны положительных, которые в основном наблюдаются в средних и высоких широтах. В полярном круге сочетается слабое понижение и увеличение содержания озона. Их расположение имеет чёткое распределение, без хаотичных вкраплений. Наибольшие положительные аномалии зафиксированы в 2000 году, а отрицательные - в 2017.

В верхней стратосфере, области с положительными и отрицательными аномалиями оказались в тех же местах, что и в средней стратосфере, но с небольшим смещением и увеличением значений в области полярного круга. В 2000 году положительные аномалии доходят до 40%, а отрицательные - до 10%; вместе они образуют две спирали. В 2005 году область положительных аномалий почти образовала кольцо вокруг отрицательных. В 2017 году расположение и интенсивность аномалий практически не изменились. В 2021 году область положительных аномалий уменьшилась, но появились участки со значениями 10% и выше.

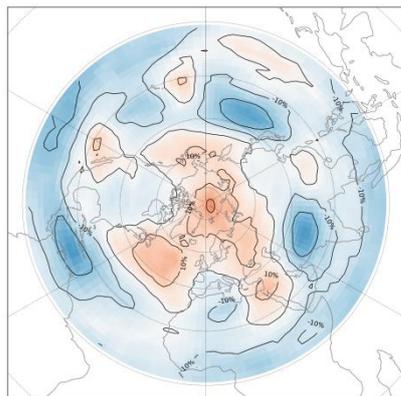
В нижней стратосфере наблюдается сходство по две пары лет. В средней и верхней стратосфере на фоне отрицательных аномалий образуются области положительных. Эти области немного смещаются, увеличиваются или уменьшаются, но общая картина остаётся похожей. Чаще всего в верхней стратосфере амплитуды аномалий выше, чем в средней.

Нижняя

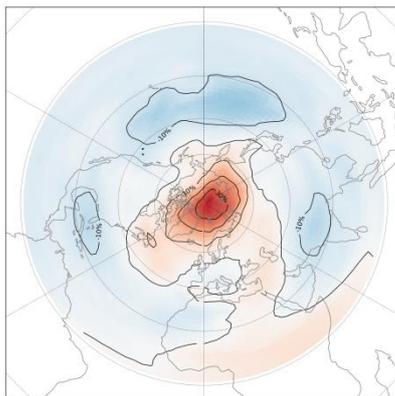
Средняя

Верхняя

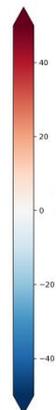
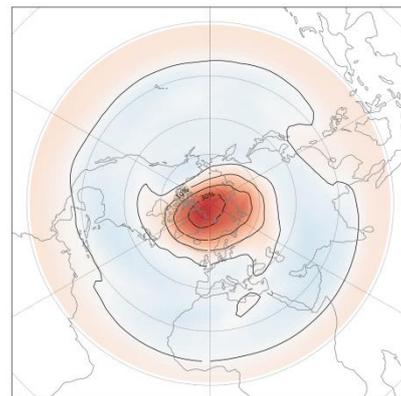
O3 anomalies (low layer) 1987



O3 anomalies (middle layer) 1987



O3 anomalies (upper layer) 1987



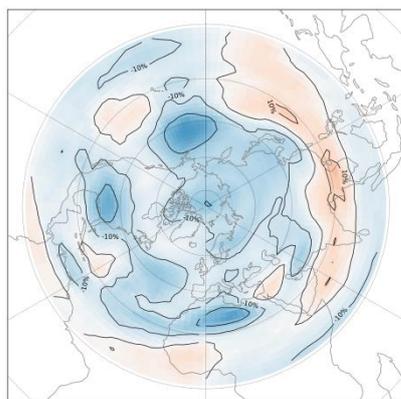
Год: 1987

Нижняя

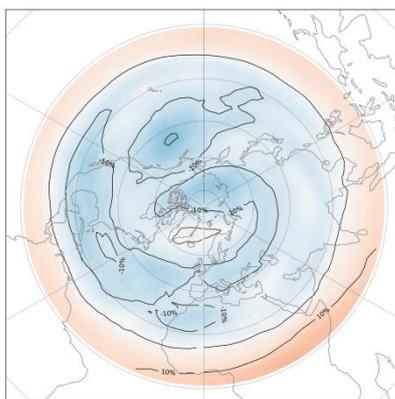
Средняя

Верхняя

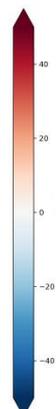
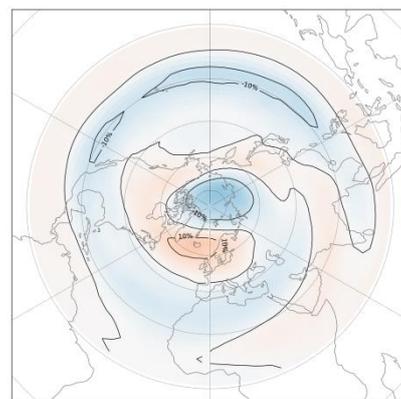
O3 anomalies (low layer) 1992



O3 anomalies (middle layer) 1992



O3 anomalies (upper layer) 1992



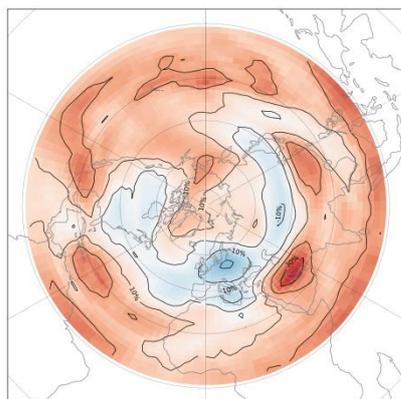
Год: 1992

Нижняя

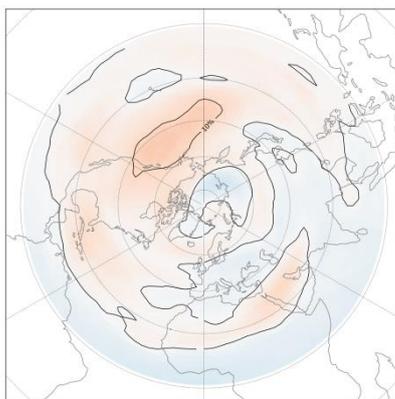
Средняя

Верхняя

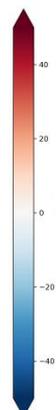
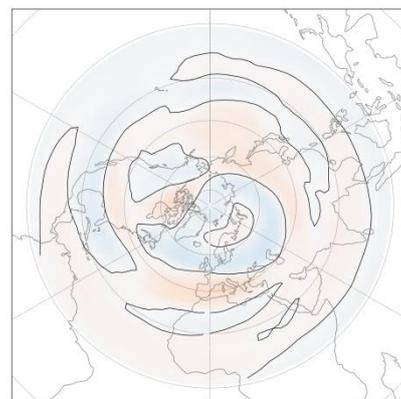
O3 anomalies (low layer) 2006



O3 anomalies (middle layer) 2006



O3 anomalies (upper layer) 2006

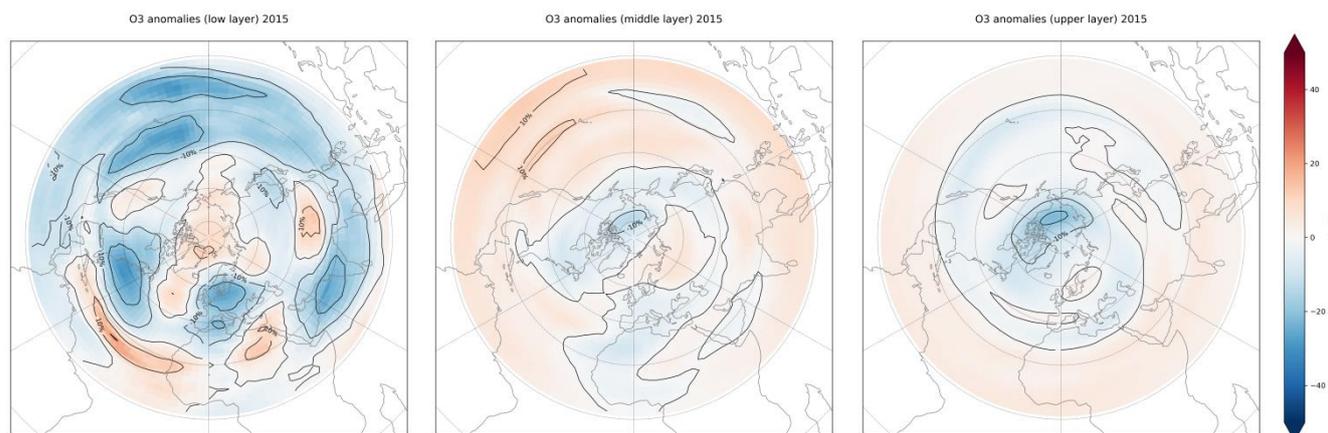


Год: 2006

Нижняя

Средняя

Верхняя



Год: 2015

Рисунок 3.7. Аномалии озона при Эль-Ниньо и западной фазе КДК в декабре в 1987, 1992, 2006 и 2015 гг.

В нижней стратосфере в 1987, 1992 и 2015 годах преобладают отрицательные аномалии, причём их максимальные значения расположены хаотично по всей области. Только в 2006 году положительных аномалий намного больше, чем отрицательных. В полярном круге в 1987 и 2006 годах в основном наблюдается повышение содержания озона, а в 1992 и 2015 годах - понижение.

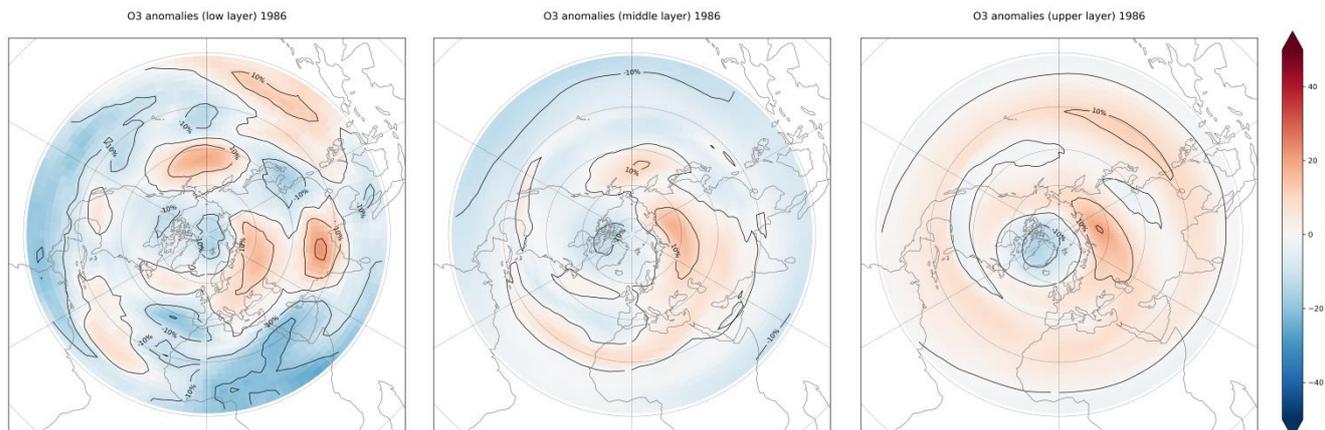
В средней стратосфере над полюсом в 1987 году положительные аномалии самые интенсивные и занимают почти всю территорию; в 1992 году происходит то же самое, но с отрицательными аномалиями. В остальные годы интенсивность аномалий низкая, их площадь примерно равна. Два года на экваторе показывают увеличение содержания озона, а два других - уменьшение.

В верхней стратосфере за три года наблюдается увеличение содержания озона на экваторе. Общая тенденция распределения аномалий сохраняется, как и в средней стратосфере. В 1987 году увеличивается распространение сильных положительных аномалий, и на экваторе теперь в основном наблюдается увеличение содержания озона. Во все годы на общем фоне интенсивность аномалий уменьшается, а на полюсах увеличивается.

Нижняя

Средняя

Верхняя

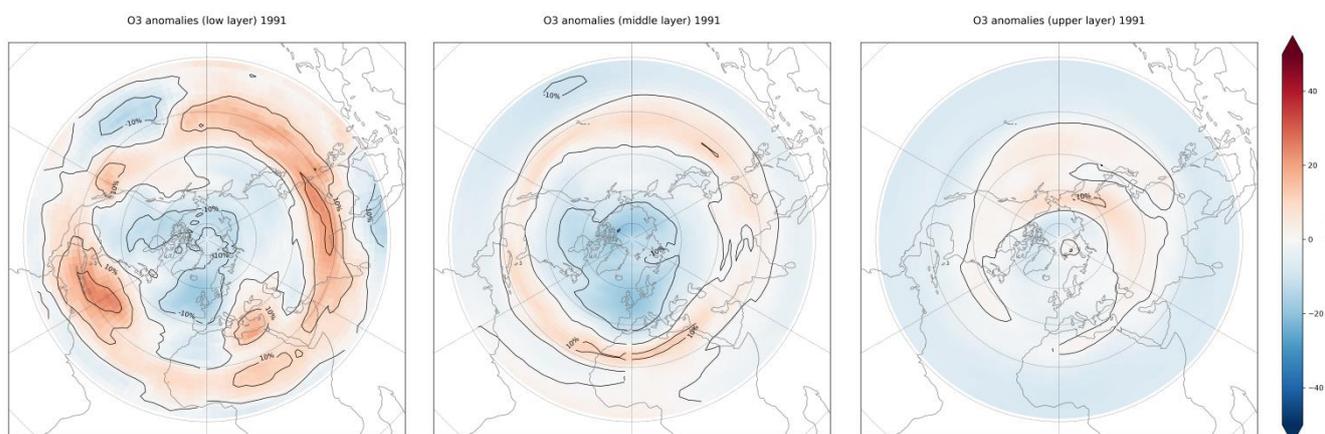


Год: 1986

Нижняя

Средняя

Верхняя

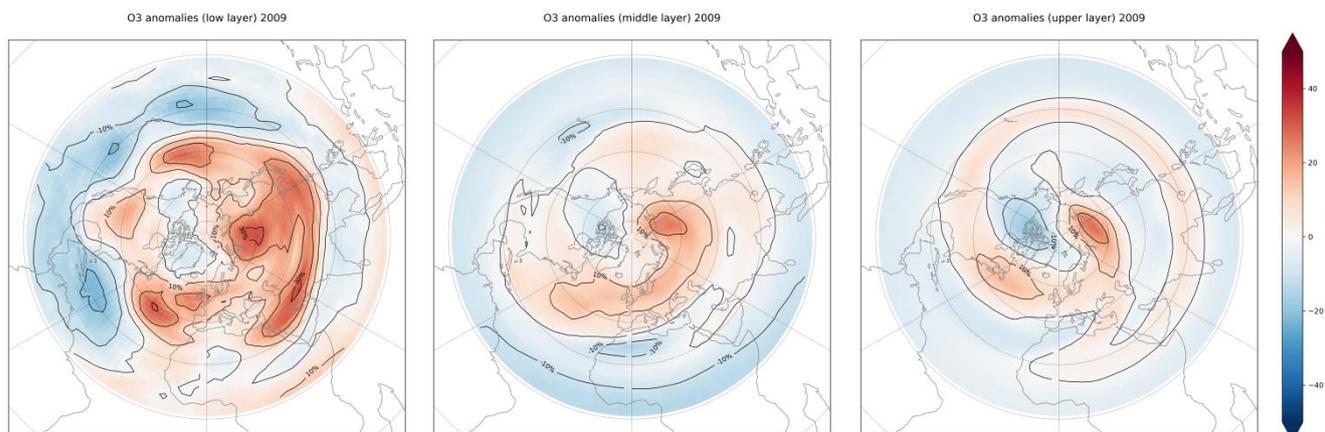


Год: 1991

Нижняя

Средняя

Верхняя

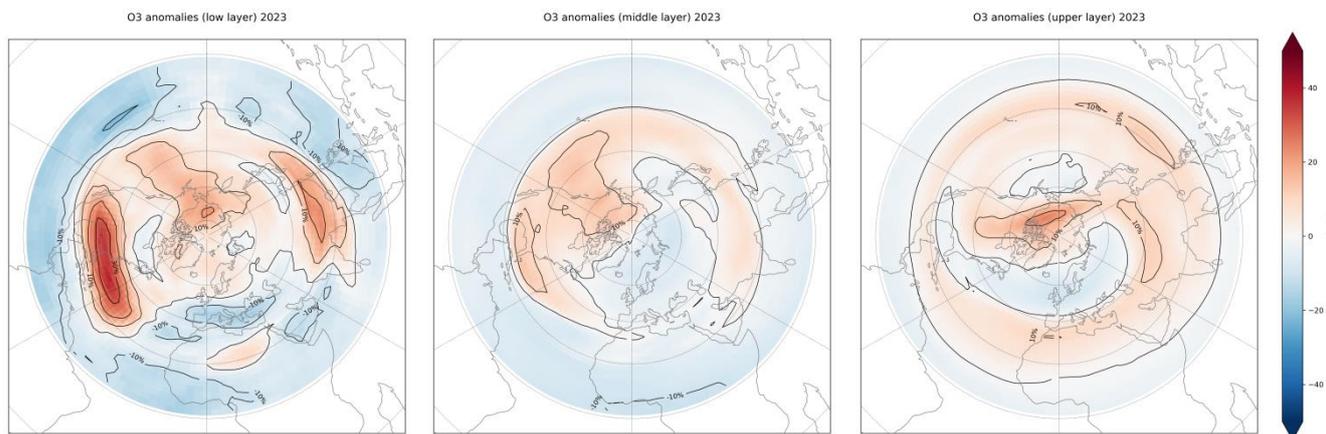


Год: 2009

Нижняя

Средняя

Верхняя



Год: 2023

Рисунок 3.8. Аномалии озона при Эль-Ниньо и восточной фазе КДК в декабре в 1986, 1991, 2009 и 2023 гг.

В нижней стратосфере во все годы наблюдается значительное увеличение положительных аномалий в средних широтах. В 2009 и 2023 годах отмечены области с повышением содержания озона более чем на 30%. В полярном круге в 2009 и 2023 годах доминируют положительные аномалии, в 1991 - отрицательные, а в 1986 году их распределение равномерно.

В средней стратосфере на экваторе преобладают отрицательные аномалии. В 1986, 2009 и 2023 годах на полюсе наблюдаются как положительные, так и отрицательные аномалии, разделяющие его на две области. Только в 1991 году во всём полярном круге происходит стабильное снижение озона.

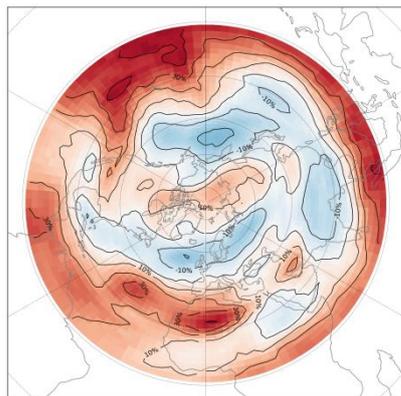
В верхней стратосфере сохраняется преобладание отрицательных аномалий на экваторе. Также изменяется расположение положительных и отрицательных областей, которые в большинстве случаев незначительно смещаются и увеличивают свои значения.

Нижняя

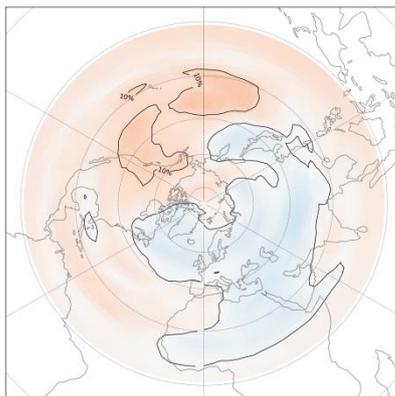
Средняя

Верхняя

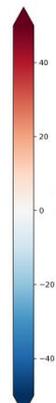
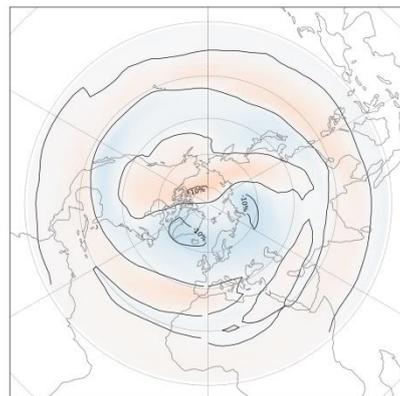
O3 anomalies (low layer) 2008



O3 anomalies (middle layer) 2008



O3 anomalies (upper layer) 2008



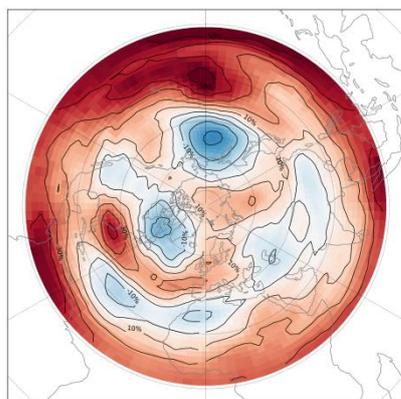
Год: 2008

Нижняя

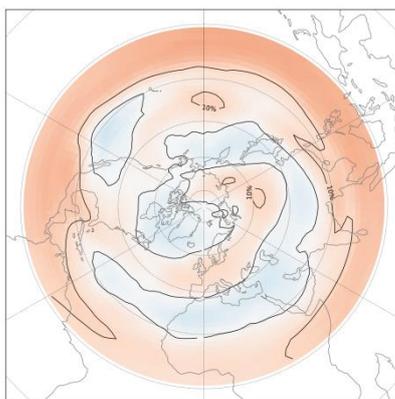
Средняя

Верхняя

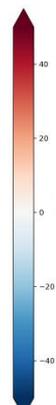
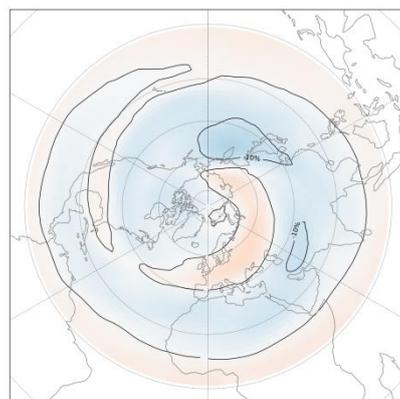
O3 anomalies (low layer) 2010



O3 anomalies (middle layer) 2010



O3 anomalies (upper layer) 2010



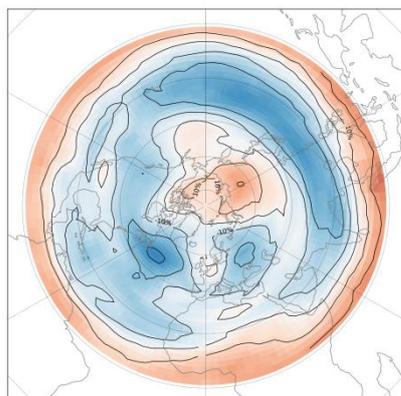
Год: 2010

Нижняя

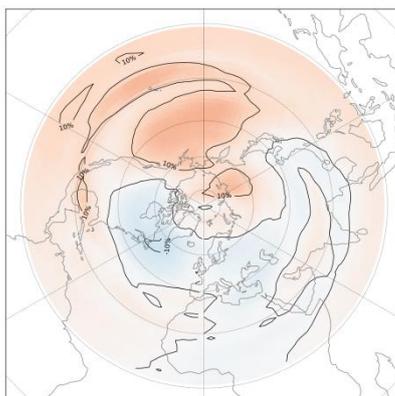
Средняя

Верхняя

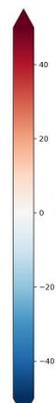
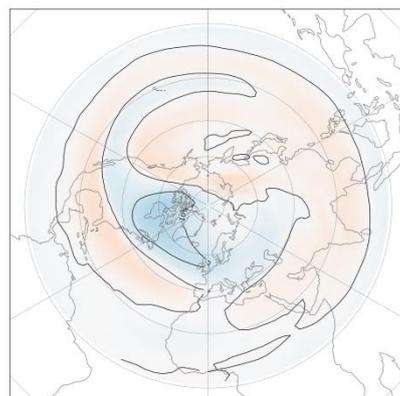
O3 anomalies (low layer) 2020



O3 anomalies (middle layer) 2020



O3 anomalies (upper layer) 2020

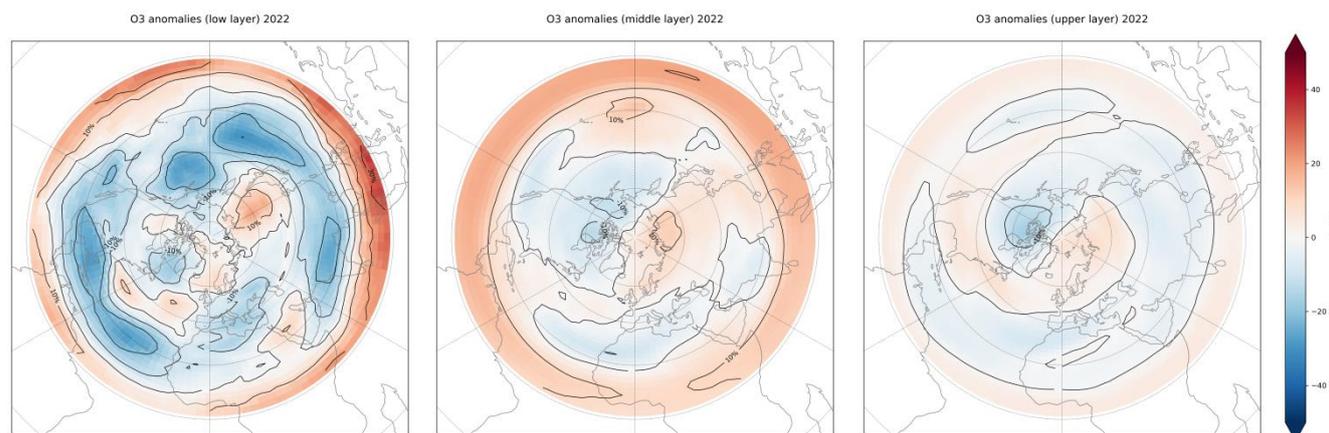


Год: 2020

Нижняя

Средняя

Верхняя



Год: 2022

Рисунок 3.9. Аномалии озона при Ла-Нинья и восточной фазе КДК в декабре в 2008, 2010, 2020, 2022 гг.

В нижней стратосфере в 2010 году наблюдаются рекордные показатели положительных аномалий, превышающие 50%. В 2008 году значения ниже, но тем не менее превышают 40%. Во все годы самые высокие положительные аномалии расположены в зоне экватора, а отрицательные - в средних и высоких широтах. В полярном круге области с отрицательными и положительными аномалиями расположены хаотично, многие превышают 10%.

В средней стратосфере во все годы на фоне положительных аномалий появляются достаточно большие области со слабыми отрицательными аномалиями в средних и высоких широтах. В полярном круге во все годы одну часть занимают положительные аномалии, а другую - отрицательные. Все аномалии очень низкие, только местами увеличиваются более чем на 10%.

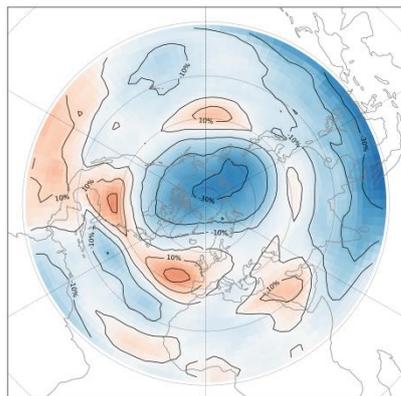
В верхней стратосфере области отрицательных аномалий увеличиваются по сравнению со средней стратосферой. Положительные аномалии уменьшают свою интенсивность. Основное расположение аномалий сохраняется, как и в средней стратосфере.

Нижняя

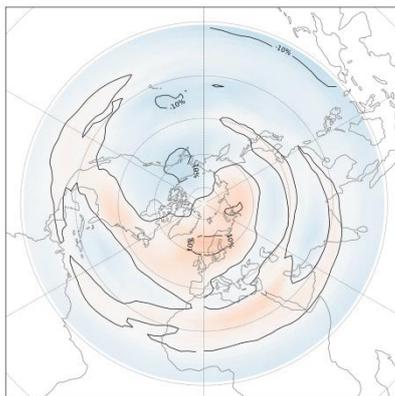
Средняя

Верхняя

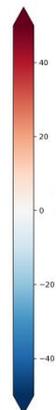
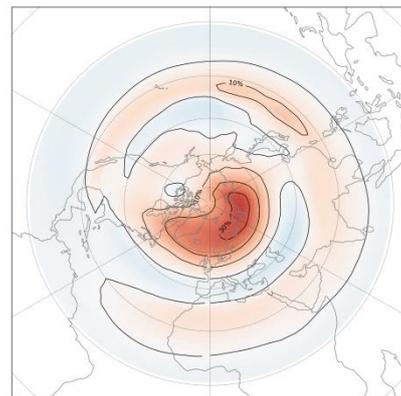
O3 anomalies (low layer) 2000



O3 anomalies (middle layer) 2000



O3 anomalies (upper layer) 2000



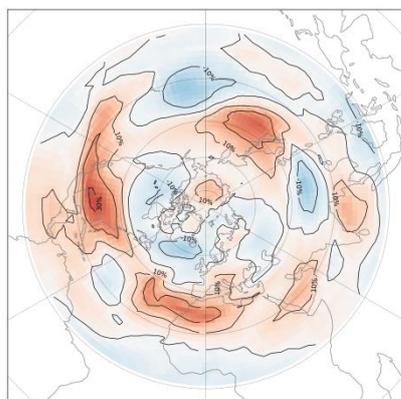
Год: 2000

Нижняя

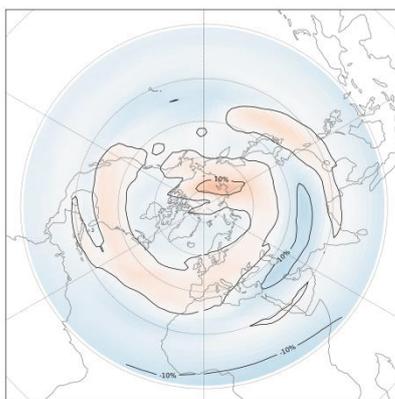
Средняя

Верхняя

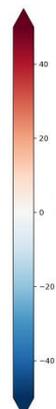
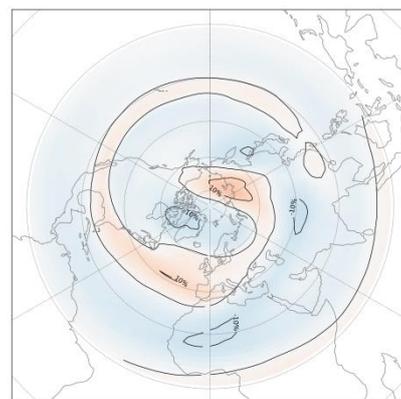
O3 anomalies (low layer) 2005



O3 anomalies (middle layer) 2005



O3 anomalies (upper layer) 2005



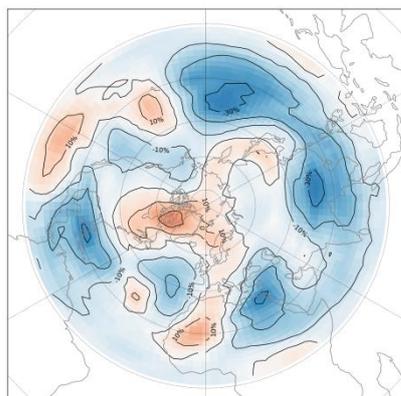
Год: 2005

Нижняя

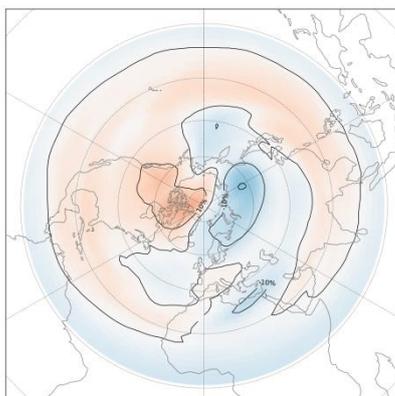
Средняя

Верхняя

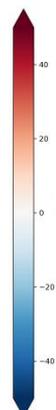
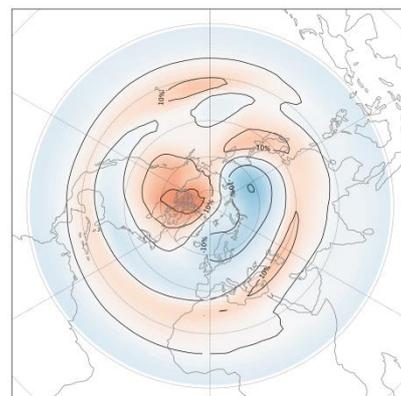
O3 anomalies (low layer) 2017



O3 anomalies (middle layer) 2017



O3 anomalies (upper layer) 2017

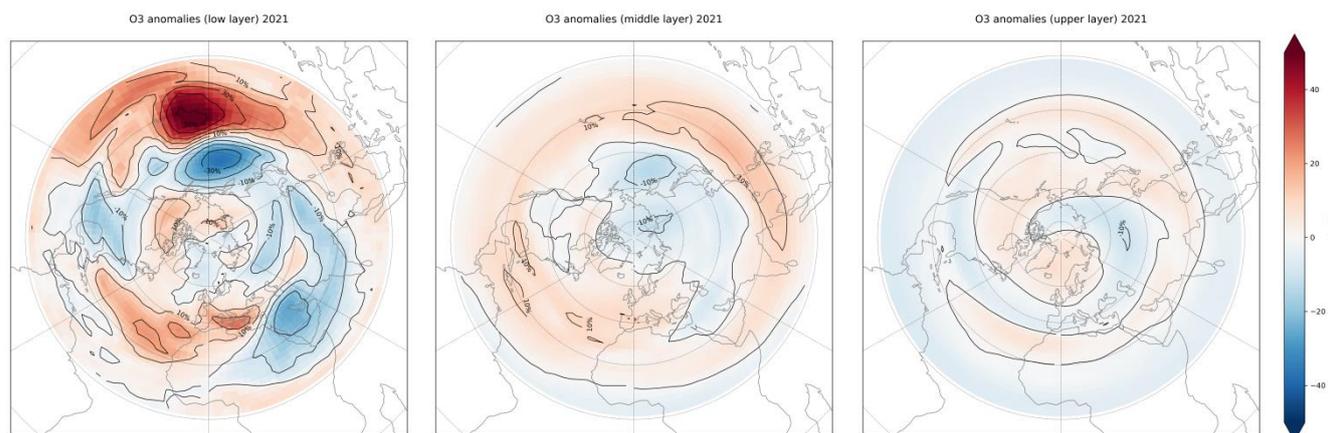


Год: 2017

Нижняя

Средняя

Верхняя



Год: 2021

Рисунок 3.10. Аномалии озона при Ла-Нинья и западной фазе КДК в декабре в 2000, 2005, 2017, 2021 гг.

В нижней стратосфере в 2000 и 2017 годах преобладают отрицательные аномалии. В 2000 году на полюсе наблюдаются очень высокие показатели аномалий, превышающие 30%. В 2005 году положительные и отрицательные аномалии располагаются хаотично и примерно в равном количестве, однако в некоторых местах положительные аномалии имеют большие значения. В 2021 году выделяется область сильных положительных аномалий, превышающих 50%.

В средней стратосфере на экваторе в основном наблюдается снижение содержания озона. В 2000 и 2005 годах почти вся область занята отрицательными аномалиями. Во все годы полюс делится на две примерно равные части .

В верхней стратосфере расположение положительных и отрицательных аномалий сохраняется. В 2000 году увеличивается площадь положительных аномалий, а в 2005 и 2021 годах их количество уменьшилось.

Чаще всего верхняя стратосфера повторяла расположение аномалий, как в средней стратосфере, но с большей интенсивностью. В нижней стратосфере области аномалий выше 10% были больше, чем в других слоях атмосферы. Во

время западных фаз КДК в средней и верхней стратосфере на фоне положительных аномалий появлялись области отрицательных аномалий, а во время восточных фаз наоборот. То есть во время западной фазы в основном на экваторе в средней и верхней стратосфере преобладали положительные аномалии, а при восточной - отрицательные.

В декабре в нижней стратосфере аномалии имели большие значения, чем в ноябре. В средней и верхней стратосфере значения аномалий в декабре и ноябре примерно одинаковые.

3.3 График ящик с усами

Чтобы оценить влияние сочетаний фаз ЭНЮК и квазидвухлетнего колебания на содержание озона в стратосфере был построен график «ящик с усами». Для построения графиков взяты данные аномалий содержания озона от 70° с.ш. до 90° с.ш. Все значения представлены в килограммах озона на килограмм воздуха и отражают отклонения от многолетней климатической нормы. Разделения на группы фаз и слои стратосферы аналогичны тем, что были в прошлом параграфе.

Такой подход обладает множеством преимуществ. Диаграмма позволяет наглядно отразить ключевые характеристики выборки: диапазон, центральную тенденцию и размах. Благодаря её форме легко оценить, в какую сторону (положительную или отрицательную) смещено распределение значений. Метод позволяет сопоставить разные группы фаз. Это позволяет выявить различия в медианных значениях, межквартильном размахе и наличие экстремальных значений. Ширина межквартильного размаха и наличие или отсутствие выбросов позволяет судить о степени устойчивости озонового на различные сочетания ЭНЮК и КДК.

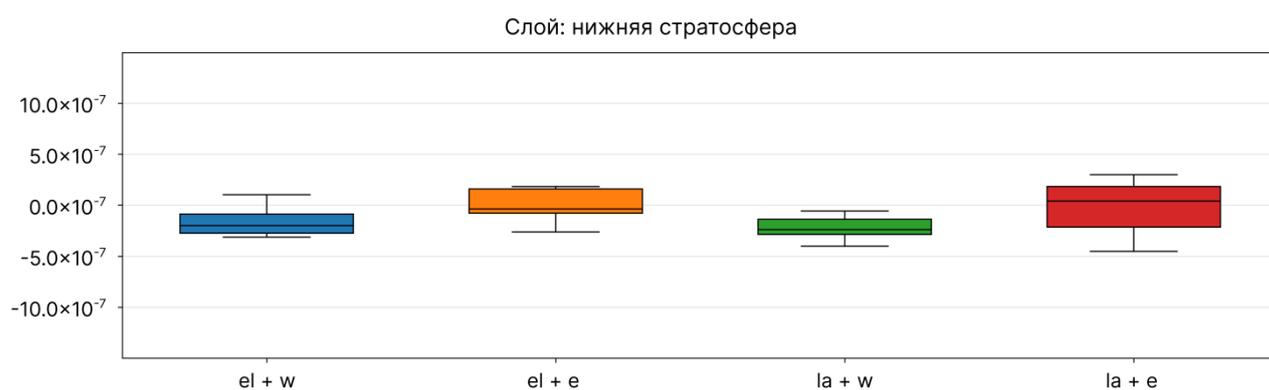


Рисунок 3.11. Аномалии содержания озона (кг/кг) в нижней стратосфере при Эль-Ниньо и западной фазе КДК, Эль-Ниньо и восточной фазе КДК, Ла-Нинья и западной фазе КДК, Ла-Нинья и восточной фазе КДК.

На рисунке 3.11 представлены аномалии содержания озона в нижней стратосфере. Все ящики с усами имеют узкий размах. Проанализируем каждую группу подробнее.

При Эль-Ниньо и западной фазе КДК основная выборка (50% данных) находится в пределах от $-2,7 \times 10^{-7}$ до $-0,9 \times 10^{-7}$ кг/кг. В исследуемые периоды концентрация озона постоянно снижалась. Медиана и более 75% данных имеют отрицательные значения. Нижний ус (наименьшее значение) равен $-3,2 \times 10^{-7}$ кг/кг, а верхний (наибольшее) - 1×10^{-7} кг/кг. Они показывают диапазон изменения всех зарегистрированных значений. Несмотря на наличие отдельных положительных значений, распределение смещено в отрицательную область. Это свидетельствует о том, что эти условия по большей части способствуют снижению концентрации озона. Отсутствие выбросов указывает на относительную однородность влияния Эль-Ниньо и западной фазы КДК на концентрацию озона.

Во время Эль-Ниньо и восточной фазы КДК медиана близка к нулю. Наблюдается менее выраженное снижение озонового содержания по сравнению с западной фазой КДК. Распределение асимметрично, с расширением в сторону положительных значений. Проявляется более высокое разнообразие значений и наличие участков с избыточным содержанием озона. В данных условиях наблюдается высокая неоднородность озоновых аномалий, так как отрицательные и положительные аномалии находятся в широком диапазоне.

При условиях Ла-Нинья и западной фазе КДК наблюдается выраженное снижение концентрации озона относительно климатической нормы. Все значения ниже нуля - стабильная тенденция дефицита озона. Отсутствие положительных значений указывает на односторонний характер аномалий. Данная группа фаз оказывает выраженное подавляющее воздействие на озоновый слой нижней стратосферы.

Аномалии содержания озона при Ла-Нинья и восточной фазе КДК характеризуются более сильным размахом, а также асимметричным распределением значений. Значительная часть данных показывает

положительное отклонение от нормы. Наличие существенных отрицательных значений и расширение распределения в отрицательную область указывает на периоды с пониженной концентрацией озона. Такая структура распределения может быть обусловлена чередованием восходящих и нисходящих потоков.

Наиболее сильное снижение содержания озона в нижней стратосфере происходит при западной фазе КДК и Ла-Нинья. Восточная фаза КДК и Ла-Нинья способствуют большей изменчивости и появлению положительных аномалий.

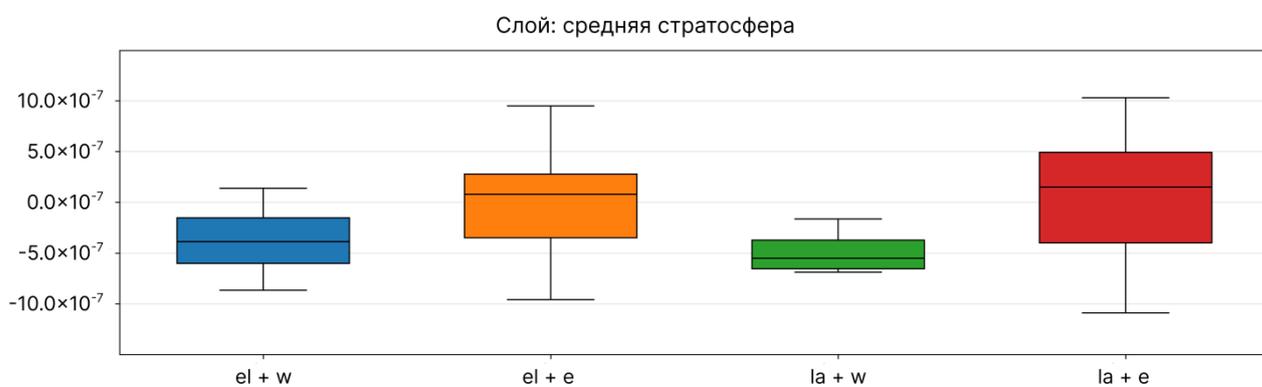


Рисунок 3.12. Аномалии содержания озона (кг/кг) в средней стратосфере при Эль-Ниньо и западной фазе КДК, Эль-Ниньо и восточной фазе КДК, Ла-Нинья и западной фазе КДК, Ла-Нинья и восточной фазе КДК.

На рисунке 3.12 представлены аномалии содержания озона в средней стратосфере. В условиях Эль-Ниньо и западной фазы КДК преобладают отрицательные значения, положительные составляют около 12%. Визуально ящик симметричен, медиана находится по центру, а длина усов примерно равна. Следовательно, распределение данных близко к симметричному. Большое количество отрицательных значений указывает на доминирующее влияние процессов, способствующих разрушению озона или его вертикальному перераспределению. Положительные аномалии могут происходить, когда воздух локально поднимается.

При Эль-Ниньо и восточной фазе КДК значения изменяются в большом диапазоне: от $-9,6 \times 10^{-7}$ до $9,5 \times 10^{-7}$ кг/кг. Медиана находится на уровне чуть выше нуля, поэтому преобладающее отклонение имеет слабо выраженные положительные аномалии. Можно заметить значительное расширение усов по обе стороны от межквартильного интервала. Значит, происходят сильные снижения и увеличения содержания озона. В этих условиях распределение озона нестабильно, формируются контрастные озоновые режимы.

При Ла-Нинья и западной фазе КДК аномалии имеют только отрицательные значения. Отсутствие положительных значений и симметрии в пределах распределения показывает стабильный и направленный характер аномалий. Скорее всего происходили устойчивые нисходящие движения, а также снижался вертикальный перенос озона из верхних слоёв атмосферы. Данные условия способствуют эффективному разрушению озона и ограничению его поступления.

В условиях Ла-Нинья и восточной фазы КДК выборка имеет самый широкий диапазон значений - самый широкий диапазон данных среди всех ящичков с усами. Во время этих фаз процессы накладываются друг на друга, происходит усиленное разрушение и накопление озона. Восточная фаза КДК и Ла-Нинья способствуют формированию нестабильной циркуляции, при которой озоновое содержание в средней стратосфере может быстро меняться.

Ла-Нинья и западная фаза КДК связаны с устойчивым дефицитом озона в средней стратосфере. Ла-Нинья и восточная фаза создают более благоприятные условия для накопления озона.

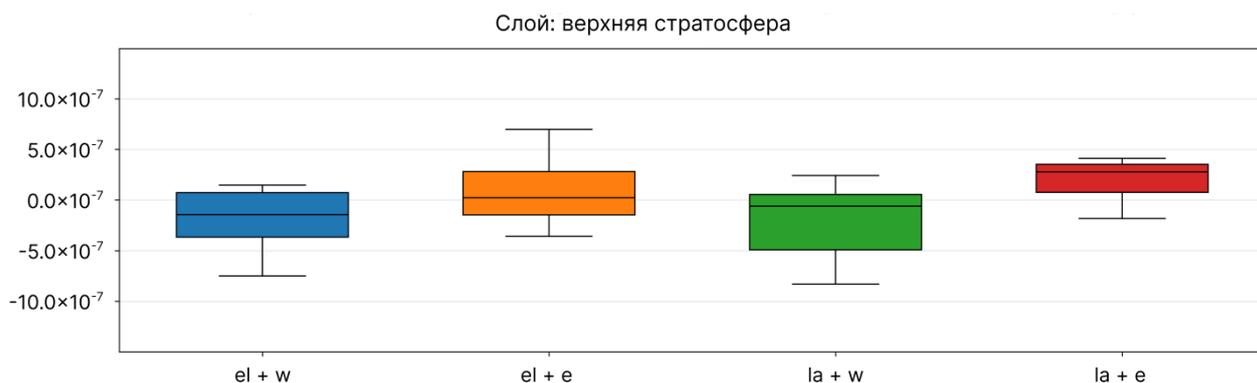


Рисунок 3.13. Аномалии содержания озона (кг/кг) в верхней стратосфере при Эль-Ниньо и западной фазе КДК, Эль-Ниньо и восточной фазе КДК, Ла-Нинья и западной фазе КДК, Ла-Нинья и восточной фазе КДК.

На рисунке 3.13 представлены аномалии содержания озона в верхней стратосфере. Рассмотрим отдельно каждый ящик с усами.

Мы видим, что в условиях Эль-Ниньо и западной фазы КДК в верхней стратосфере преобладают отрицательные аномалии озона. Верхний ус короткий и находится в положительных значениях; также положительные аномалии имеет часть значений между медианой и верхним квартилем. Остальная часть аномалий переходит через ноль и принимает отрицательные значения. Наблюдается асимметрия размаха, так как медиана смещена в сторону наибольшего значения, а минимальные аномалии превышают максимальные в 5 раз. Это приводит к смещению в сторону отрицательных аномалий. Значит, при данных условиях в верхнюю стратосферу поступает меньше озона или он быстрее разрушается. Иногда может происходить небольшое накопление озона, но намного реже.

При Эль-Ниньо и восточной фазе КДК накопление и уменьшение озона происходит почти одинаково. Медиана находится немного выше нуля, примерно при значении $0,2 \times 10^{-7}$ кг/кг. То есть есть небольшое смещение в сторону положительных аномалий, но оно незначительно. Следовательно, при данных условиях происходит постоянное изменение в накоплении и потерях озона. Происходит вертикальный перенос озона из нижних слоёв стратосферы или

замедляется разрушение озона. Но потери озона не компенсируются полностью, поэтому остаются отрицательные аномалии.

В случае с Ла-Нинья и западной фазой КДК происходит очень похожее распределение аномалий, как в условиях Эль-Ниньо и западной фазы КДК. Но в этом случае размах данных больше, а медиана ближе к нулю. И если в том случае в межквартильном размахе медиана находилась посередине, то здесь медиана сильно смещена к верхнему квартилю. Но в целом такой же вывод: группа фаз способствует по большей части снижению содержания озона.

Последняя группа: Ла-Нинья и восточная фаза КДК. Можно сразу заметить, что у неё самый маленький диапазон значений. Также лишь часть нижнего уса находится в отрицательных значениях, поэтому более 75% аномалий положительные. При Ла-Нинья и восточной фазе КДК происходит устойчивое накопление озона с небольшими отрицательными аномалиями.

Таким образом, более благоприятные условия для снижения озонового содержания в верхней стратосфере связаны с сочетанием Ла-Нинья и западной фазы КДК. Наибольший устойчивый прирост - с Ла-Нинья и восточной фазой.

Мы можем заметить, что в нижней стратосфере ящики с усам имеют самый небольшой размах, в сравнении с другими слоями. У верхней стратосфере диапазоны значений увеличиваются. В средней стратосфере половина ящиков имеет самый большой разброс данных из всех исследуемых. Можно сделать вывод: наименьшее влияние на содержание озона в нижней стратосфере, а наибольшее - в средней.

Анализ аномалий содержания озона с использованием графиков «ящик с усам» позволил выявить систематическое влияние сочетаний фаз (ЭНЮК) и (КДК) на концентрацию озона в разных слоях стратосферы. Полученные данные показывают, что уменьшение или увеличение аномалий озона зависит не только от типа климатического явления, но и от фазы КДК и вертикального положения в атмосфере.

Во время западной фазы во всех слоях стратосферы наблюдается либо преобладание отрицательных аномалий с небольшим количеством положительных, либо только отрицательные аномалии. В средней и нижней стратосфере при сочетании с Ла-Нинья аномалии всегда отрицательные - содержание озона всегда снижается. В остальных случаях есть небольшое количество положительных аномалий. При Эль-Ниньо в двух слоях размах больше, чем при Ла-Нинья, а в трёх слоях есть положительные значения. Поэтому при данных условиях озон может накапливаться, но чаще всего разрушается.

При восточной фазе КДК в основном преобладают положительные аномалии. За исключением верхней стратосферы в сочетании с Ла-Нинья размах значений становится больше, чем при Эль-Ниньо. Медиана во всех трёх слоях имеет большее положительное значение при Ла-Нинья. Следовательно, во время Ла-Нинья и восточной фазы КДК с небольшим перевесом чаще происходит увеличение содержания озона, тем не менее снижение также озона происходит, но с меньшей частотой. В случае с Эль-Ниньо происходит аналогичная ситуация, но с меньшими значениями (кроме верхней стратосферы).

Также можно заметить, что в верхней стратосфере больший размах данных наблюдается во время условий Эль-Ниньо и восточной фазы КДК, а также Ла-Нинья и западной фазы КДК. В средней и нижней стратосфере происходит обратная зависимость: размах больше при сочетании Эль-Ниньо и западной фазы КДК, Ла-Нинья и восточной фазы КДК. То есть в верхней стратосфере больший разброс максимальных и минимальных значений происходит при фазах, которые вместе либо увеличивают, либо уменьшают содержание озона. В средней и нижней стратосфере, наоборот, больший разброс происходит при сочетании фаз, одна из которых уменьшает содержание озона, а вторая увеличивает.

Мы можем сделать несколько выводов. Больше влияния на то, положительными будут аномалии или отрицательными, оказывают фазы КДК. Во всех слоях стратосферы Ла-Нинья и восточная фаза КДК способствуют наибольшему увеличению озона. Условия Ла-Нинья и западной фазы КДК

способствуют наибольшему снижению содержания озона во всех слоях стратосферы.

Заключение

В данной работе было проведено комплексное исследование влияния фаз Эль-Ниньо Южного колебания (ЭНЮК) и квазидвухлетнего колебания (КДК) на распределение озона в стратосфере. Поскольку эти колебания напрямую не влияют на стратосферный вихрь, но влияют на распределение озона в стратосфере, мы подробно изучили аномалии содержания озона. Большое содержание озона ослабляет стратосферный вихрь, а низкое — усиливает.

На первом этапе исследования были проанализированы архивные данные индексов MEI.v2 и КДК за период с 1980 по 2024 год. Это позволило выделить годы с явлениями Эль-Ниньо и Ла-Нинья, а также чёткими восточной и западной фазами КДК. Особое внимание уделялось ноябрю и декабрю, когда полярный стратосферный вихрь наиболее стабилен, а влияние внезапных стратосферных потеплений минимально.

На втором этапе работы использовались данные реанализа MERRA-2 для изучения распределения озона в трех слоях стратосферы: нижнем (100-70 гПа), среднем (50-30 гПа) и верхнем (20-7 гПа). Были рассчитаны нормы содержания озона и его аномалии, что позволило выявить пространственно-временные закономерности в изменении озонового слоя. Для визуализации результатов были построены карты аномалий озона и графики «ящик с усами», которые наглядно продемонстрировали влияние различных сочетаний фаз ЭНЮК и КДК на содержание озона.

На третьем этапе исследования был проведен анализ аномалий озона в зависимости от фаз ЭНЮК и КДК. Результаты показали, что:

Фазы КДК оказывают более значительное влияние на аномалии озона, чем фазы ЭНЮК. Во всех слоях стратосферы восточная фаза КДК способствует увеличению содержания озона, а западная фаза — его снижению.

Наибольшее влияние на содержание озона наблюдается в средней стратосфере, где аномалии имеют наибольший размах значений. В нижней стратосфере влияние менее выражено, а в верхней — более стабильно.

Сочетание Ла-Нинья и восточной фазы КДК является наиболее благоприятным для накопления озона во всех слоях стратосферы, тогда как сочетание Ла-Нинья и западной фазы КДК приводит к его устойчивому дефициту.

При Эль-Ниньо влияние фаз КДК менее однозначно: наблюдаются как положительные, так и отрицательные аномалии, что свидетельствует о сложном взаимодействии процессов в стратосфере.

Основные выводы работы:

1. В условиях Ла-Нинья и восточной фазы КДК наблюдается увеличение содержания озона в стратосфере над Северным полюсом. Это приводит к локальному потеплению в полярной стратосфере. В результате снижается температурный градиент между средними широтами и полюсом, что ослабляет циркумполярный стратосферный вихрь, делая его менее интенсивным и устойчивым.

2. Во время Ла-Нинья и западной фазе КДК стратосфера над полярным регионом испытывает устойчивое снижение содержания озона. Усиливается охлаждение полярной стратосферы. Это приводит к увеличению температурного контраста между полюсом и средними широтами. Данные условия усиливают стратосферный полярный вихрь, он становится более мощным и стабильным.

Список литературы

- [1] – Timmermann A., An S.-I., Kug J.-S. El Niño–Southern Oscillation complexity // Springer Nature Limited, 2018, p. 535.
- [2] – Domeisen D. I. V., Garfinkel C. I., Butler A. H. The Teleconnection of El Niño Southern Oscillation to the Stratosphere // Reviews of Geophysics, 2019, Volume 57, Issue 1, p. 6-7 and 27-28.
- [3] – Philander S.G. H. El Niño Southern Oscillation phenomena // Springer Nature Limited, 1983, p. 295.
- [4] – What are El Niño and La Niña? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ninonina.html>
- [5] – El Niño, [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://science.nasa.gov/earth/explore/el-nino/>
- [6] – Yeh S.-W., Kug J.-S., Dewitte B. El Niño in a changing climate // Springer Nature Limited, 2009, p. 511.
- [7] – Butchart N. The Brewer-Dobson circulation // Reviews of Geophysics, 2014, Vol 52, Issue 2, p. 157.
- [8] – Cohen N. Y., Gerber E. P., Bühler O. What Drives the Brewer–Dobson Circulation? // Journal of the Atmospheric Sciences, 2014, p. 3837-3839.
- [9] – Diallo M., Konopka P., Santee M. L. Structural changes in the shallow and transition branch of the Brewer–Dobson circulation induced by El Niño // Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, p. 425-426 and 438.
- [10] – Anstey J. A., Osprey S. M., Alexander J. Impacts, processes and projections of the quasi-biennial oscillation // Springer Nature Limited, 2022, p. 157.
- [11] – Baldwin M. P., Gray L. J., Dunkerton T. J. The quasi-biennial oscillation // Reviews of Geophysics, 2001, p.179-185.
- [12] – Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М. Квазидвухлетние Колебания в атмосфере Земли // Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований, 2011, с. 6-7, 28-29.

[13] – Cavallo S., G. J. Hakim. Potential vorticity diagnosis of a tropopause polar cyclone // MONTHLY WEATHER REVIEW, VOLUME 137, 2009, 1358–1371.

[14] – Darryn W. Waugh, Adam H. Sobel, Lorenzo M. Polvani. Bulletin of the American Meteorological Society // American Meteorological Society, 2017, p. 37-41.

[15] – Waugh D. W., Polvani L. M. The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry // Geophysical Monograph Series, Vol. 190, 2010, p. 43-44.

[16] – Waugh D. W., W. J. Randel. Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics // American Meteorological Society, Vol. 56, 1999, p. 1594–1613.

[17] – Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>

[18] – El Niño / Southern Oscillation (ENSO) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/technical-discussion>

[19] – The Quasi-biennial Oscillation (QBO) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/qbo/#intro

[20] – Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>