



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

Кафедра метеорологических прогнозов
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Оценка динамического и теплового состояния средней атмосферы
высоких широт на основе данных реанализа»

Исполнитель Кошкина Анна Сергеевна
(фамилия, имя, отчество)

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

«К защите допускаю»

заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

« 12 » июня 2022 г.

Санкт-Петербург
2022

Оглавление

1. Стратосферно-тропосферные взаимодействия	3
1.1. Вертикальная структура атмосферы. Взаимодействие между слоями. Исследования и их важность	6
1.2. События в этих слоях:.....	6
1.2.1 Эль Ниньо/Южное Колебание	7
1.2.2 Северо-Атлантическое Колебание	8
1.2.3 Колебания с выраженным периодом: КДК, Маддена — Джулиана	9
1.2.4 Полярный вихрь и события, связанные с ним: ВСП, блокирующие..	10
2. Данные и методы.....	12
2.1. Реанализ.....	12
2.1.1. Что такое, какие бывают	12
2.1.2. Реанализы, рассматриваемые в работе	13
2.2. ЕОФ.....	14
2.2.1. Что такое	14
2.2.2. Какие могут быть проблемы и как решаются	15
2.2.3. Как мы делали	15
3. Результаты.....	16
3.1. Общее состояние N и T за 20 лет и их дисперсия.....	16
3.2. Проблемы с реанализами.....	19
3.3. Сравнение реанализов.....	21
3.4. Полученные ЕОФ и главные компоненты (РС)	23
3.4.1. Долготные вариации.....	24
3.4.2. Высотные профили	25
3.5. Связь результатов с Эль Ниньо, ВСП, САК.....	52
3.5.1. На разных номерах ЕОФ	60
Заключение	
Список использованных источников	64

1. Стратосферно-тропосферные взаимодействия

Несмотря на сильное различие в своих характеристиках (таких как распределение температуры с высотой, химический состав и масштабы процессов), тропосфера и стратосфера тесно взаимосвязаны. Изменения в одном слое влияют на состояние другого посредством сложных процессов радиационного, динамического и химического взаимодействия. Так, усиление активности планетарных волн в тропосфере может вызывать внезапные стратосферные потепления (ВСП), а отклонения от климатического состояния в стратосфере (ВСП, или напротив, усиление полярного вихря) имеет заметное влияние на динамику тропосферы.

В последние годы много исследований посвящается стратосферно-тропосферному взаимодействию. Данные об этих связях могут быть использованы как в долгосрочных прогнозах погоды, так и в исследованиях изменения климата, особо актуальных в последнее время, а также в целом важны для общего понимания физики атмосферных процессов.

Например, в статье Z.D. Lawrence et al. [1] описан аномально сильный стратосферный полярный вихрь зимы 2019–2020 гг., причины его возникновения и его воздействие на состояние озонового слоя и погоду тропосферы.

Стратосферный полярный вихрь рассмотрен в статье через зонально осредненные значения зонального ветра на высотах 15–50 км по данным реанализа MERRA2. Отмечено, что полярный вихрь на уровнях 100 и 10 гПа зимнего сезона 2019–2020 гг. был одним из наиболее сильных за всю историю наблюдений. В этой статье описаны явления, способствующие данному положению вихря, а именно: пониженная волновая активность нижней тропосферы с декабря по февраль, а также сама конфигурация вихря, которая создала условия для отражения волн, поднимающихся из тропосферы, обратно вниз и тем самым способствовала охлаждению и усилению вихря.

Последствиями стало понижение количества стратосферного озона на полюсе до рекордно низких значений, а также увеличение аномалий приповерхностной температуры и количества осадков.

Для того чтобы рассмотреть влияние волновой активности на силу полярного вихря, авторы [1] используют метод предложенный Polvani and Waugh (2004), согласно которому о величине данного влияния свидетельствует сила отрицательной корреляционной связи между вертикальной компонентой потока Элиассена-Палма на изобарической поверхности 100 гПа на широтах 40-80 с. ш. осредненной за зимний период и величиной индекса NAM (Северная кольцевая мода) на уровне 50 гПа. По данным зимнего сезона 2019–2020 коэффициент корреляции был высоким и составлял $r = -0,8$.

Также отмечено, что за зимний сезон 2019–2020 гг. наблюдались новые экстремумы: волновая активность на уровне 100 гПа была наиболее низкой среди когда-либо наблюдавшихся, а индекс NAM – самым сильным на 50 гПа среди всех данных реанализа MERRA2.

Согласно авторам статьи, эволюция полярного вихря выглядела следующим образом.

Зональный ветер в средней стратосфере был выше среднего на широтах 60-65 с. ш. на протяжении всего зимнего сезона, но особенно сильным – в середине января. Начиная с января скорость ветров полярного вихря в среднем была выше климатологического среднего на 20 м/с. В феврале аномалии ветра превышали 2 СКО относительно климатологического среднего с ноября по апрель и достигли рекордного значения в то время сезона, когда скорость ветров на этой высоте и широте обычно понижается.

Временной ход аномалий зонального ветра на широте 60 с. ш., как функция давления показывает, что полярный вихрь в стратосфере был сильнее обычного на высотах между 100 и 1 гПа с ноября по апрель. Единственным исключением являлось кратковременное возмущение вихря с середины ноября до начала декабря, о чем свидетельствуют отрицательные аномалии зональных ветров между 30 и 1 гПа. Несмотря на это, ветер в стратосфере стал аномально

положительным за короткий промежуток времени в начале декабря, а более устойчивые положительные аномалии, достигавшие значений на 10 м/с выше обычного, установились в январе.

Также примечательна эволюция зонального ветра в верхней стратосфере и нижней мезосфере (USLM) (приблизительно высота 1 гПа). Следующие за кратковременным стратосферным возмущением середины ноября, ветры в USLM быстро усилились, достигая рекордных значений и превышая 2 СКО за короткий временной промежуток в середине декабря. Начиная с января сила ветров в стратосфере и USLM сильно различалась. Ветры USLM были особенно слабее обычного, тогда как в стратосфере напротив достигали рекордной силы за период с февраля по март.

Стратосферная циркуляция была усиленной на протяжении почти всего зимнего периода с декабря по март. Сравнение зонально осредненных зональных ветров с климатическими данными показывает, что полярный вихрь зимы 2019–2020 был наиболее сильным по данным MERRA2, начиная с 1980 года. Скорость зональных ветров 2019–2020 гг. на уровне 10 гПа стоит на третьем месте после 1966–1967 и 1975–1976, а на 100 гПа зональный ветер этой зимы был наиболее сильным среди всех данных MERRA2.

Сильный полярный вихрь, образовавшийся в январе и наблюдавшийся до марта, был вертикально связанным по всей высоте стратосферы. Положительные аномалии зонального ветра в тропосфере в течение этого времени показывали, что зональный характер стратосферной циркуляции также распространяется в тропосферу. Связанная эволюция аномалий циркуляции стратосферы и тропосферы проиллюстрирована величиной индексов Northern Hemisphere Annular Mode (NAM) в стратосфере и Арктической Осцилляции (АО) в тропосфере. Положительное положение NAM и АО на высотах от 1000 до 1 гПа наблюдалось на протяжении почти всего зимнего периода.

Положительная фаза АО в свою очередь повлияла на региональное распределение аномалий приповерхностных температур и осадков в течение поздней зимы и ранней весны.

1.1. Вертикальная структура атмосферы. Взаимодействие между слоями. Исследования и их важность

Атмосфера – это газовая оболочка Земли. Она защищает Землю от перегрева и охлаждения, снижает перепад в дневных и ночных температурах и задерживает избыточную УФ радиацию, способствуя развитию жизни на Земле. Более 99,9% массы атмосферы сосредоточено на высотах до 50 км, где находятся наиболее значимые слои атмосферы для погоды и климата Земли: тропосфера и стратосфера. Они имеют разный характер распределения температуры с высотой из-за различия в составляющих их газах, и, как следствие, разную динамику.

Тропосфера – ближайший к поверхности Земли слой атмосферы. Ее толщина составляет 18 км у экватора и 8 км у полюсов. В основном все погодные явления происходят в тропосфере. Убывание температуры с высотой, неравномерность нагрева Земли, различия в рельефе и типах подстилающей поверхности, а также вращение земного шара создают движения в тропосфере: как крупномасштабные, так и мезомасштабные. Важной составляющей тропосферы является водяной пар. Он поглощает солнечную энергию и излучение с поверхности земли и регулирует температуру воздуха.

Вторым слоем атмосферы Земли является стратосфера. Ее газовый состав отличается от газового состава тропосферы большим содержанием озона и меньшим содержанием водяного пара. Нагрев атмосферы благодаря поглощения солнечной радиации озоном в стратосфере способствует увеличению температуры воздуха с высотой. Вследствие этого в стратосфере отсутствуют вертикальные движения и погодные явления, за некоторыми исключениями.

1.2. События в этих слоях:

1.2.1 Эль Ниньо/Южное Колебание

Осцилляции или колебания – это явления, оказывающие влияние на климат и погодные условия не только близлежащей территории, но весьма отдаленных регионов. К примеру, Южное Колебание, которое определяется по аномалии температуры вод в Тихом Океане у берегов Перу. Эль Ниньо характеризуется положительной аномалией температуры, Ла Нинья – напротив, отрицательной. Изменение температуры океанских вод приводит к изменениям в характере циркуляции и, как следствие, в погоде. В периоды Эль Ниньо тихоокеанские пассаты ослабевают, уменьшается подъем глубинных вод, появляются западные ветра. Эффект Эль-Ниньо наиболее выражен в Южной Америке. Но также влияние Южного Колебания на погоду прослеживается в Африке, Антарктике, Северной Америке, Канаде.

В северном полушарии в годы Эль Ниньо отмечаются более теплые зимы в Северной Америке, на Аляске и в западной Канаде и более холодные зимы на Дальнем Востоке России. Кроме того, изменения в циркуляции атмосферы, вызванные Эль Ниньо или Ла Нинья могут влиять на фазы других колебаний, например, на Северо-Атлантическое Колебание.

В данной работе при исследовании связи процессов в полярном регионе с явлением Эль-Ниньо/Южное колебание (ЭНЮК) использовался индекс MEI.v2 (Multivariate ENSO Index Version 2) (Рис. 1.1). Он учитывает состояние океана и атмосферы в области Тихого океана (30° ю.ш.- 30° с.ш. и 100° в.д.- 70° з.д.), учитывая изменения в температуре вод океана, давлении и компонентах ветра, а также уходящую длинноволновую радиацию. Индекс рассчитывается с использованием разложения на естественные ортогональные функции (ЕОФ), чтобы отфильтровать менее значимые изменения в данных параметрах.

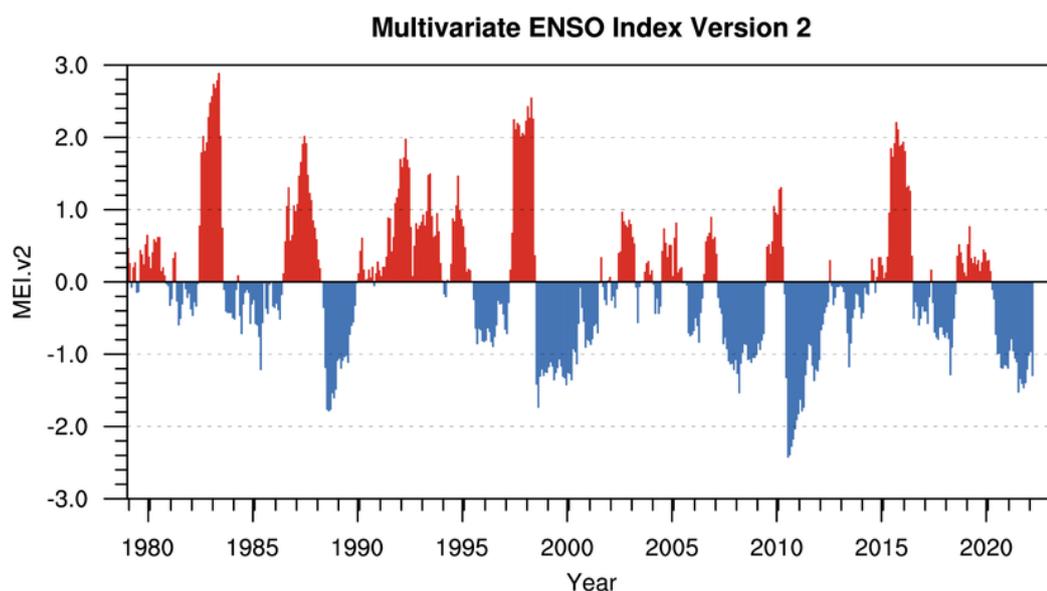


Рис. 1.1 – Индекс Эль-Ниньо Южного Колебания MEI.v2 (Multivariate ENSO Index Version 2) [2]

1.2.2 Северо-Атлантическое Колебание

Северо-Атлантическое Колебание (САК) представляет собой квазисинхронное увеличение атмосферного давления в Азорском антициклоне или уменьшение в Исландском циклоне. Разность в давлении приводит к усилению западной циркуляции в тропосфере северного полушария и, как следствие, к переносу теплых и влажных атлантических воздушных масс, что вызывает изменения в погоде северного полушария, особенно на территории Европы, более всего зависящей от Атлантики. Положительная фаза САК приводит к теплым зимам в Европе, отрицательная – к снежным и холодным зимам в Европе и Северной Америке.

В работе использовался индекс САК, рассчитанный для высоты 500 гПа в регионе 20° – 90° с. ш. (Рис. 1.2)

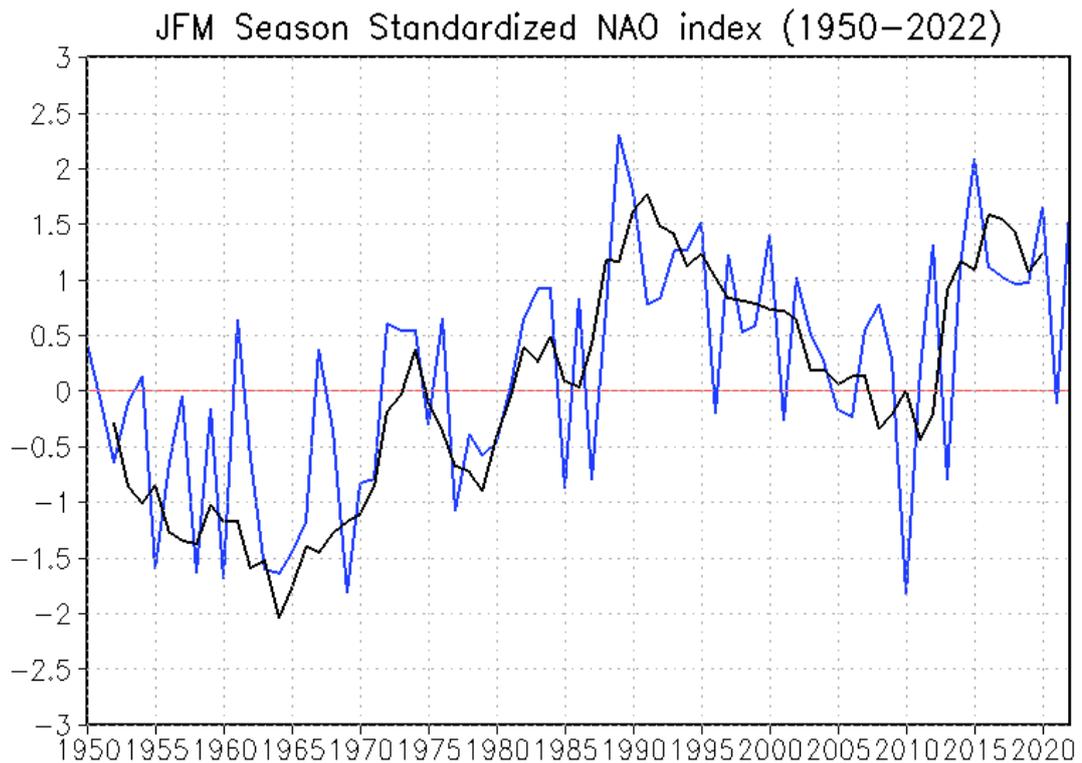


Рис. 1.2 – Индекс Северо-Атлантического Колебания [3]

Само САК является частью Арктической Осцилляции (АО), которая является наиболее важным явлением для погоды и климата северного полушария. АО представляет собой кольцо воздуха, вращающееся против часовой стрелки вокруг полярного региона. В положительной фазе АО давление понижено над полярным регионом и повышено над областью 45° с. ш. Такие условия вызывают изменение траекторий циклонов и более влажную погоду на Аляске, в Шотландии и Скандинавии.

1.2.3 Колебания с выраженным периодом: КДК, Маддена — Джулиана

Кроме осцилляций и колебаний, не имеющих чётко выраженного цикла, и даже с трудом поддающихся прогнозированию, в атмосфере присутствуют также колебания с определенными временными периодами. К примеру, Квазидвухлетнее Колебание (КДК), которое представляет собой смену

направления зональной составляющей ветров с восточной и на западную фазу, опускающихся из стратосферы до поверхности земли. КДК наблюдается в области до 10-15° от экватора в обоих полушариях, но имеет влияние на погоду в субтропиках и даже на широтах 60°.

Также примером колебаний с определенным временным масштабом можно считать осцилляцию Маддена — Джулиана (МДЖ), которая представляет собой колебания в циркуляции тропической атмосферы с периодом 30—60 дней. Эти колебания имеют вид волны, движущейся на восток со скоростью 4-8 м/с над тёплыми районами Индийского и Тихого океанов. Чаще всего фазу осцилляции определяют по изменениям в количестве осадков.

1.2.4 Полярный вихрь и события, связанные с ним: ВСП, блокирующие

Наиболее важным явлением в стратосфере северного полушария в зимний период является наличие и изменение стратосферного полярного вихря. Он представляет собой сильные западные ветры на высотах нижней и средней стратосферы, появляющиеся из-за сильного охлаждения стратосферы в зимний период. Интенсивность и расположение полярного вихря влияют на взаимодействие стратосферы и тропосферы, которое становится невозможным при сильном вихре, играющем роль щита между двумя слоями, а также на распределение озона, который разрушается ввиду отсутствия солнечного света и не может поступать с более южных широт, так как полярный вихрь ограничивает поступление воздушных масс.

В северном полушарии состояние полярного вихря зависит от Внезапных Стратосферных Потеплений (ВСП). Из-за особенностей топографии и температурных контрастов северного полушария, происходят возмущения циркуляции и планетарные волны усиливаются. Скорость зональных западных ветров резко падает, а температура стратосферы увеличивается более чем на 50°С всего за несколько дней.

ВСП приводит к разрушению полярного вихря, изменению циркуляции стратосферы, тропосферы и погоды у земной поверхности. Эти экстремальные явления могут иметь существенные последствия для зимнего приземного климата, включая увеличение частоты волн холода над Северной Америкой и Евразией и аномальное потепление над Гренландией и восточной Канадой.

2. Данные и методы

В данной работе объектом исследования является динамика средней атмосферы высоких широт северного полушария. Характер распределения геопотенциальной высоты и температуры рассматривается с помощью аппарата естественных ортогональных функций (ЕОФ) на основе данных о геопотенциальной высоте и температуре воздуха трех реанализов.

2.1. Реанализ

2.1.1. Что такое, какие бывают

Наиболее достоверными данными для исследования погоды и климата являются данные наблюдений. Однако в анализе, особенно при математическом моделировании, важна равномерность распределения данных по земному шару, высоте и времени и их однородность, в связи с чем данные наблюдений все реже используются в исследованиях. Для того, чтобы метеорологические данные были наиболее систематизированы и удобны для расчетов, создаются реанализы.

Реанализ – это данные наблюдений погоды, собранные за определенный промежуток времени и согласованные по пространству и времени при помощи гидродинамической модели. Данные о метеорологических величинах, полученные с метеорологических станций, судов, при зондировании атмосферы и из других источников, восстанавливаются в точки регулярной сетки с использованием гидродинамической модели атмосферы, после чего более подходят для гидродинамического моделирования и других исследований.

Существуют различные реанализы, каждый из которых имеет свои особенности – величину шага сетки, количество уровней по высоте, доступный

период времени, ассимилированные данные наблюдений. Наиболее известные сегодня реанализы: JRA (Япония), ERA (ECMWF), NCEP (США), UKMO (Великобритания).

2.1.2. Реанализы, рассматриваемые в работе

В данном исследовании были использованы реанализы Метеорологической службы Великобритании UKMO (U.K. Met. Office), Европейского Центра прогнозов (ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ERA5, NASA MERRA2.

Реанализ UKMO2 содержит данные о температуре, геопотенциальной высоте и компонентах ветра, полученные системой усвоения данных U.K. Met. Office. Система усвоения данных является системой, используемой в UKMO для оперативного прогнозирования погоды, расширенная для стратосферы. Основным продуктом является ежедневные поля метеорологических величин (в 12:00 ВСВ), которые производятся с использованием оперативных наблюдений. Также в течение некоторого периода времени в дополнение к оперативным метеорологическим наблюдениям проводились эксперименты по ассимиляции с использованием данных UARS (спутник для исследования верхних слоев атмосферы).

Данные реанализа UKMO состоят из трехмерных сеточных полей температуры, геопотенциальной высоты и компонент скорости ветра с разрешением 2,5 x 3,75 градуса на 27 изобарических уровнях от земной поверхности до 0,3 гПа и доступны за период с 1991 года по настоящее время.

Реанализ MERRA2 предоставляет собой данные о метеопараметрах с 1980 года по настоящее время. Разрешение составляет приблизительно 50 км. При получении реанализа использованы данные о профиле озона, космических наблюдений за аэрозолями, а также данные микроволновых измерений.

Реанализ Европейского Центра среднесрочных прогнозов ERA5 доступен за временной период с 1979 года по настоящее время. ERA5 включает в расчет большое количество данных, измеренных у поверхности земли, а также данные об океане. Горизонтальное разрешение сетки составляет 30 км, доступны данные на 137 уровнях по вертикали до высоты 80 км.

2.2. ЕОФ

2.2.1. Что такое

Для интерпретации больших наборов пространственно-временных данных требуются методы, снижающие их размерность таким образом, чтобы большая часть информации в данных сохранялась.

Для этого в метеорологии используются индексы, характеризующие пространственные поля, или производится аппроксимация полей метеорологических величин с использованием в качестве базисных тригонометрических или сферических функций.

Чтобы уменьшить искусственность, возникающую при использовании заранее определенных функций, Багров Н.А. разработал метод, в котором в качестве базисных используются естественные ортогональные составляющие (ЕОС) [4].

В этом методе последовательность пространственных полей представляется в виде матрицы, где каждая строка описывает состояние поля в некоторый момент времени в n заданных точках. Задача состоит в том, чтобы найти разложение поля для некоторых функций $F(t, x)$ по базисным функциям $X_h(x)$ (заранее неизвестным) с коэффициентами $T_h(t)$, изменяющимися во времени

$$F(t, x) = \sum_h T_h(t) X_h(x)$$

Для этого рассчитывается корреляционная матрица для последовательности полей, находятся ее собственные векторы $X_h(x)$, и соответствующие коэффициенты $T_h(t)$. Полученные n решений исходной задачи дают в сумме разложение функции $F(t, x)$.

2.2.2. Какие могут быть проблемы и как решаются

При расчетах ЕОФ для ограниченной территории может появляться ошибка, связанная с неоднородностью расположения точек, используемых при расчете ковариационной матрицы. Так, при расчете ЕОФ для территории на основе данных метеорологических станций, эту проблему можно решить, сначала рассчитывая коэффициенты разложения полей метеорологических величин по сферическим функциям в каждый момент времени, и после восстанавливая данные в точки регулярной сетки, после чего уже используя для расчета ЕОФ [5]. Однако также эта проблема возникает при расчете ЕОФ на основе данных, находящихся в узлах широтно-долготной сетки, так как с возрастанием широты шаг по долготе уменьшается и значения коэффициентов корреляции в ковариационной матрице увеличиваются, что приводит к некорректно построенным ЕОФ. Данная проблема решается путем разложения функции поля по сферическим функциям и после восстановлением данных на сетку с однородным распределением точек.

2.2.3. Как мы делали

При расчете ЕОФ использовались ежедневные данные реанализа геопотенциальной высоты и температуры за зимние периоды 20 лет (2000 - 2021 гг.) на территории северного полушария (севернее 60° с. ш.). Для анализа состояния атмосферы были выбраны 3 изобарических уровня, соответствующих тропосфере (850, 500 гПа) и стратосфере (10 гПа).

3. Результаты

3.1. Общее состояние H и T за 20 лет и их дисперсия

На рисунках 3.1, 3.2 приведены средние распределения и среднее квадратическое отклонение (СКО) температуры воздуха и геопотенциальной высоты на изобарических поверхностях 850, 500 и 10 гПа. Осреднение на 22 рассматриваемых в данной работе года.

На картах геопотенциальной высоты, осредненной за 20 лет (Рис. 3.1), можно видеть характерное пространственное распределение для зимнего периода, с ярко выраженными центрами действия атмосферы (ЦДА): исландским минимумом и азиатским антициклоном.

Наибольшее среднее (СКО) – наибольшая изменчивость – наблюдается в области Исландского минимума, где видны большие вариации, связанные с САК и более частым прохождением циклонов. Минимальное СКО можно видеть над территорией Канады и Дальним востоком России.

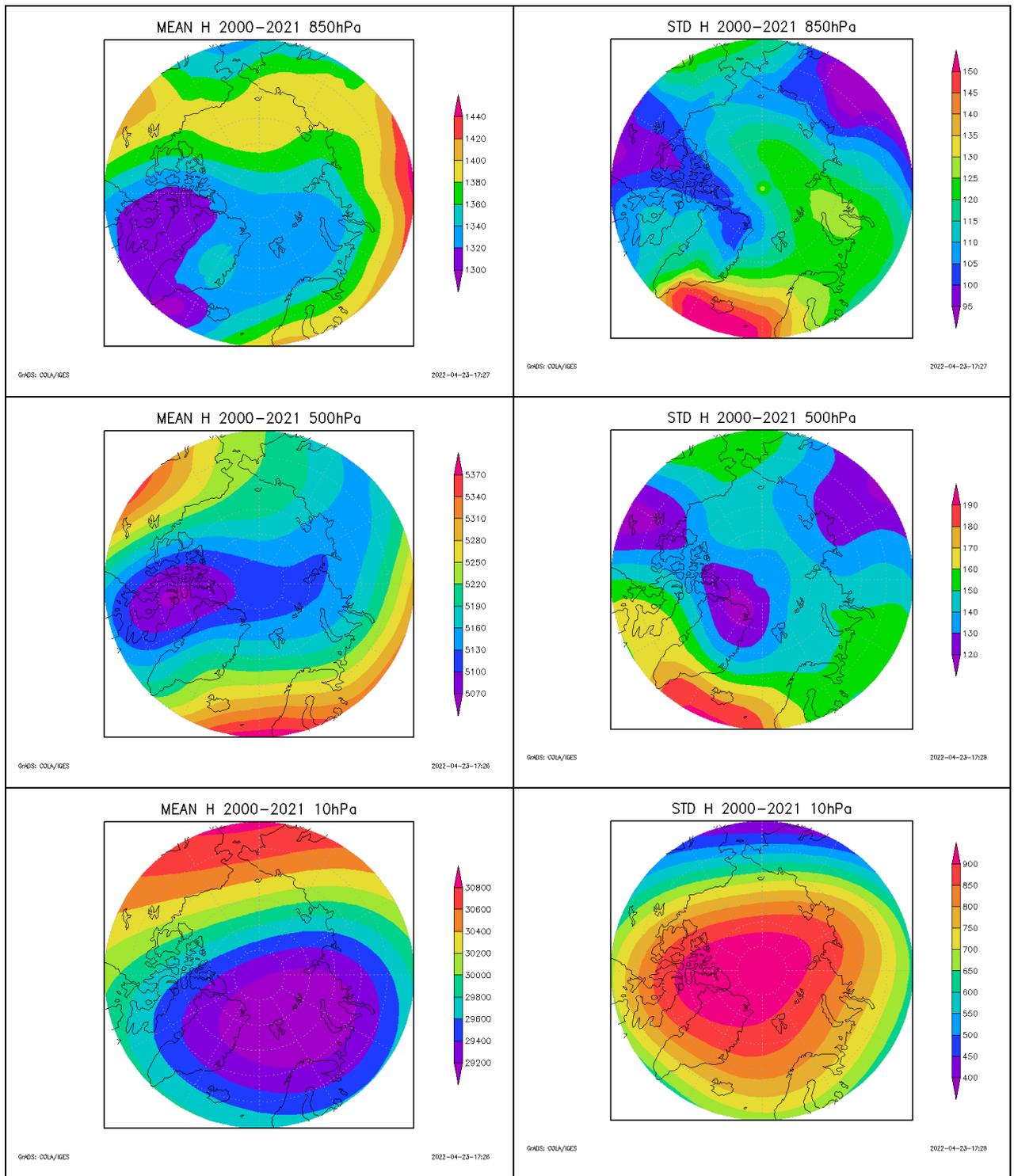


Рис. 3.1 – Карты геопотенциальной высоты, осредненной за 2000-2021 гг.

В среднем пространственном распределении температуры (Рис. 3.2) также можно видеть вышеупомянутые ЦДА, а также видно зональное распределение температуры.

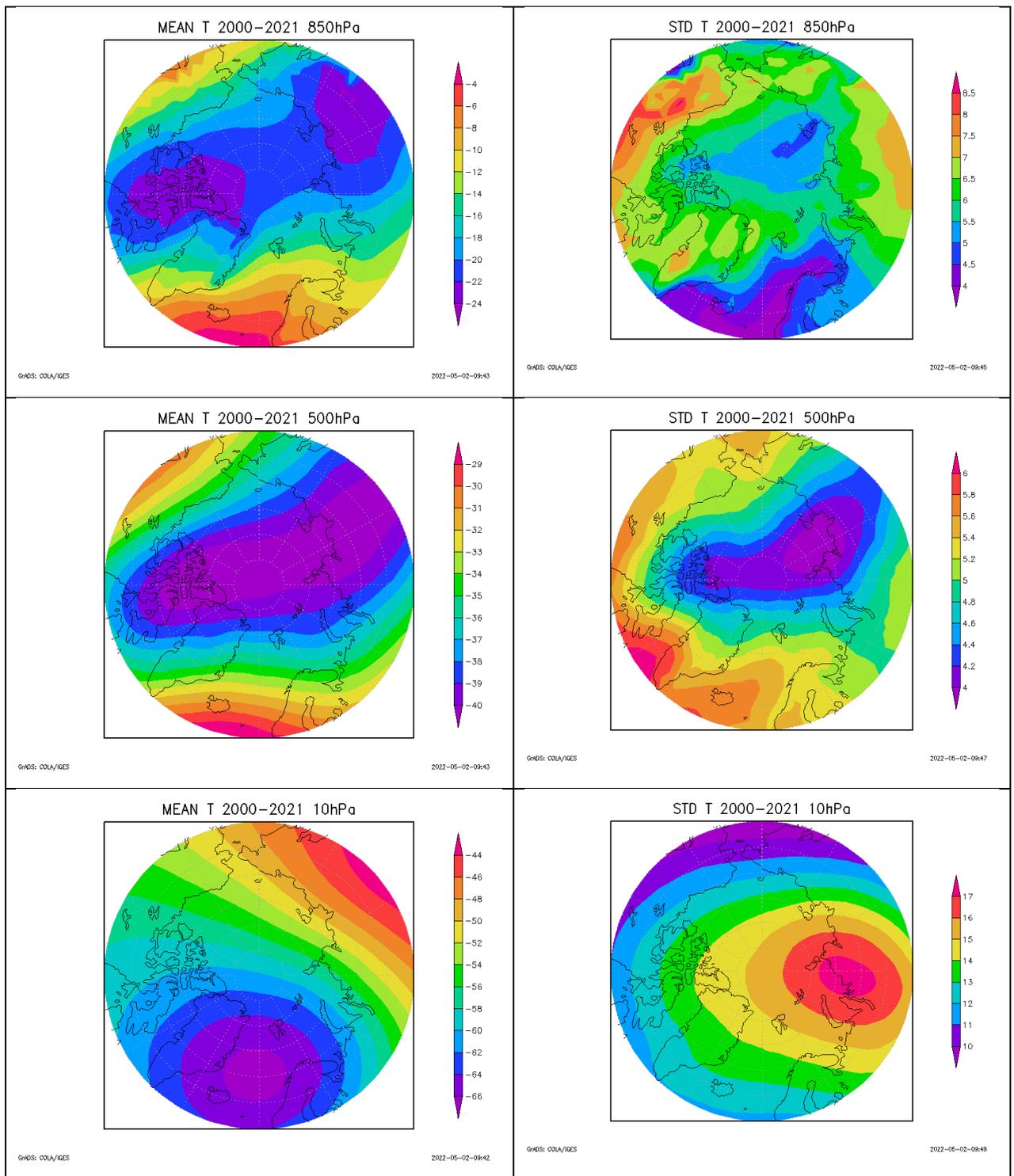


Рис. 3.2 – Карты температуры, осредненной за 2000-2021 гг.

На картах среднего геопотенциальной высоты и температуры для высоты 10 гПа можно видеть распределения, характерные для полярного стратосферно вихря – пониженное давление, вызывающее движение воздуха по типу циклона, и пониженная температура. Очаги пониженных значений температуры и геопотенциальной высоты совпадают. А вот СКО распределено по-разному –

изменчивость температуры меньше и сконцентрирована над севером европейской территории России, в то время как область максимальной изменчивости геопотенциальной высоте располагается в районе северного полюса.

3.2. Проблемы с реанализами

В данных реанализов могут встречаться ошибки, как незначительные, связанные с проблемами вычисления, так и грубые. При визуальной оценке карт метеорологических величин сложно увидеть такие ошибки, однако их можно ясно видеть на графиках временных коэффициентов ЕОФ (Рис. 3.3).

На графиках, приведённых на рисунке 3.3, представлен временной ход первого коэффициента разложения по ЕОФ поля геопотенциальной высоты уровня 850 гПа за зимний период 2000-2001 гг. по трём используемым в работе реанализам. Хорошо видно, что графики сильно отличаются друг от друга.

Нормальный ход временных коэффициентов можно видеть на Рис. 3.3 (верхний график)

В каждый отдельный день поле геопотенциальной высоты меняется и соответственно изменяются значение его ЕОФ1. Однако на графиках ниже можно видеть грубые ошибки в данных реанализов – резкие скачки в ходе временных коэффициентов или полное отсутствие изменения во времени. В связи с этим актуальным является вопрос о сравнении данных, полученных по различным реанализам.

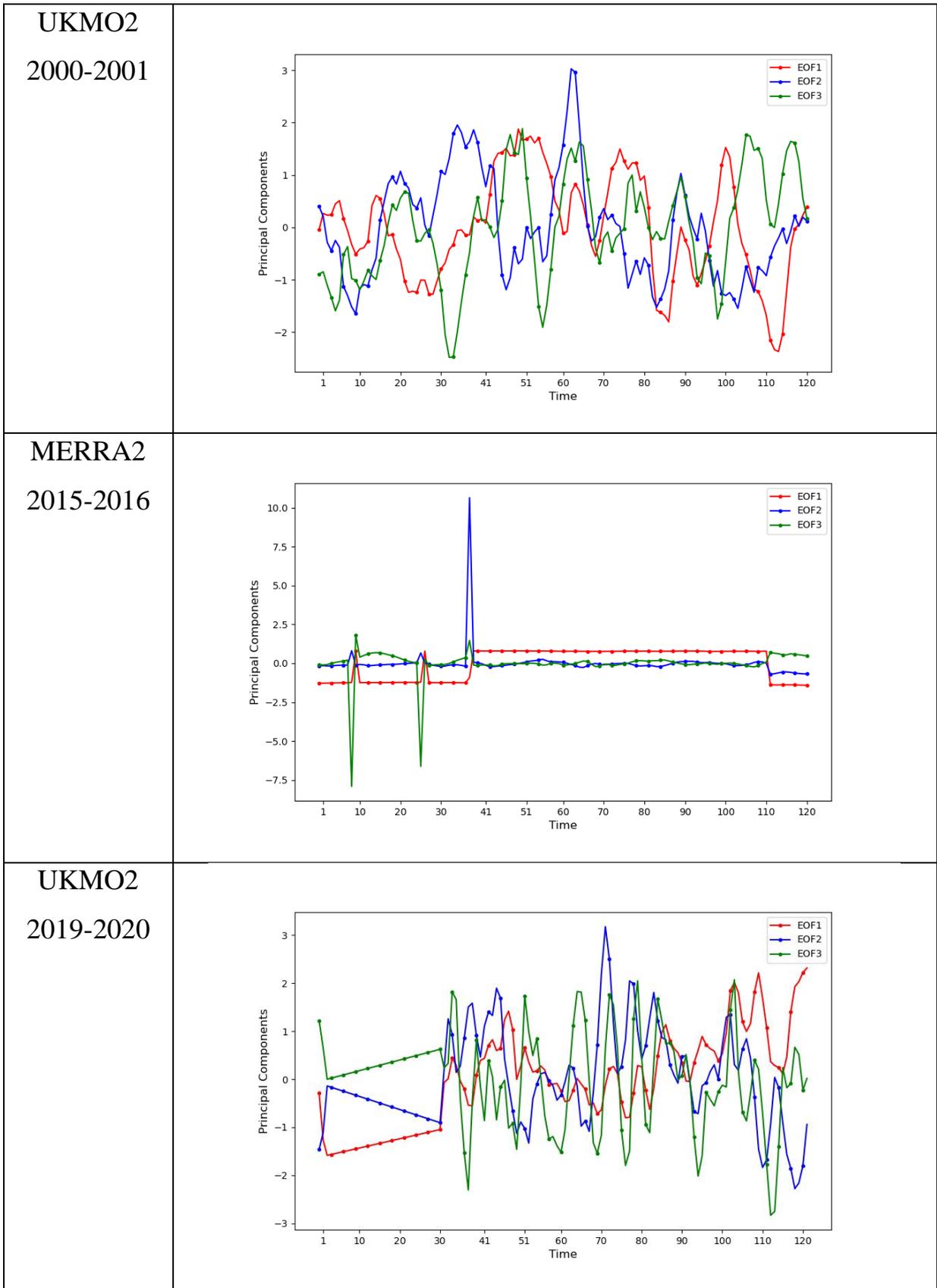


Рис. 3.3 – Временной ход коэффициентов EOF геопотенциальной высоты 850гПа

3.3. Сравнение реанализов

Был проведен сравнительный анализ средних значений метеорологических величин разных реанализов, сравнение рассчитанных EOF и визуальная оценка временного хода коэффициентов, описанная выше.

Сравнивая средние значения геопотенциальной высоты в зимний период (Рис. 3.4) можно отметить, что в целом значения и пространственное распределение схожи и имеют лишь незначительные различия.

На рисунке 3.5 приведены соответствующие поля первой компоненты разложения по EOF (EOF1). И в этих пространственных распределениях различия заметны.

В полях EOF1 на изобарической поверхности 850 гПа во всех реанализах наблюдается значительный очаг положительных аномалий около Гренландии и два очага отрицательных аномалий над Россией (более выраженный) и над Аляской (менее выраженный). При этом, если в реанализе UKMO2 разброс значений максимальный – от -240 до 180, то в реанализах ERA5 и MERRA2 он значительно меньший и составляет от -50 до 150 и от -5 до 17.5, соответственно.

Такие же закономерности, но более ярко выраженные, наблюдаются и в полях EOF1 на уровне 10 гПа – в реанализе ERA5 отмечаются только положительные значения (от 150 до 1200), а в реанализе MERRA2 только отрицательные (от -120 до -15). При этом пространственное расположение очагов максимума и минимума совпадают.

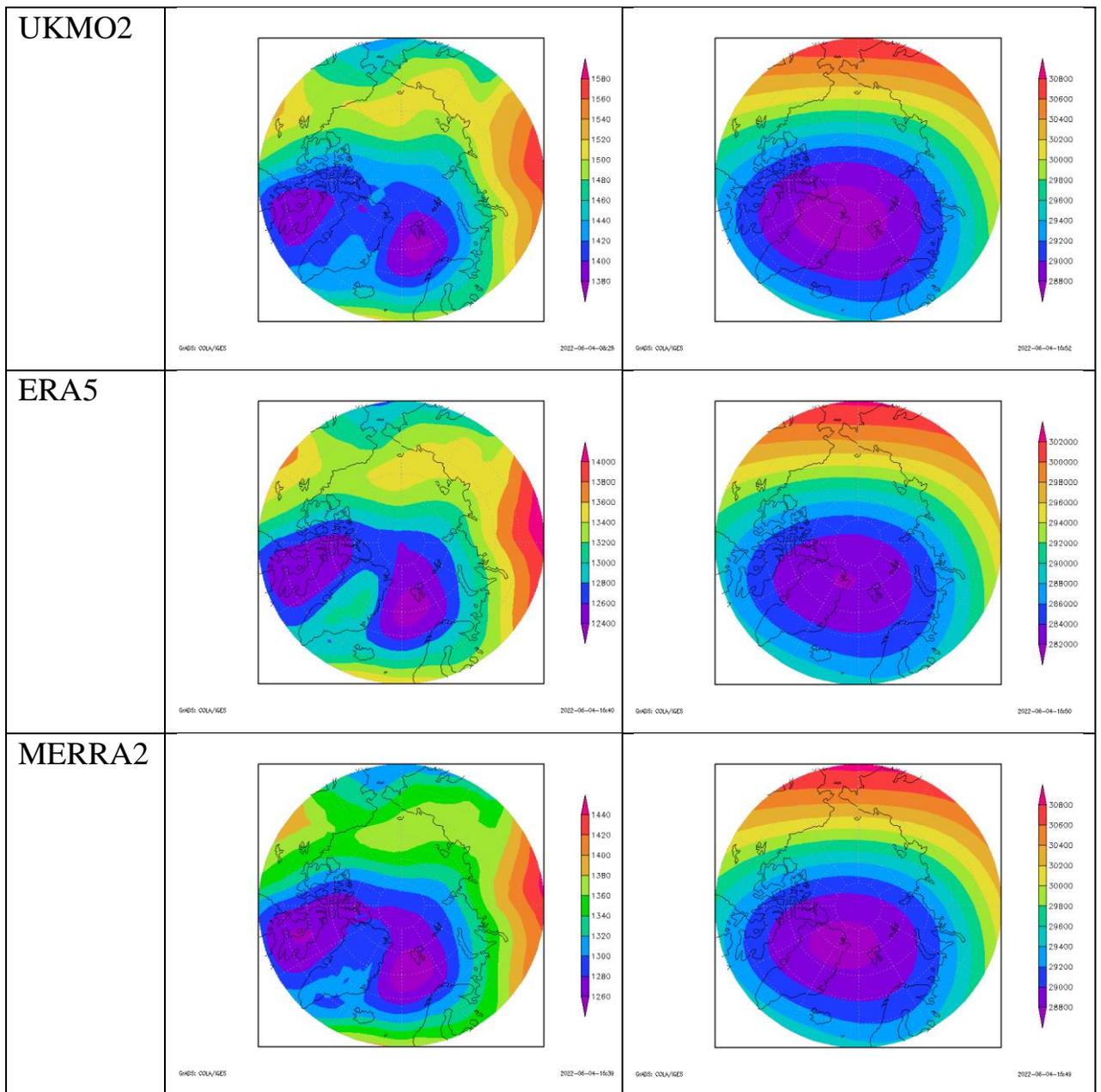


Рис. 3.4 – Карты геопотенциальной высоты, зима 2004-2005 гг.. Уровень 850 гПа (левая колонка) и 10 гПа (правая колонка)

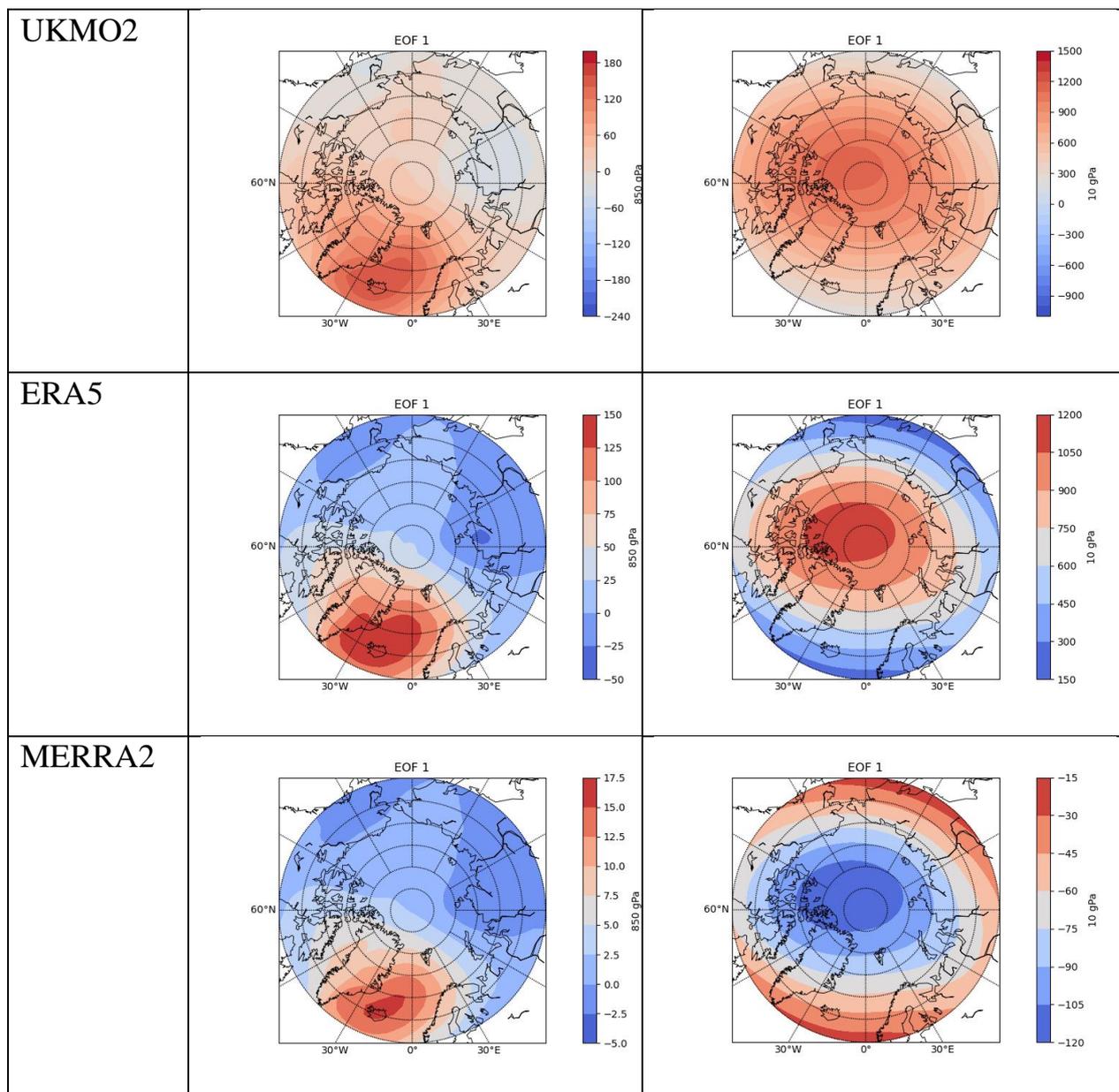


Рис. 3.5 – EOF1 геопотенциальной высоты поверхностей 850 гПа (слева) и 10 гПа (справа), зима 2004-2005 гг.

3.4. Полученные EOF и главные компоненты (PC)

Были рассмотрены горизонтальные поля (на изобарических высотах 850, 500 и 10 гПа) и высотно-долготные (вдоль широты 67,5° с. ш.) профили геопотенциальной высоты и температуры.

Для каждого реанализа для каждого зимнего периода (декабрь-март) с 2000 по 2020 год для геопотенциальной высоты и температуры для трёх

изобарических поверхностей были рассчитаны три ЕОФ (с наибольшими собственными числами), которые описывают наиболее частые закономерности поведения метеорологических величин, а также проанализирован временной ход коэффициентов разложения (главных компонент) каждой функции. В результате было получено несколько серий результатов.

ЕОФ представляют собой аномалии геопотенциала и температуры в конкретный зимний период.

3.4.1. Долготные вариации

Долготные вариации ЕОФ для геопотенциальной высоты и температуры, рассчитанные для широты $67,5^\circ$ с. ш. в основном демонстрируют положительные аномалии на высоте 1 гПа и долготе 10° в. д. (западная Европа). Для построения графиков была использована логарифмическая шкала по высоте, позволяющая более детально видеть изменения в слоях стратосферы, где давление убывает с высотой не так стремительно, как в тропосфере.

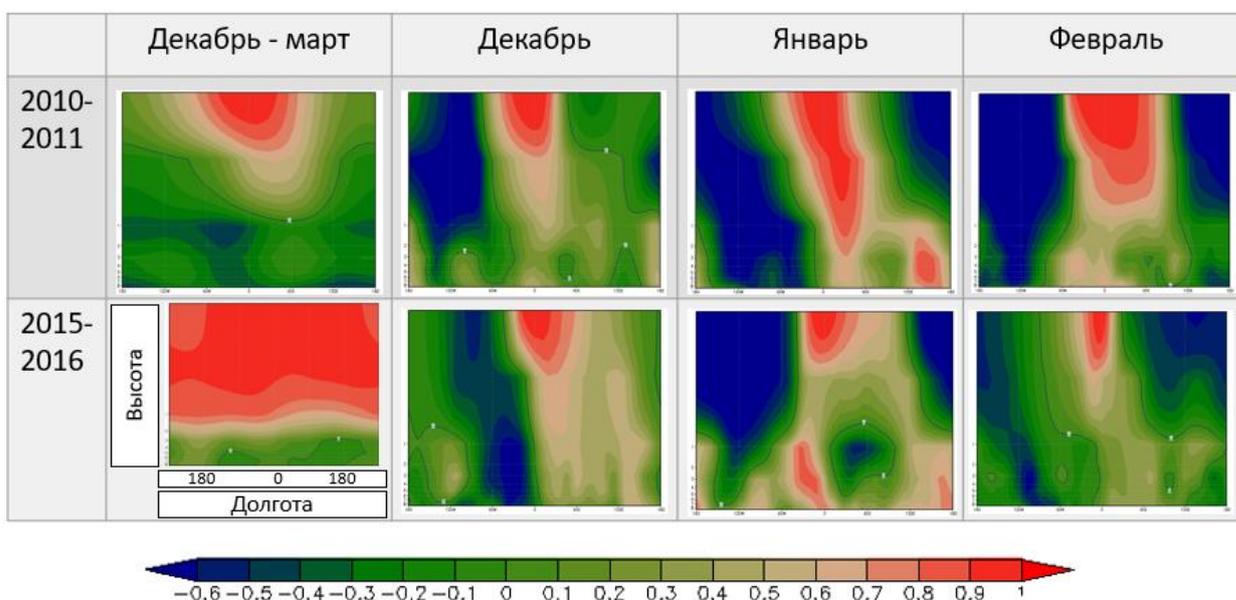


Рис. 3.6 – Долготные вариации ЕОФ аномалий геопотенциальной высоты

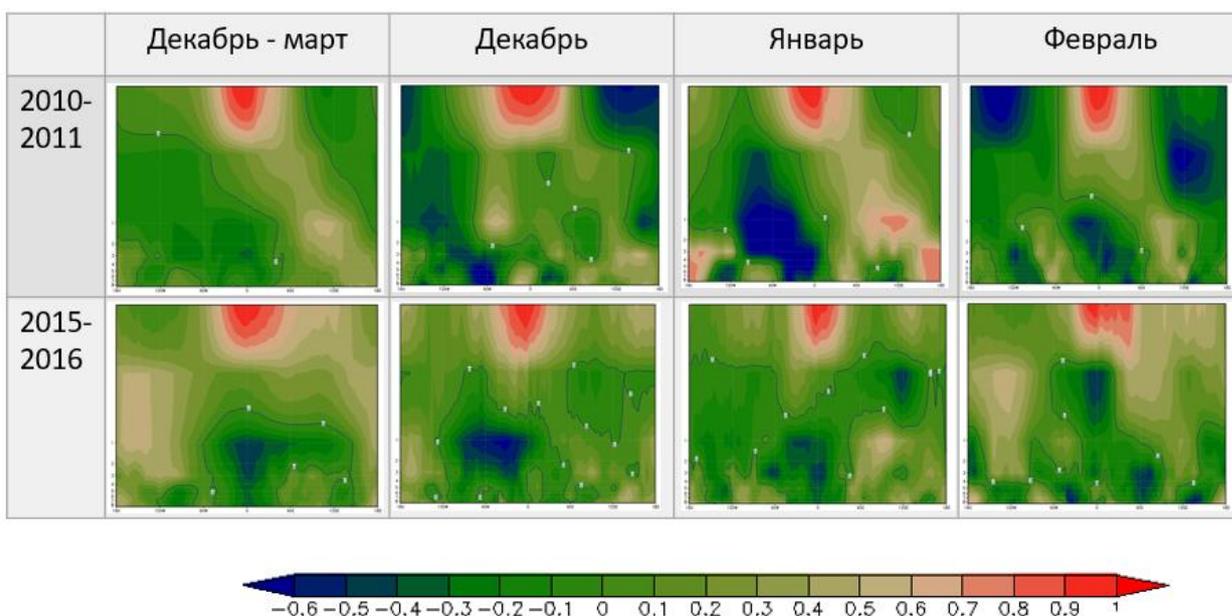


Рис. 3.7 – Долготные вариации ЕОФ аномалий температуры

Кроме положительных аномалий, наблюдающихся в большинстве случаев, можно отметить отрицательные аномалии геопотенциальной высоты, находящиеся на высотах тропосферы и стратосферы и долготе 60° з. д. и 170° в. д. В нижней тропосфере можно видеть также как положительные, так и отрицательные аномалии. Положительные аномалии геопотенциальной высоты чаще наблюдаются над территорией Атлантики. Отрицательные – на долготе 40° з. д. Долготные вариации ЕОФ аномалий температуры менее гладкие. Отмечается отрицательные аномалии температуры на высотах тропосферы на различных долготах.

3.4.2. Высотные профили

Первая ЕОФ позволяет оценить основные закономерности процессов, оказывающий самый большой вклад в общую дисперсию. Сравнивая поля ЕОФ, можем найти годы аналоги и использовать эту информацию для исследования связи между процессами различного пространственно-временного масштаба, а также для прогноза, как краткосрочного, так и долгосрочного.

Анализируя поля EOF геопотенциальной высоты, полученные по реанализу MERRA2 четкие закономерности в распределении аномалий, можно выделить только в стратосфере – уровень 10 гПа.

Стандартной ситуацией можно считать один локализованный очаг положительных аномалий. Такая ситуация наблюдается в 2000-2001, 2001-2002, 2002-2003, 2003-2004, 2005-2006, 2006-2007, 2007-2008, 2008-2009, 2009-2010, 2011-2012, 2012-2013, 2013-2014, 2015-2016, 2018-2019, 2020-2021 гг.

В два зимних периода наблюдается также один сильный очаг аномалий, но отрицательных – 2004-2005, 2016-2017.

В три зимних периода наблюдаются два одинаково сильных очага аномалий – 2010-2011, 2014-2015, 2019-2020. Отрицательные аномалии в западном полушарии, положительные над Европой. Рассмотрим более подробно именно эти аномальные зимы. Поля EOF за эти три года представлены на рисунке 3.8.

Более похожее пространственное распределение в зимы 2010-2011 и 2019-2020 гг. – очаги одинаково сильные, в то время как зимой 2014-2015 года отрицательный очаг значительно сильнее (Рис. 3.8).

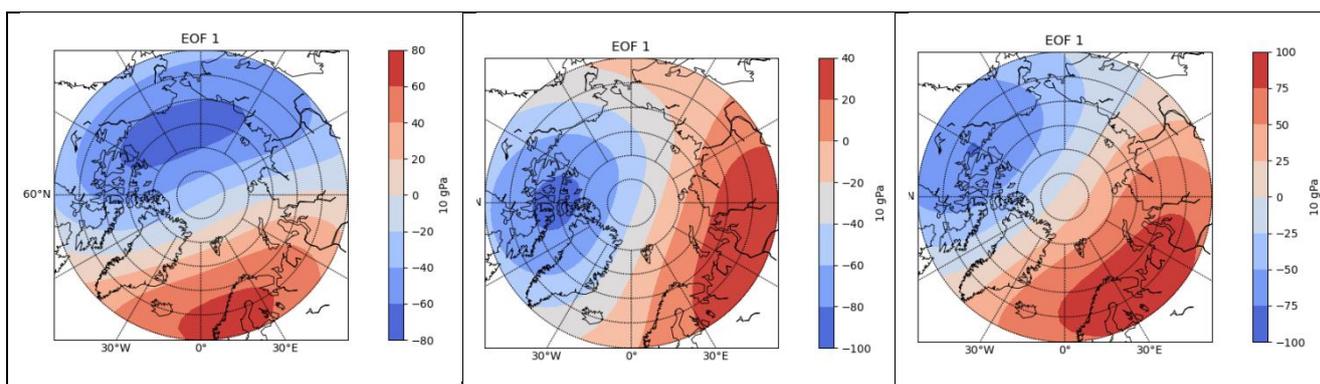


Рис. 3.8 – EOF аномалий геопотенциальной высоты на уровне 10 гПа MERRA2 в зимние периоды 2010-2011, 2014-2015, 2019-2020 (слева направо)

Рассмотрим поля EOF1 геопотенциальной высоты этих зим на других уровнях (Рис. 3.9 и 3.10).

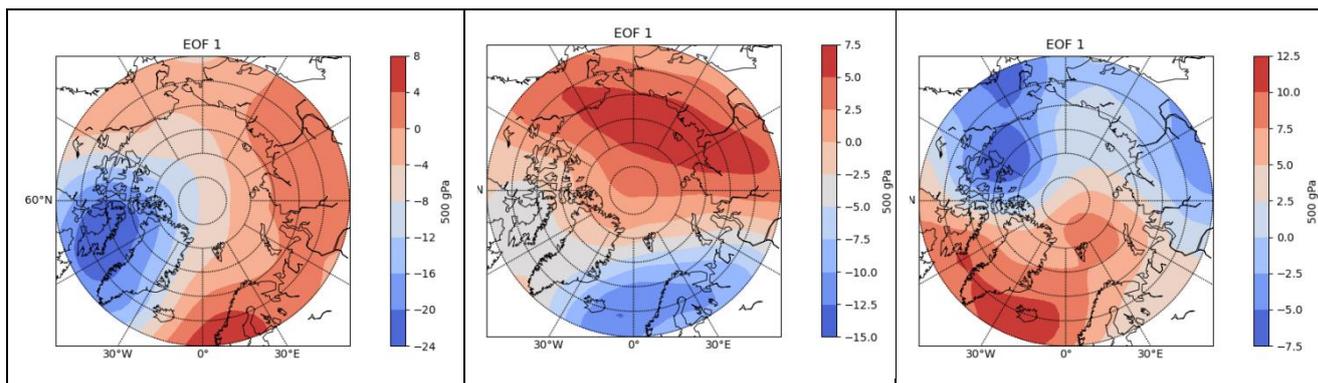


Рис. 3.9 – EOF аномалий геопотенциальной высоты на уровне 500 гПа MERRA2 в зимние периоды 2010-2011, 2014-2015, 2019-2020 (слева направо)

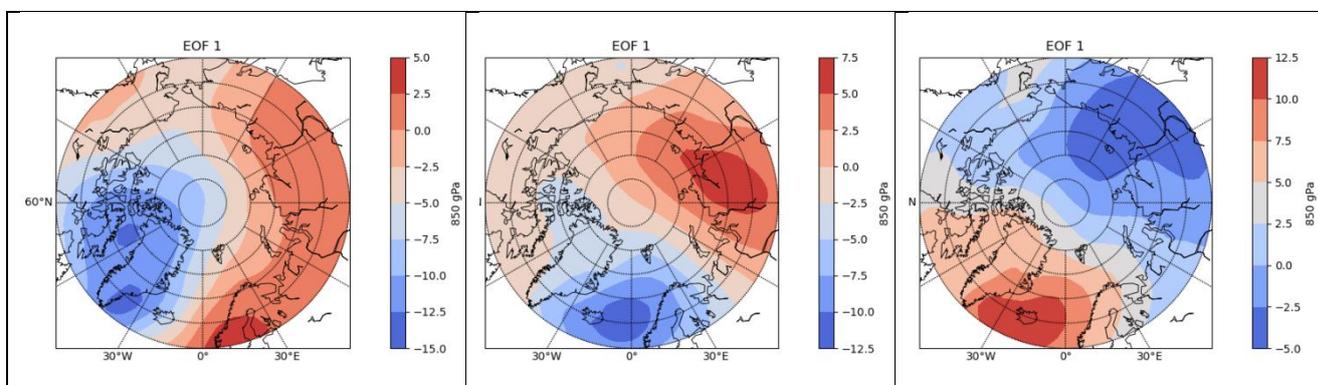


Рис. 3.10 – EOF аномалий геопотенциальной высоты на уровне 850 гПа MERRA2 в зимние периоды 2010-2011, 2014-2015, 2019-2020 (слева направо)

Можно найти похожие закономерности в полях 2010-2011 и 2014-2015 гг. – отрицательные значения или над Гренландией (2010-2011) или смещены восточнее (2014-2015). Но поле 2019-2020 г уникально – знаки аномалий поменялись местами. Ранее уже отмечалась уникальность зимы 2019-2020 гг. и проведённый анализ подтверждает этот факт.

Рассматривая EOF геопотенциальной высоты для зимних периодов 2010-2011, 2014-2015, 2019-2020, рассчитанные по данным других реанализов (Рис. 3.11-3.16), можно также отметить аномальность данных зим. Так, поля EOF1 для изобарической поверхности 10 гПа и реанализа UKMO2 представляют из себя отрицательные аномалии на большей части рассматриваемой территории, в то время как в другие годы на этом уровне

чаще наблюдаются положительные аномалии геопотенциальной высоты. В остальном ЕОФ1, рассчитанные по данным реанализа UKMO2 повторяют результаты, полученные для MERRA2.

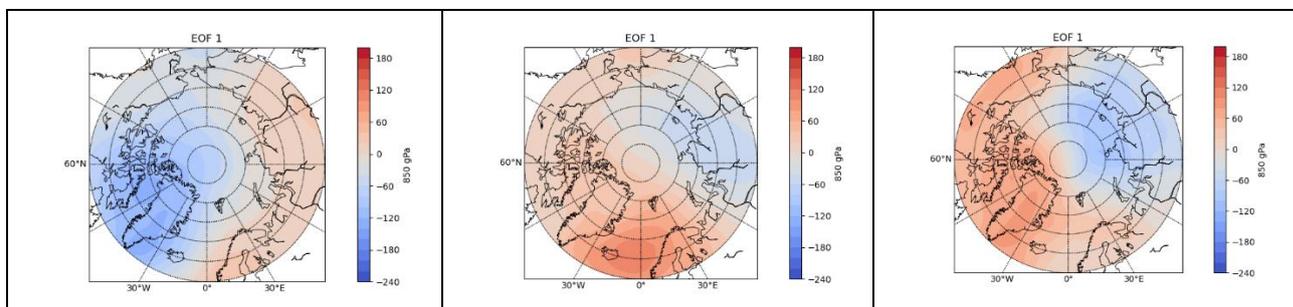


Рис. 3.11 – ЕОФ аномалий геопотенциальной высоты на уровне 850 гПа UKMO2 в зимние периоды 2010-2011, 2014-2015, 2019-2020 (слева направо)

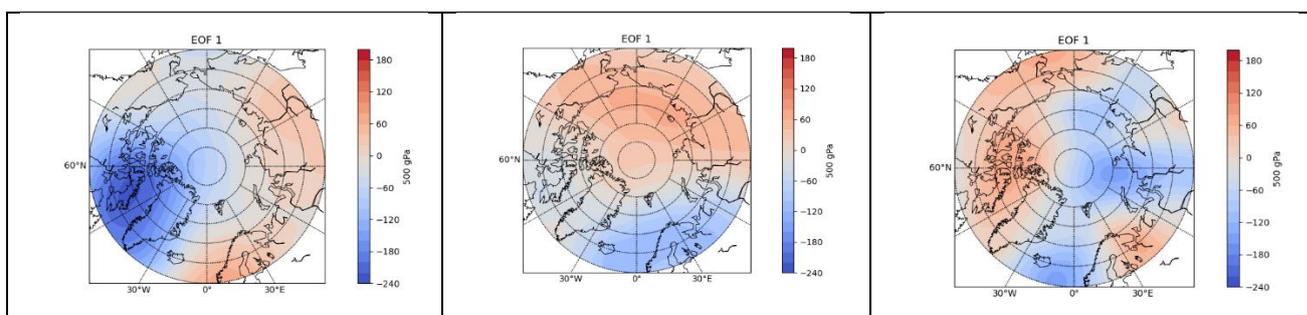


Рис. 3.12 – ЕОФ аномалий геопотенциальной высоты на уровне 500 гПа UKMO2 в зимние периоды 2010-2011, 2014-2015, 2019-2020 (слева направо)

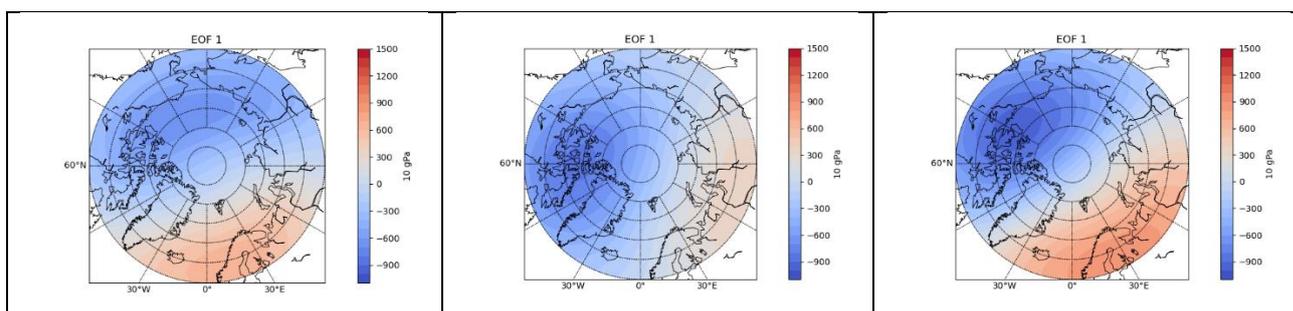


Рис. 3.13 – ЕОФ аномалий геопотенциальной высоты на уровне 10 гПа UKMO2 в зимние периоды 2010-2011, 2014-2015, 2019-2020 (слева направо)

ЕОФ, полученные по данным реанализа ERA5 (Рис. 3.14-3.16) показывают те же результаты.

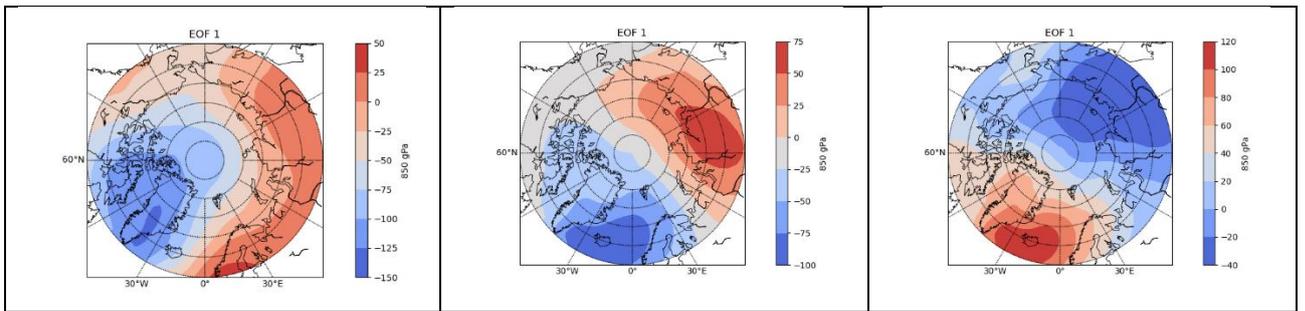


Рис. 3.14 – EOF аномалий геопотенциальной высоты на уровне 850 гПа ERA5 в зимние периоды 2010-2011, 2014-2015, 2019-2020 (слева направо)

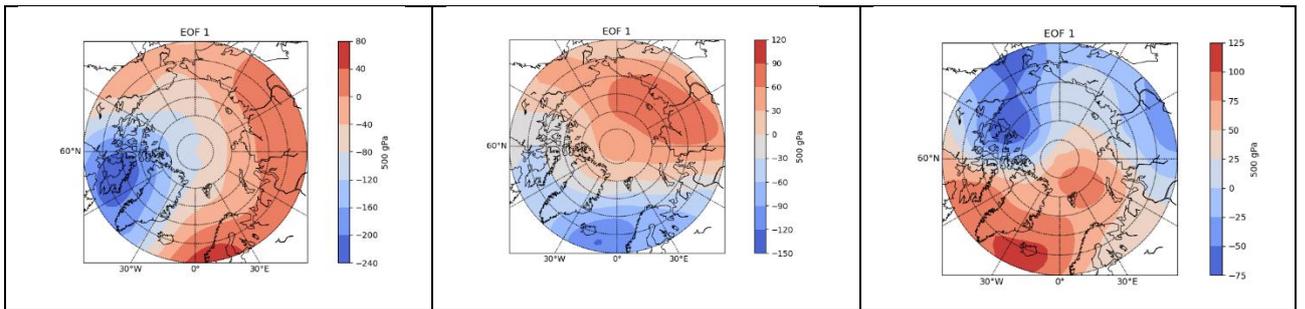


Рис. 3.15 – EOF аномалий геопотенциальной высоты на уровне 500 гПа ERA5 в зимние периоды 2010-2011, 2014-2015, 2019-2020 (слева направо)

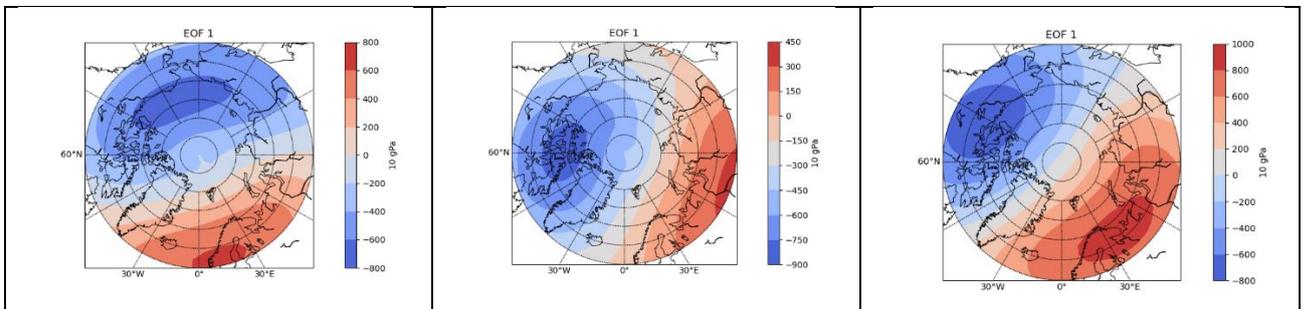
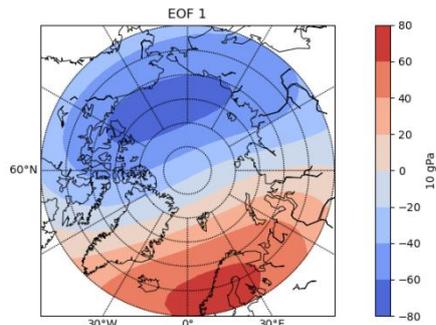
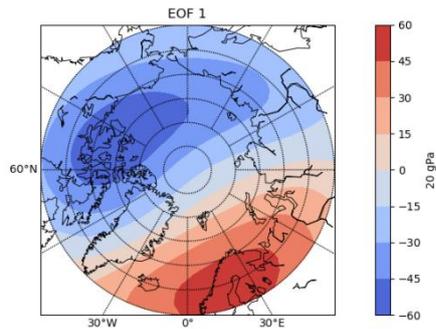


Рис. 3.16 – EOF аномалий геопотенциальной высоты на уровне 10 гПа ERA5 в зимние периоды 2010-2011, 2014-2015, 2019-2020 (слева направо)

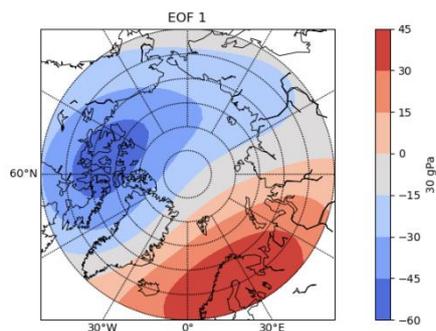
Рассмотрим поле за один год (2010-2011) на всех изобарических поверхностях по вертикали.



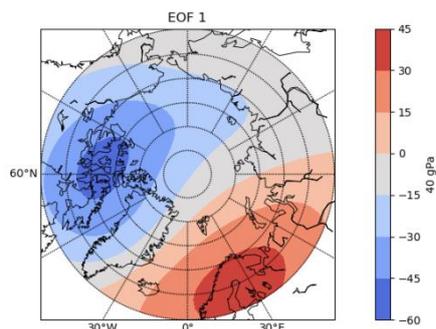
10 гПа



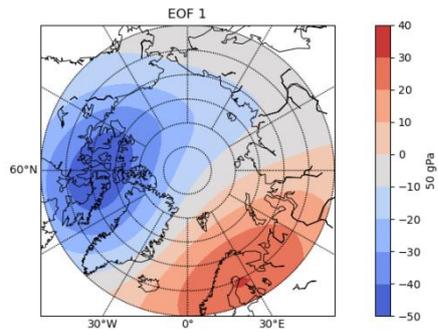
20 гПа



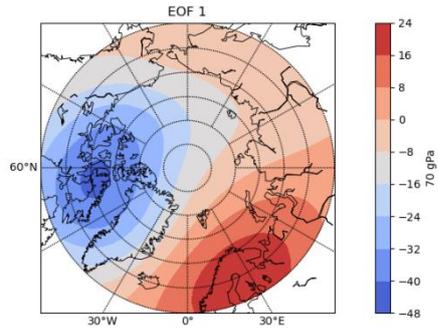
30 гПа



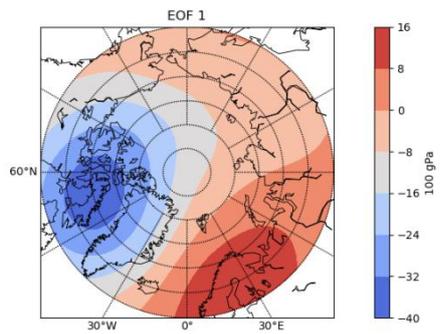
40 гПа



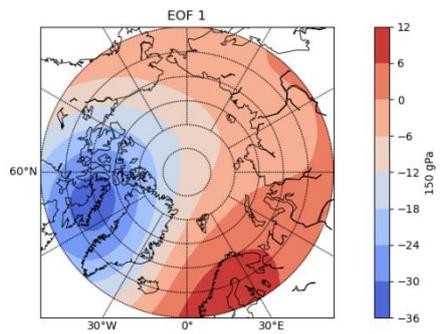
50 гПа



70 гПа



100 гПа



150 гПа

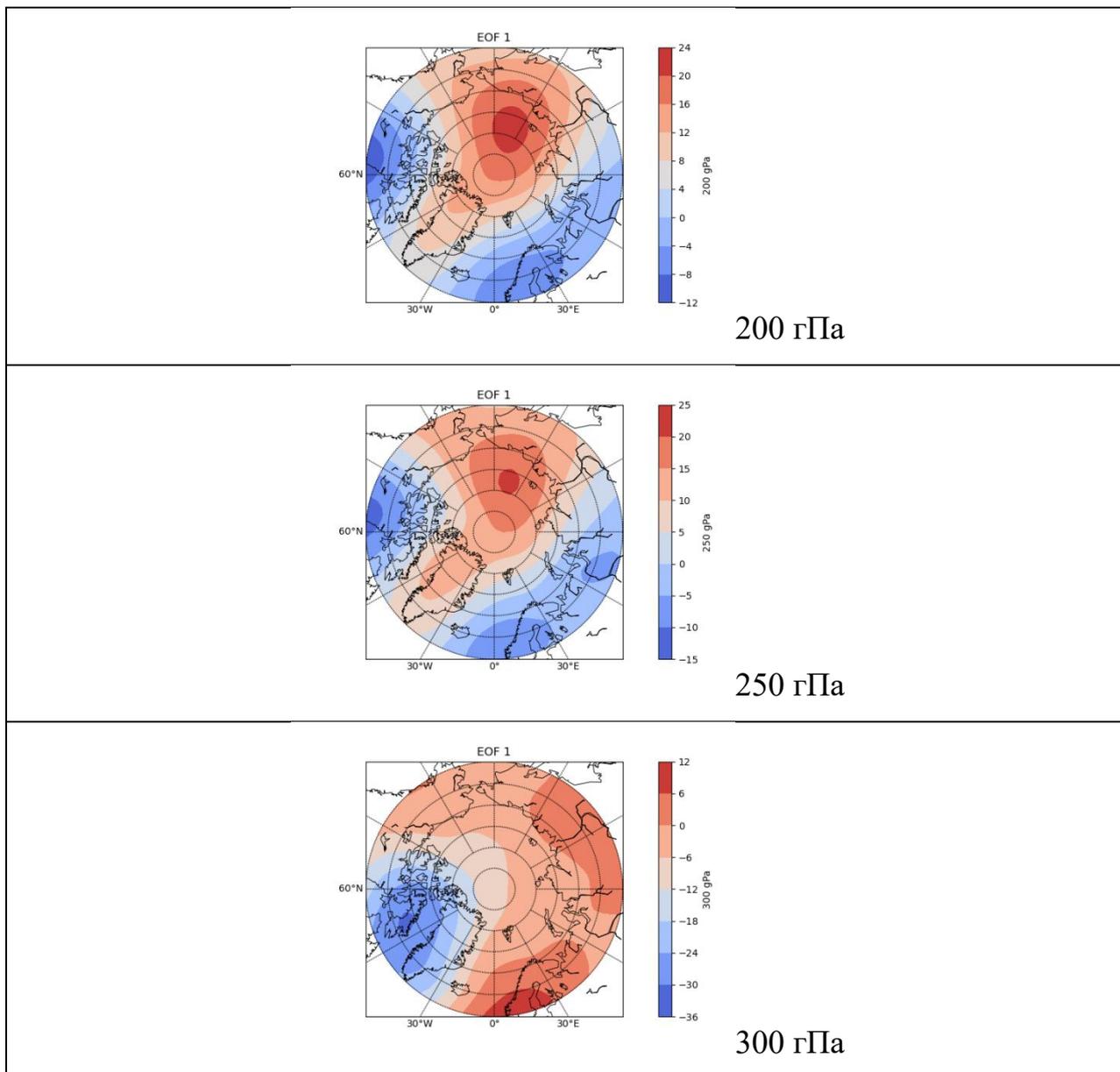
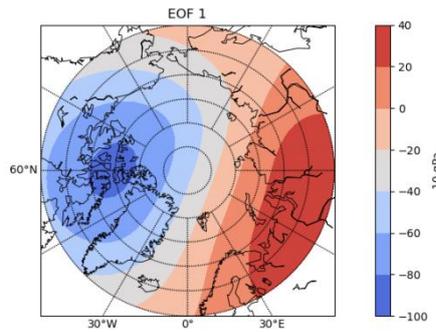


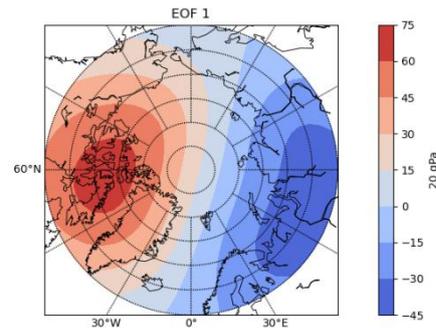
Рис. 3.17 – EOF аномалий геопотенциальной высоты MERRA2
в зимний период 2010-2011

Происходит постепенная перестройка полей с окончательным переломом на уровне 200 гПа.

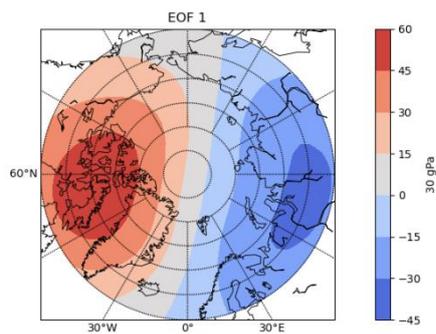
Если проанализировать таким же образом поля для зимы 2014-2015 гг., то видно, что перестройка происходит два раза и резко на уровнях 10 и 200 гПа.



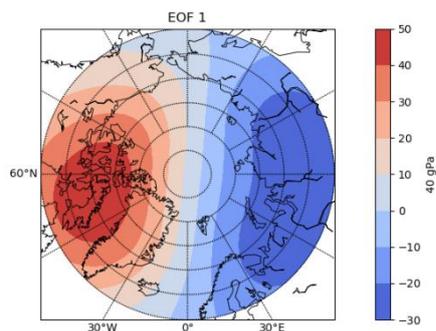
10 гПа



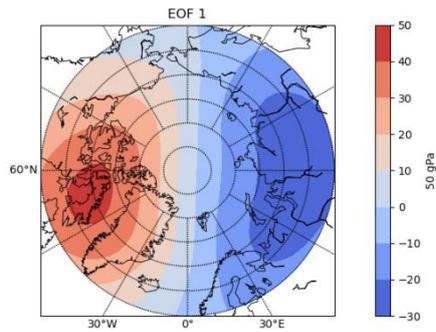
20 гПа



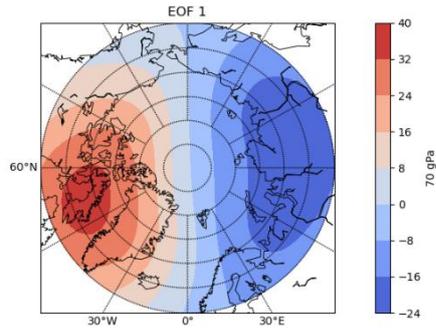
30 гПа



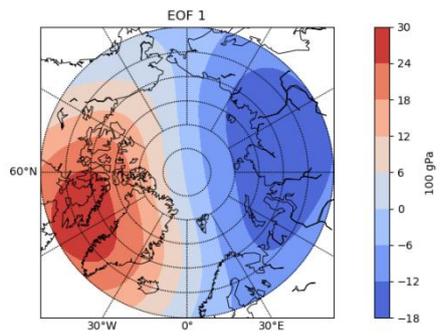
40 гПа



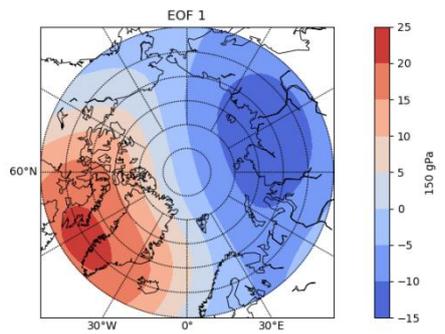
50 гПа



70 гПа



100 гПа



150 гПа

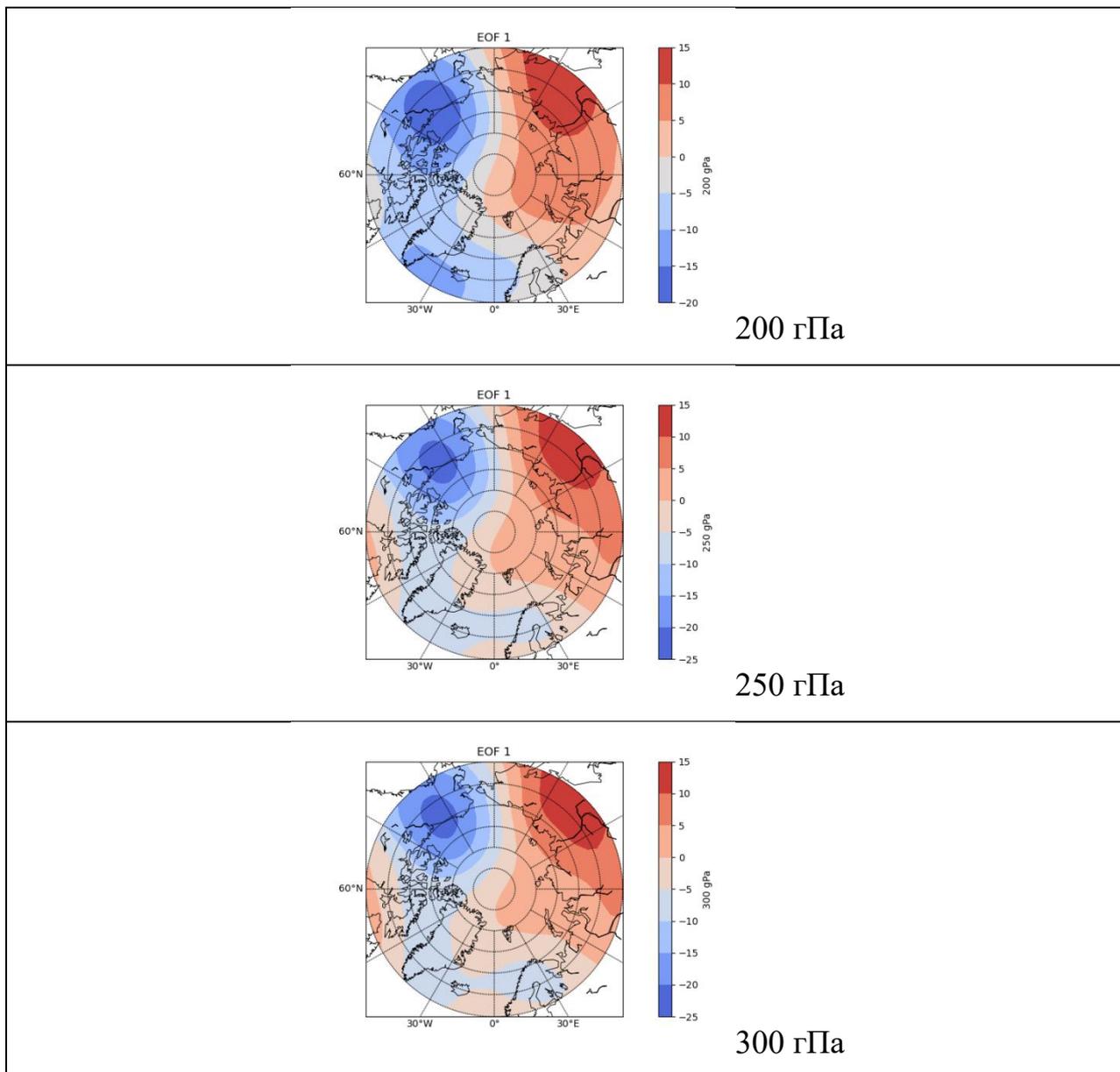
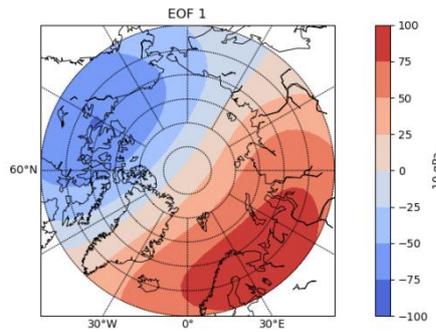
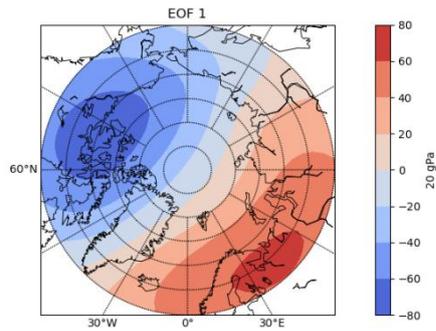


Рис. 3.18 – EOF аномалий геопотенциальной высоты MERRA2
в зимний период 2014-2015

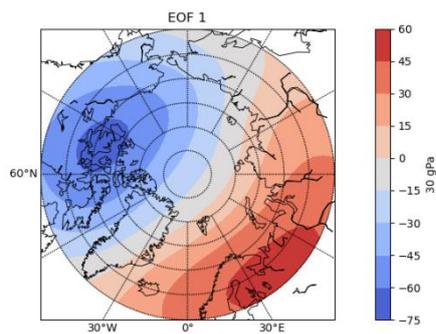
В аномалиях геопотенциальной высоты для зимы 2019-2020 гг. можно отметить два резких изменения с высотой: 40-50 гПа (уровни стратосферы) и 150-200 гПа (примерно соответствует тропопаузе).



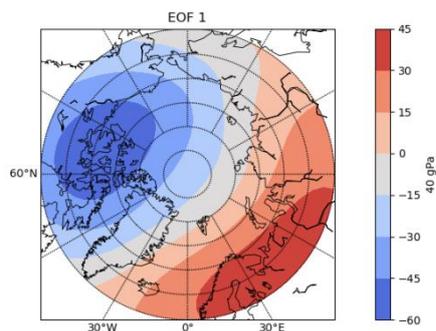
10 гПа



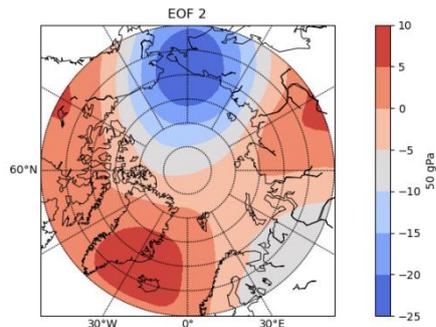
20 гПа



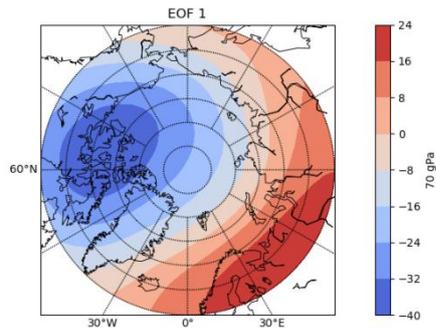
30 гПа



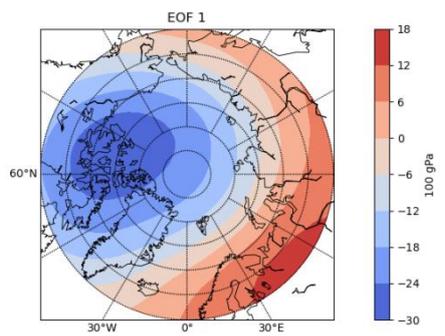
40 гПа



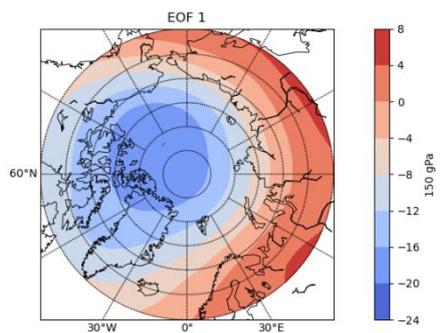
50 гПа



70 гПа



100 гПа



150 гПа

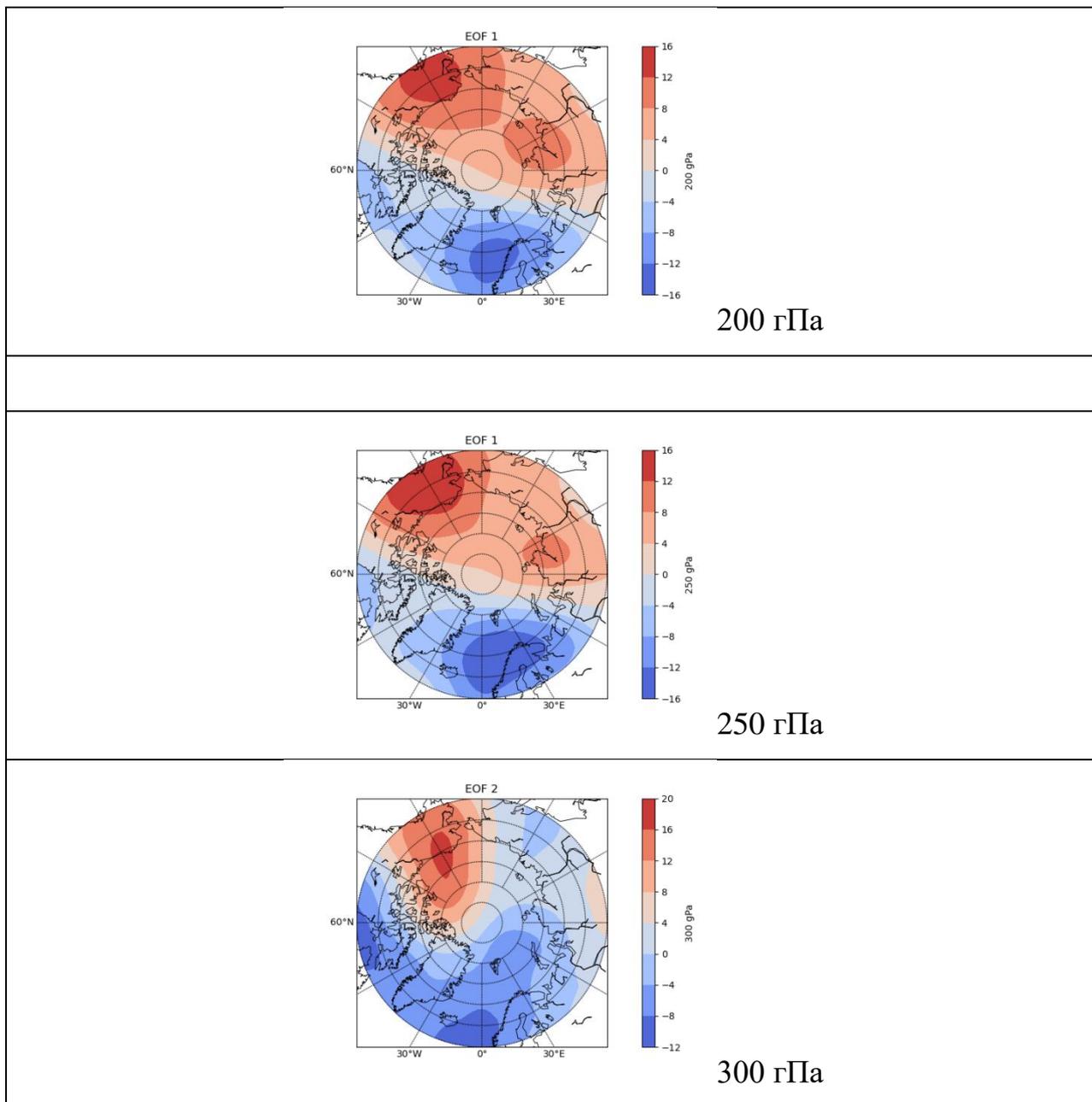
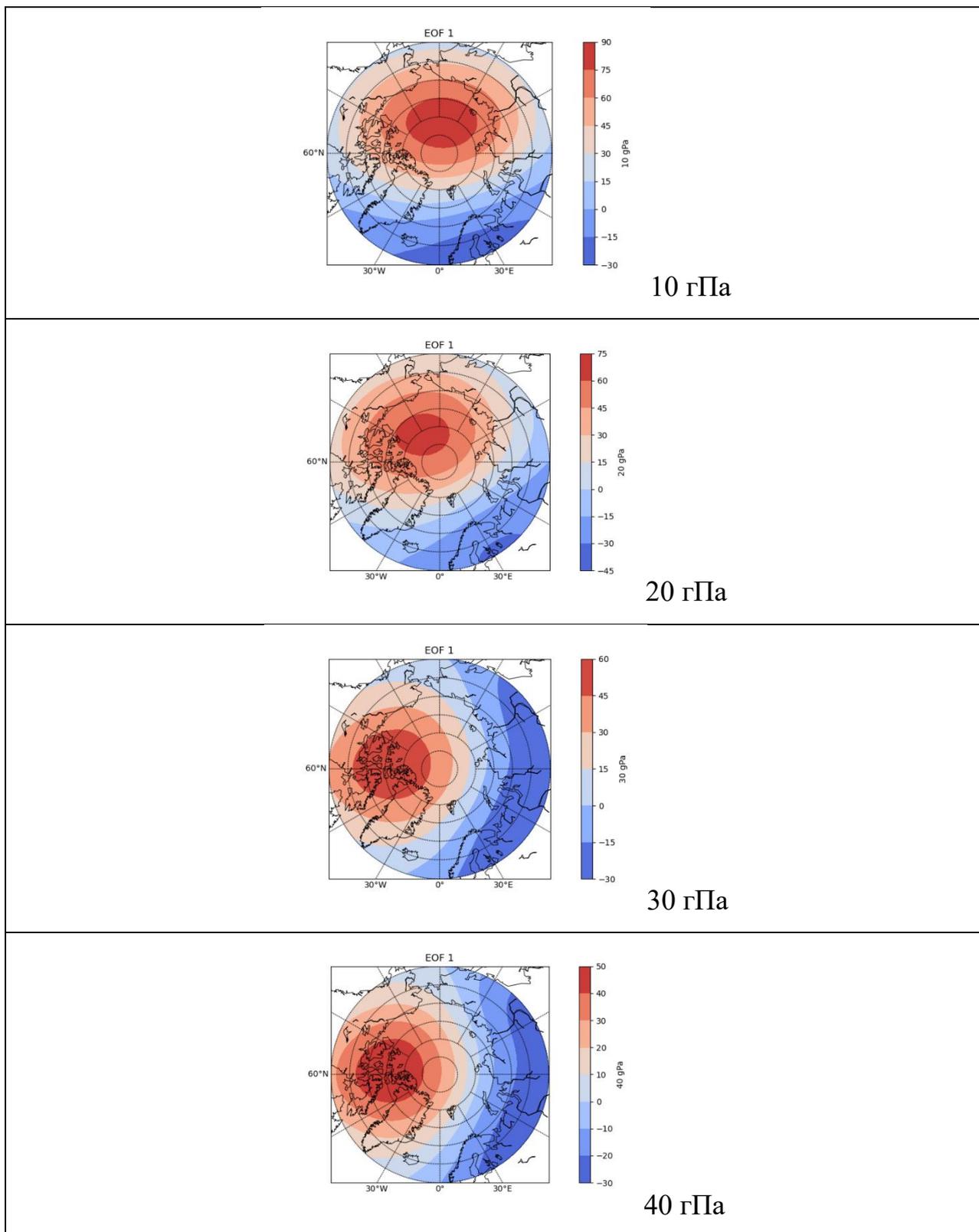
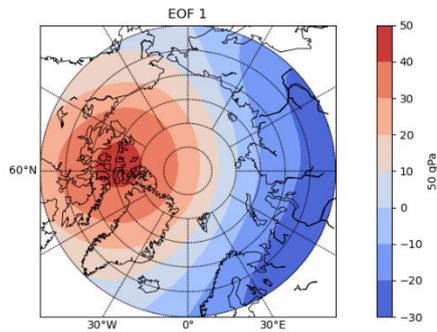


Рис. 3.19 – EOF аномалий геопотенциальной высоты MERRA2
в зимний период 2019-2020

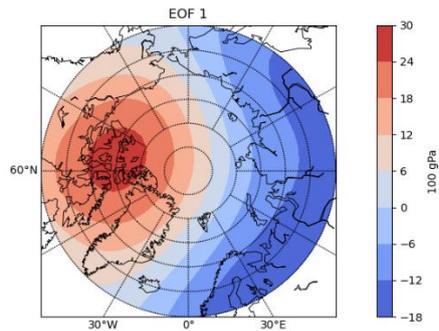
Рассматривая вертикальное строение полей аномалий геопотенциальной высоты для зимы 2020-2021 гг., можно отметить, что происходит одна резкая перестройка – между высотами 200-250 гПа, можно предположить, что это связано с переходом между слоями тропосферы и стратосферы. В области стратосферы в данный зимний период можно видеть положительные аномалии,двигающиеся с востока на запад с увеличением высоты. В области тропосферы

– отрицательные аномалии, локализирующиеся над территорией восточной Канады.

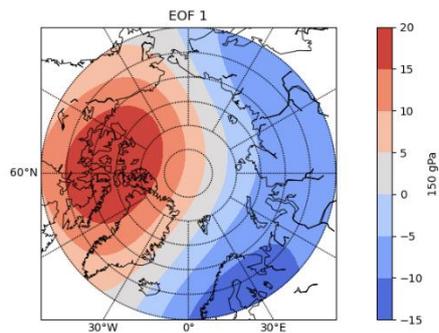




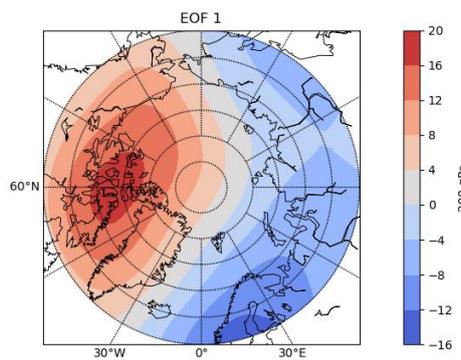
50 гПа



100 гПа



150 гПа



200 гПа

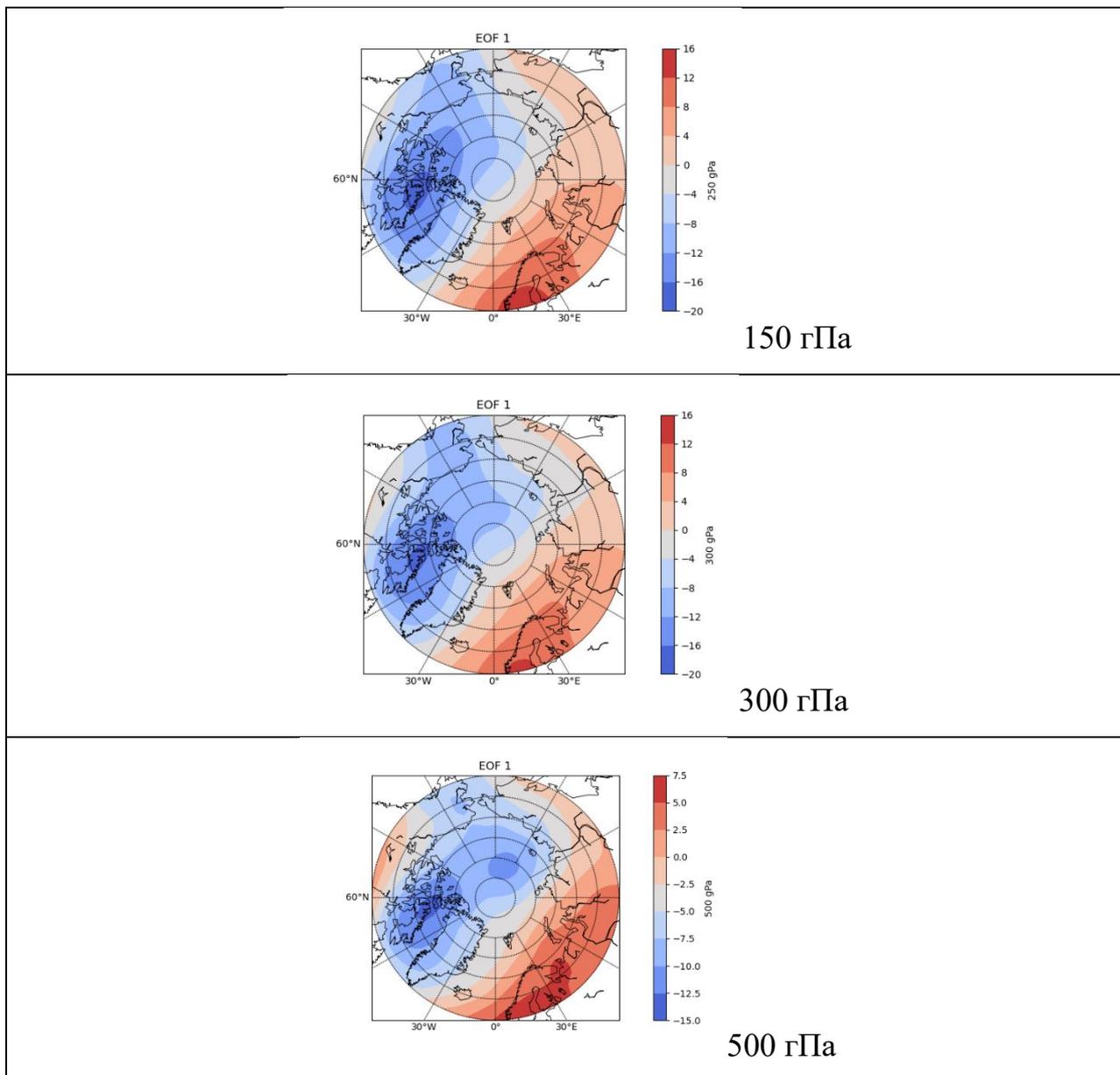


Рис. 3.20 – EOF аномалий геопотенциальной высоты MERRA2
в зимний период 2020-2021

Рассмотрим EOF1 температуры по реанализу MERRA2 на трёх высотах (Рис. 3.21-3.23). Можно отметить аномальность уже рассмотренных зим для высоты стратосферы (10 гПа). В данные годы (2010-2011, 2014-2015, 2019-2020) центр положительных аномалий температуры был смещен к югу. В 2010-2011 гг. можно видеть перестройку полей аномалий по высоте – отрицательные аномалии над восточной Канадой на высоте 850 гПа и положительные аномалии в той же области на высоте 500 гПа. Также можно видеть перестройку между этими высотами в зимний период 2014-2015 гг.

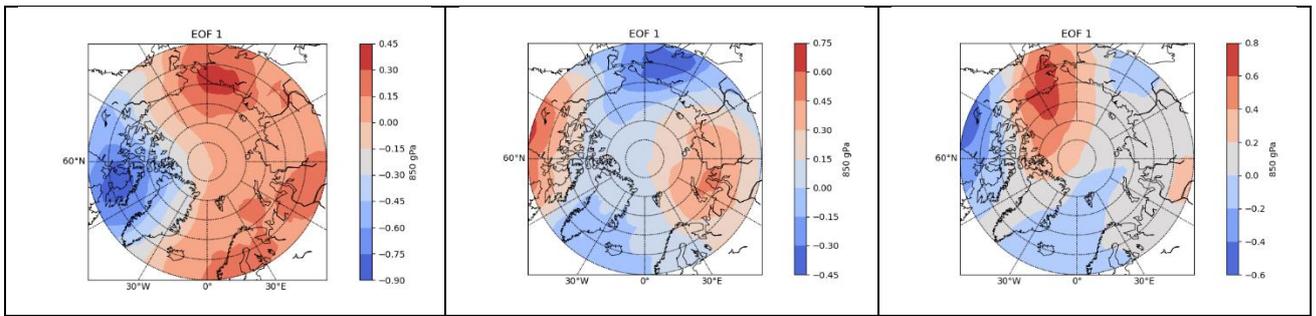


Рис. 3.21 – EOF аномалий температуры на уровне 850 гПа MERRA2 в зимние периоды 2010-2011, 2014-2015, 2019-2020 (слева направо)

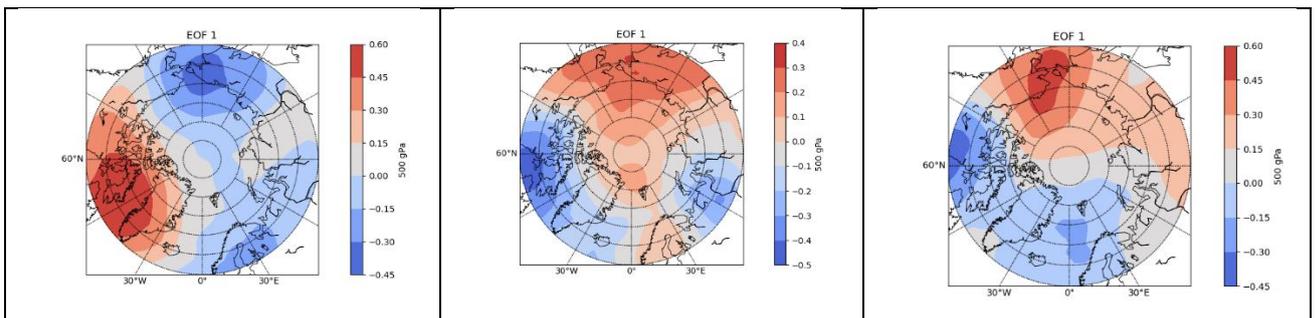


Рис. 3.22 – EOF аномалий температуры на уровне 500 гПа MERRA2 в зимние периоды 2010-2011, 2014-2015, 2019-2020 (слева направо)

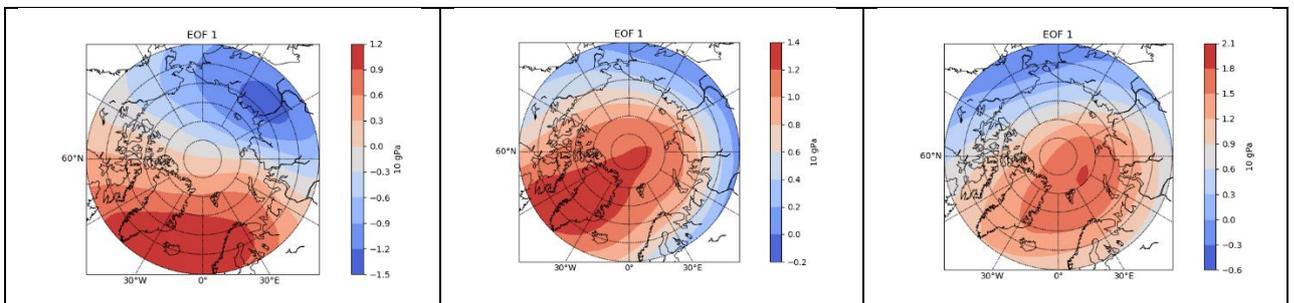
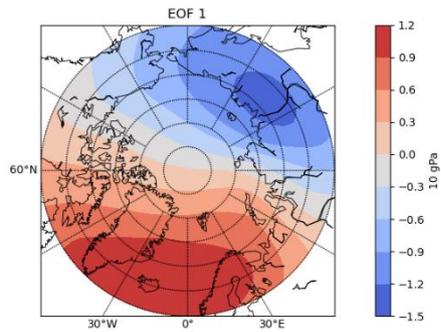
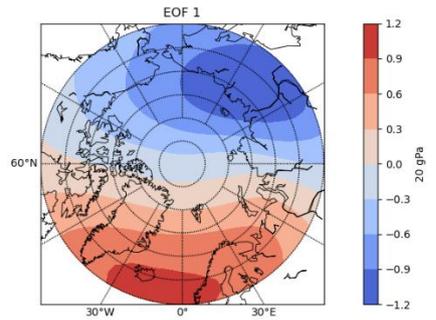


Рис. 3.23 – EOF аномалий температуры на уровне 10 гПа MERRA2 в зимние периоды 2010-2011, 2014-2015, 2019-2020 (слева направо)

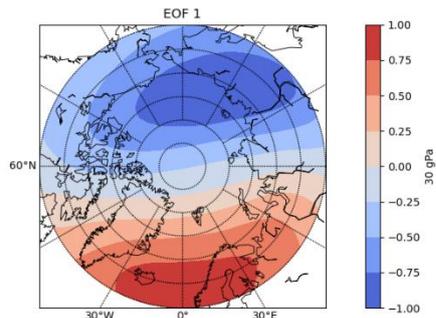
Также рассмотрим поле аномалий температуры за один год (2010-2011) на всех высотах. Можно видеть постепенную перестройку полей с изменением высоты и резкое изменение между высотами 150-200 гПа, также как на картах EOF геопотенциальной высоты. В отличие от геопотенциальной высоты на картах аномалий температуры можно отметить еще две резких перестройки полей с высотой: между высотами 200 и 250 и также между 300 и 400 гПа.



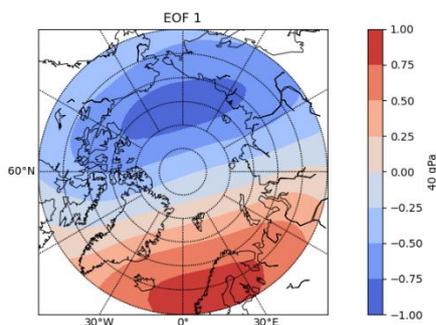
10 гПа



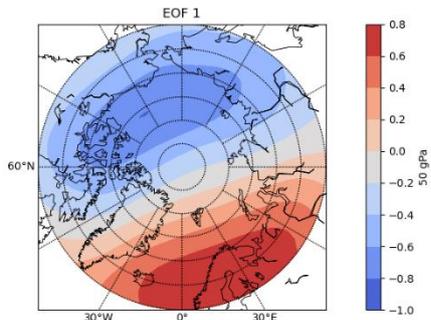
20 гПа



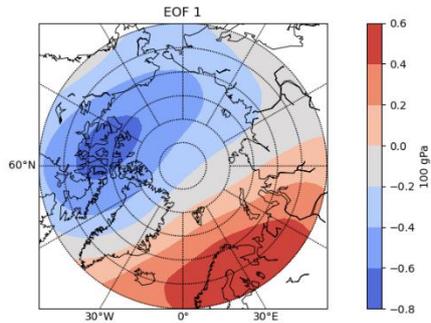
30 гПа



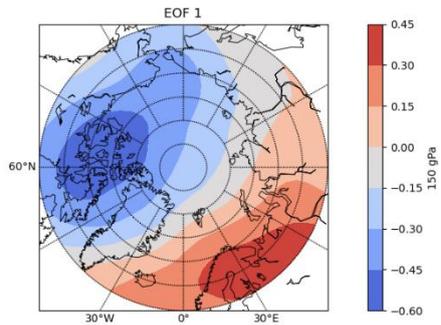
40 гПа



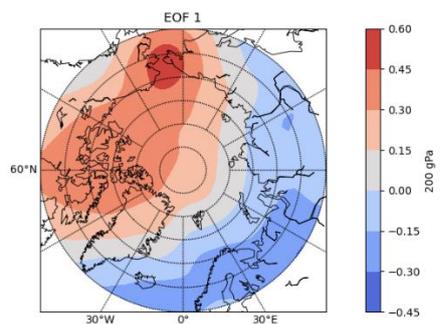
50 гПа



100 гПа



150 гПа



200 гПа

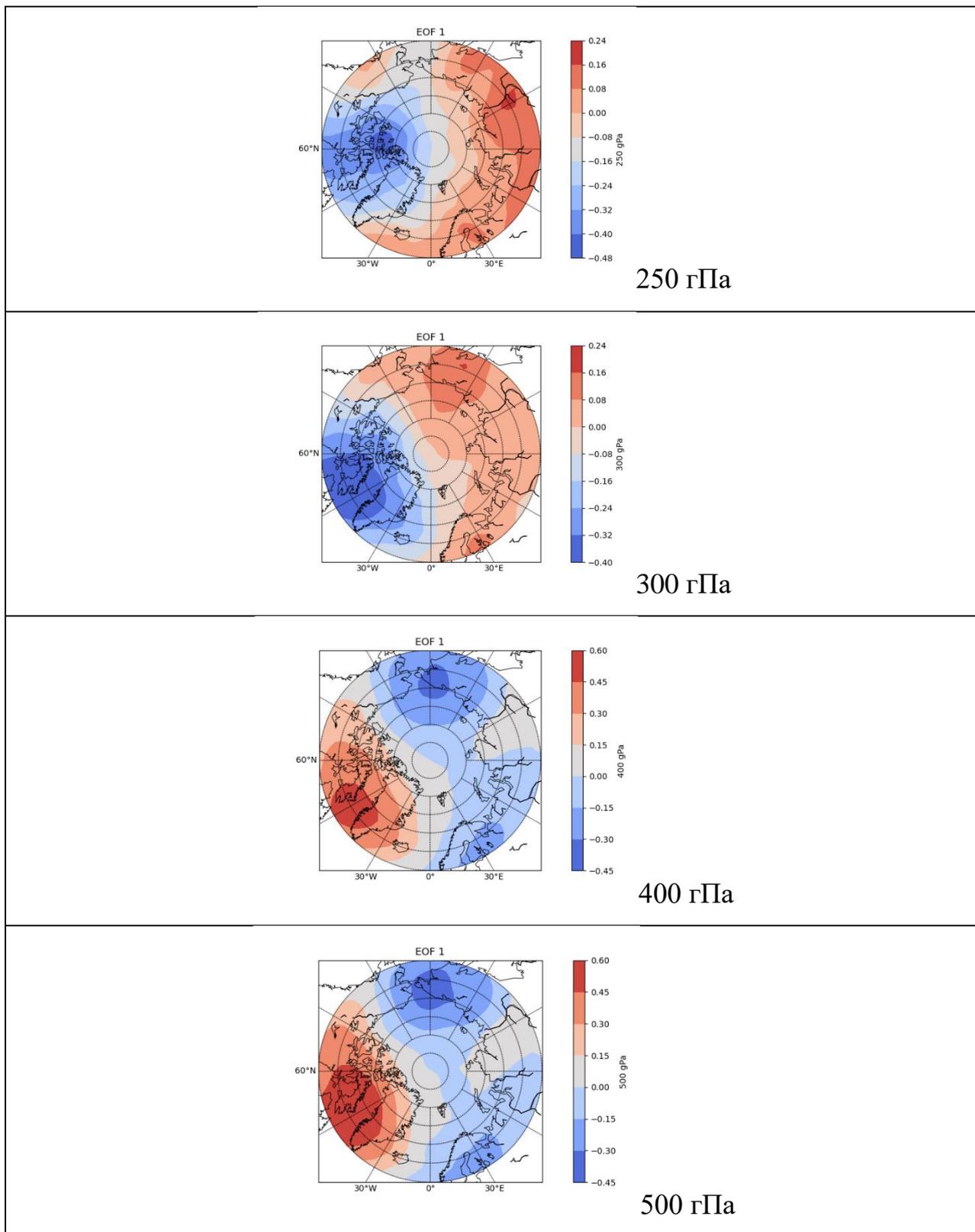
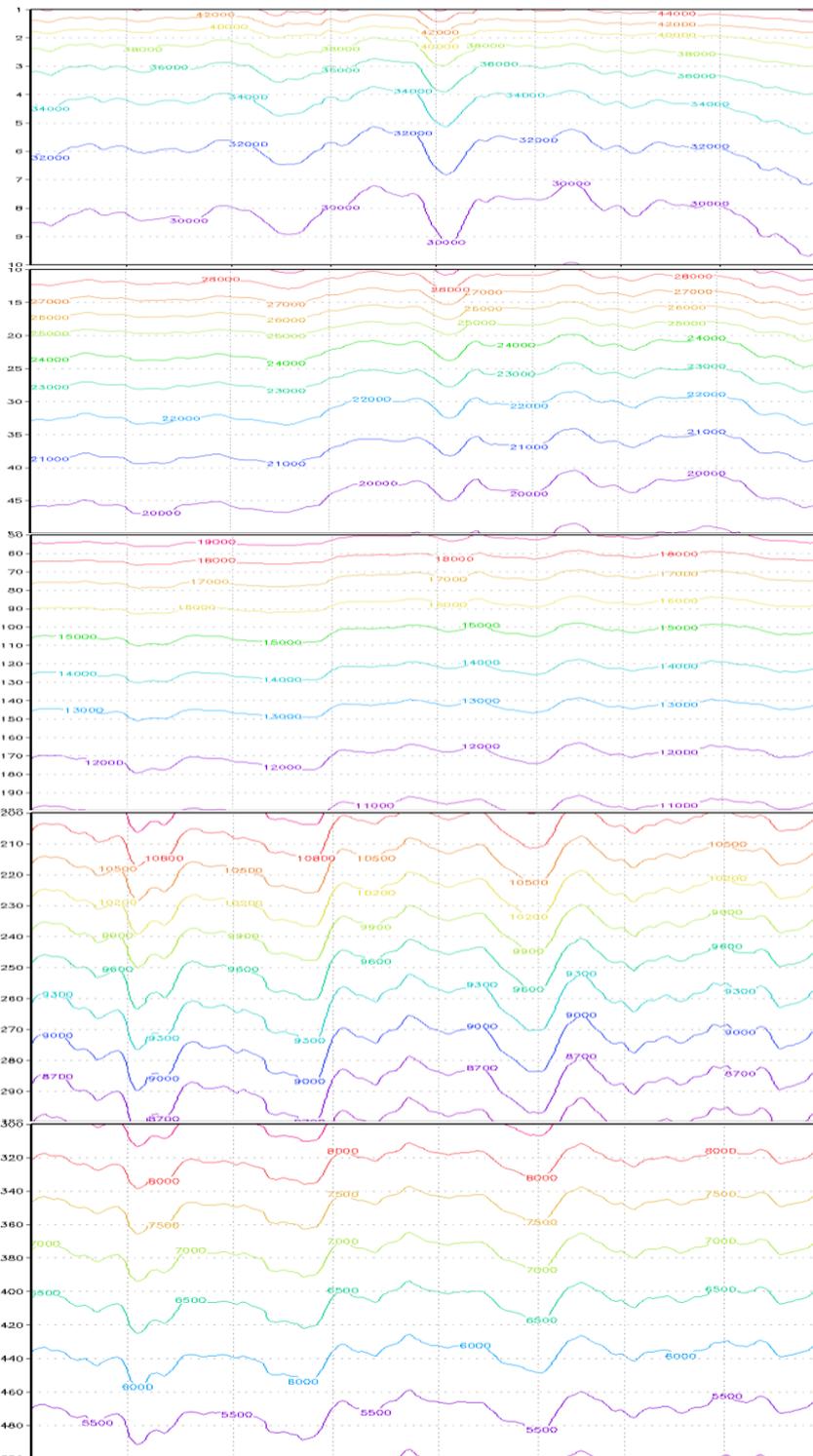


Рис. 3.24 – EOF аномалий температуры MERRA2 в зимний период 2010-2011

На рисунке 3.25 представлен вертикальный разрез вдоль 80 широты 2010-2011 год, по которому видны две перестройки полей на поверхности 200 гПа.



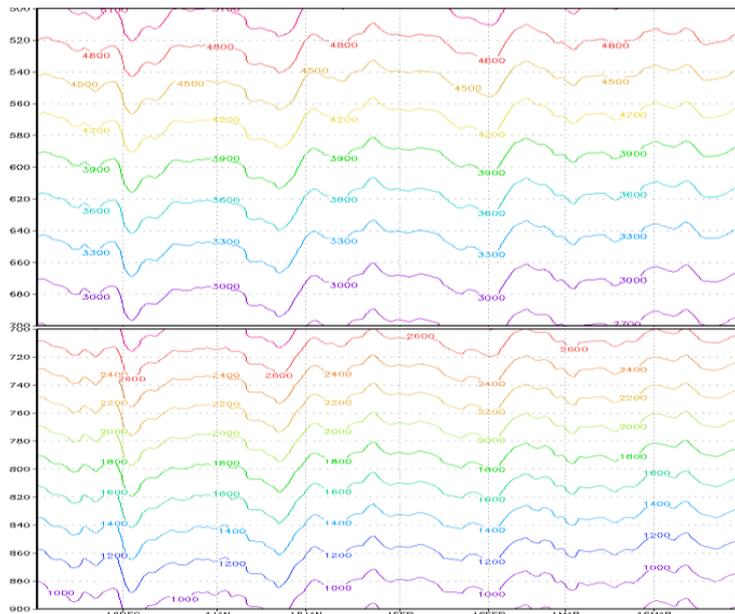


Рис. 3.25 – Геопотенциальная высота, вертикальный разрез вдоль 80 широты

Рассмотрим поля геопотенциальной высоты на поверхности 850 гПа.

Во всех полях наблюдаются области положительных и отрицательных аномалий. По расположению очагов этих аномалий можно выделить

2003-2004, 2012-2013, 2013-2014, 2015-2016, 2010-2011 2005-2006

2007-2008, 2011-2012,

2002-2003, 2004-2005, 2017-2018, 2019-2020

2000-2001, 2009-2010, 2020-2021

2001-2002, 2016-2017, 2018-2019

В полях второй ЕОФ трудно найти закономерности даже на изобарической поверхности 10 гПа.

Можно разделить поля по двум признакам – сколько очагов аномалий присутствует и какие регионы заняты положительными или отрицательными аномалиями.

Чаще наблюдается два чётко выраженных очага аномалий. Эта ситуация наблюдалась зимой 2000, 2001, 2007-2010, 2012-2020 гг. Пример полей зимой 2018 и 2020 года представлен на Рис. 3.26.

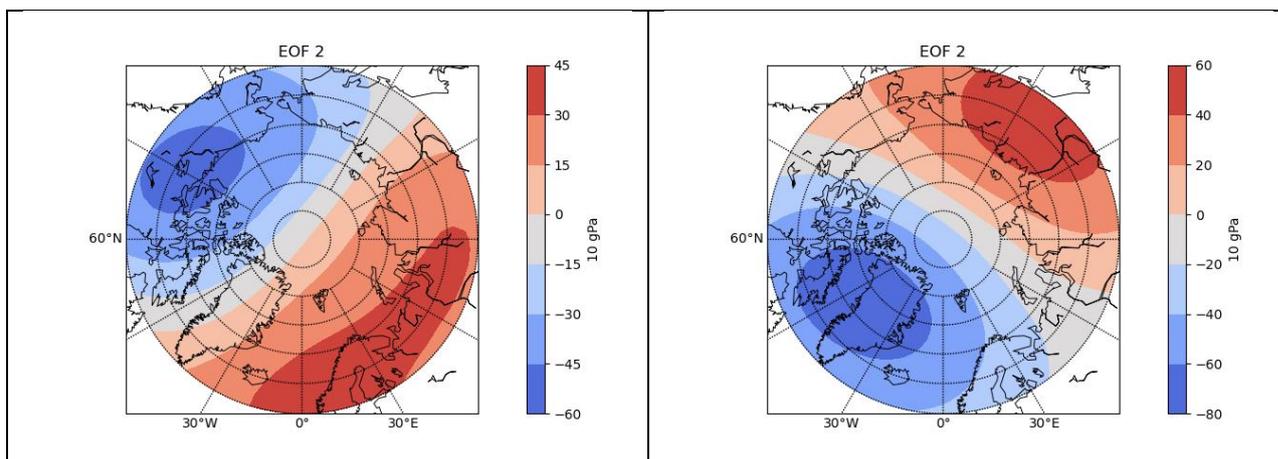


Рис. 3.26 – EOF аномалий геопотенциальной высоты на уровне 10 гПа MERRA2 в зимние периоды 2018-2019 (слева), 2020-2021 (справа)

На рисунке 3.26 хорошо видны два очага аномалий с разным расположением центров.

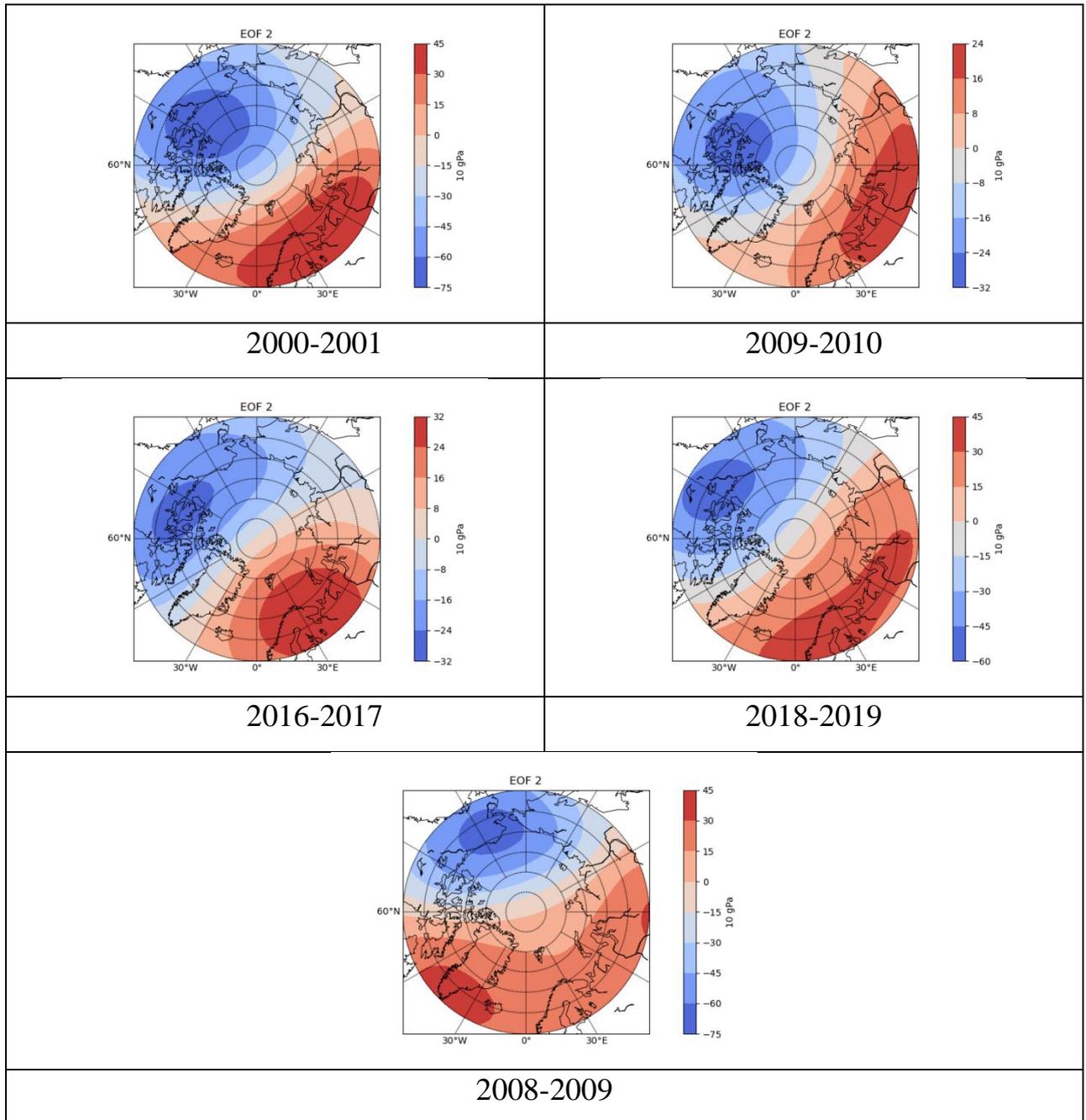


Рис. 3.27 – EOF аномалий геопотенциальной высоты на уровне 10 гПа

MERRA2

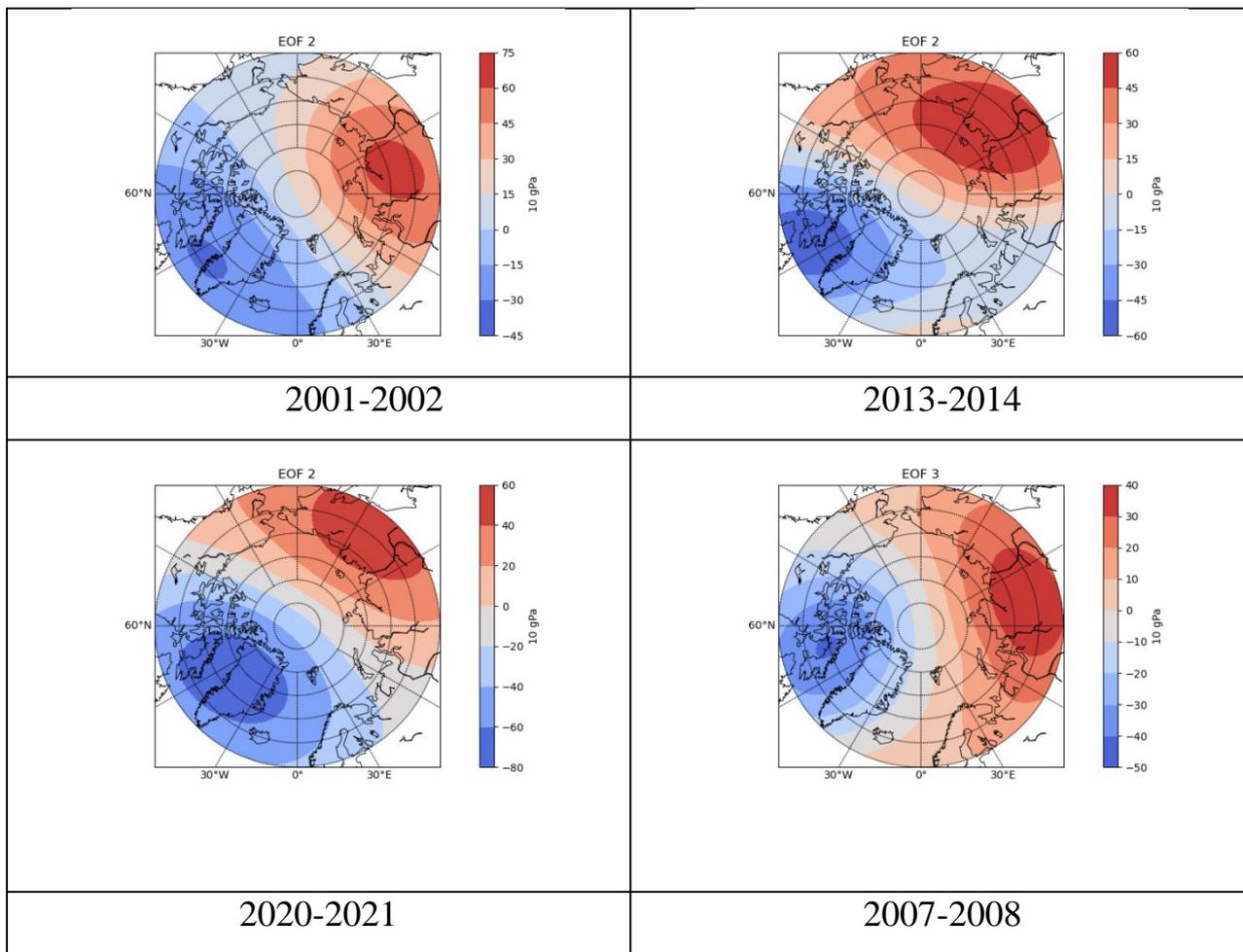
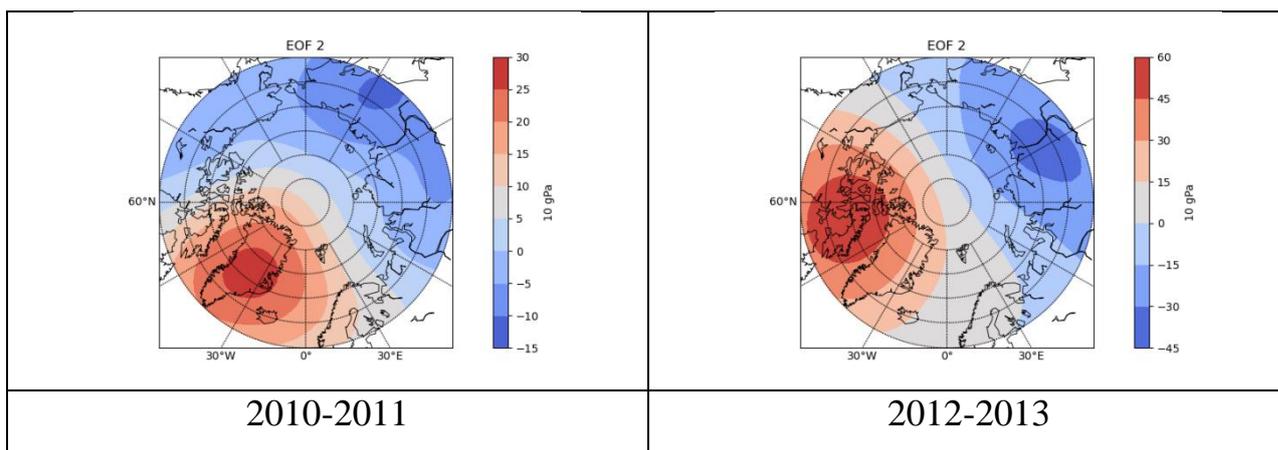


Рис. 3.28 – EOF аномалий геопотенциальной высоты на уровне 10 гПа

MERRA2



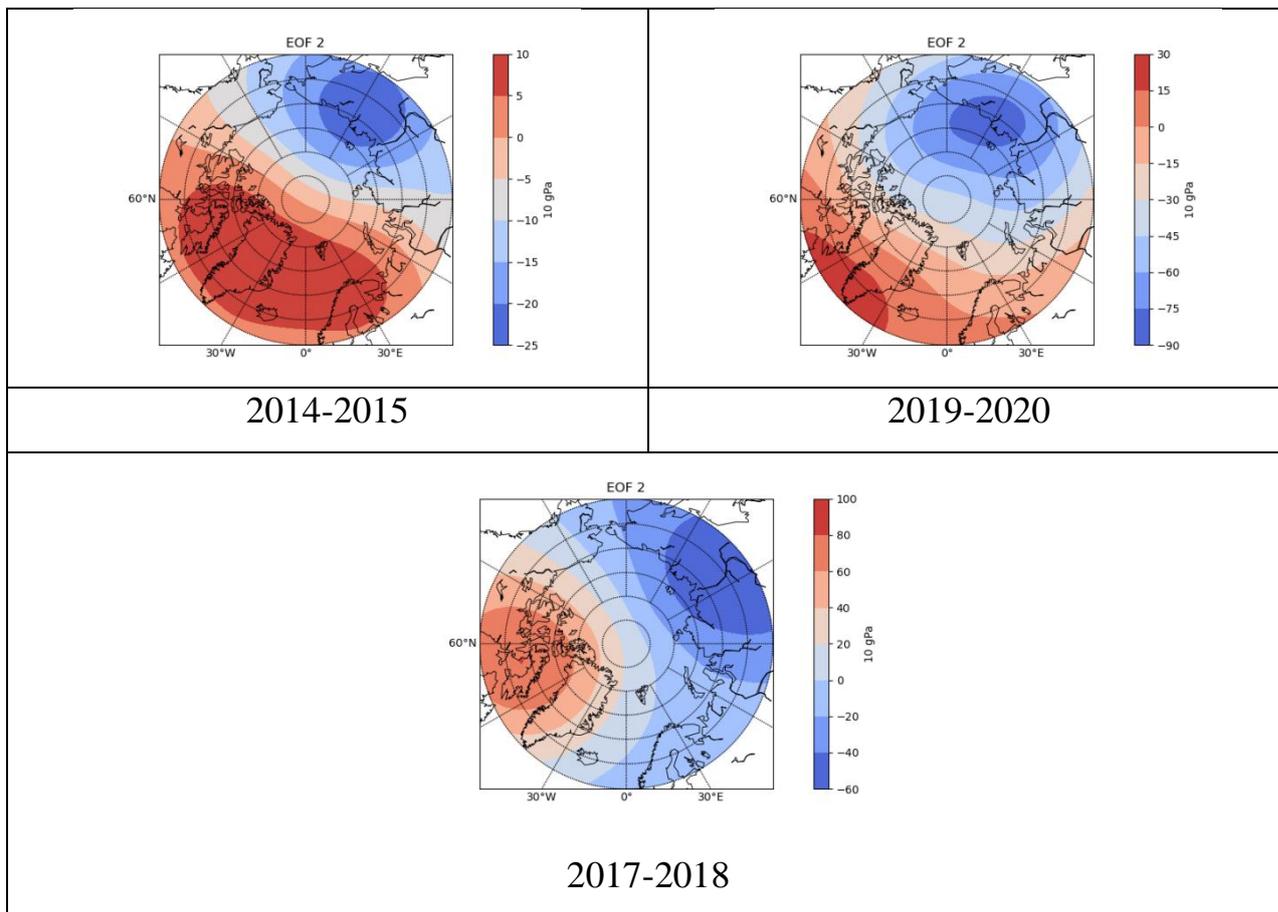


Рис. 3.29 – EOF аномалий геопотенциальной высоты на уровне 10 гПа

Анализируя представленные распределения, можно отметить, что никогда не повторяется несколько лет подряд одно пространственное распределение аномалий. Исключение зимы 2008-2009 и 2009-2010 годов, но и в эти года центры очагов смещены относительно друг друга. Чаще очаги отрицательных аномалий наблюдаются в западном полушарии с центрами над Гренландией и Канадой – всего 9 случаев. Только 5 случаев с областью отрицательных аномалий над Сибирью.

Уникальной является ситуация зимы 2015-2016 гг., приведённая на рисунке 3.30, — это единственная зима с там расположением очагов положительных о отрицательных аномалиях.

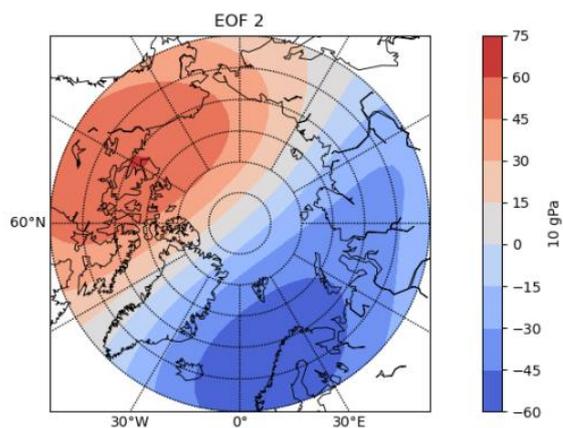


Рис. 3.30 – EOF аномалий геопотенциальной высоты на уровне 10 гПа в зимний период 2015-2016 гг.

Поля аномалий геопотенциальной высоты зимой 2002-2006 и 2011 годов характеризуются незначительными величинами аномалий и наличием нескольких центров. В качестве примера на рисунке 3.31 приведено поля для зимы 2003-2004 годов.

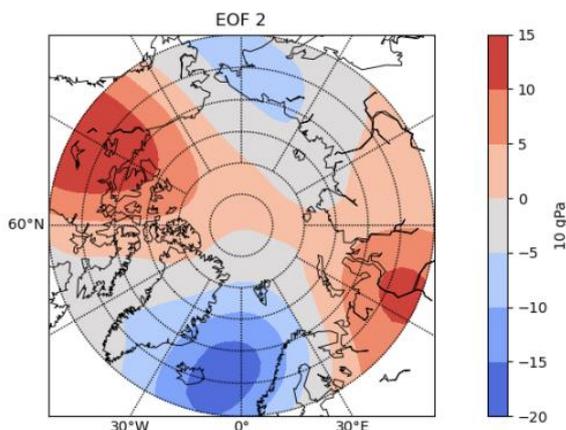


Рис. 3.31 – EOF аномалий геопотенциальной высоты на уровне 10 гПа в зимний период 2003-2004 гг.

3.5. Связь результатов с Эль Ниньо, ВСП, САК

Для оценки влияния явлений, описанных в главе 1.2, на поля метеорологических величин северного полушария в тропосфере и стратосфере, были рассмотрены ЕОФ в годы наблюдавшихся явлений.

Связи распределения аномалий геопотенциальной высоты и температуры с квазидвухлетним колебанием обнаружено не было. Возможно, влияние есть, но его вклад настолько незначителен, что не прослеживается в первых трех ЕОФ. Но как уже было отмечено, эффект КДК проявляется в основном на экваторе и до широт 60°.

Существует связь фаз КДК с частотой появления Внезапных Стратосферных Потеплений. Годы, в которые наблюдались ВСП, отмечены положительными аномалиями температуры над Канадой и Гренландией отрицательными аномалиями температуры над Евразией (Рис. 3.32-3.33).

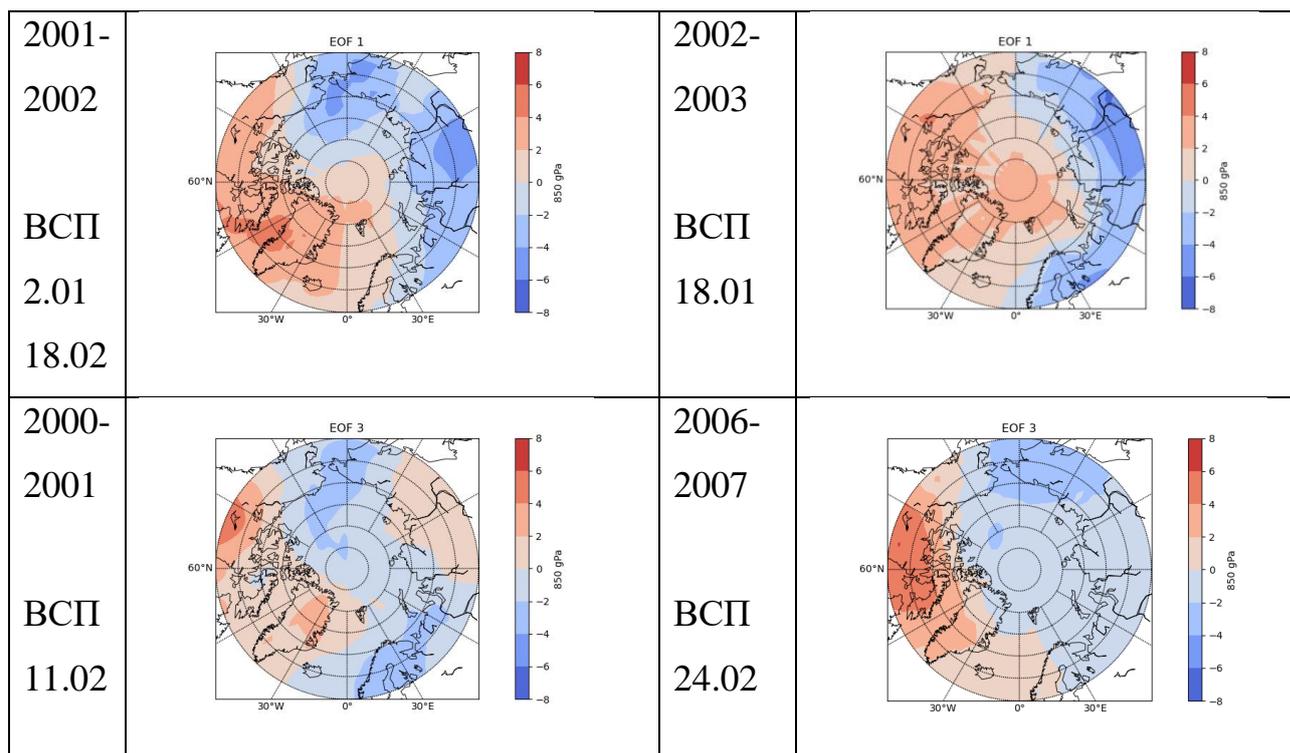


Рис. 3.32 – ЕОФ аномалий температуры в зимы с наблюдавшимися ВСП

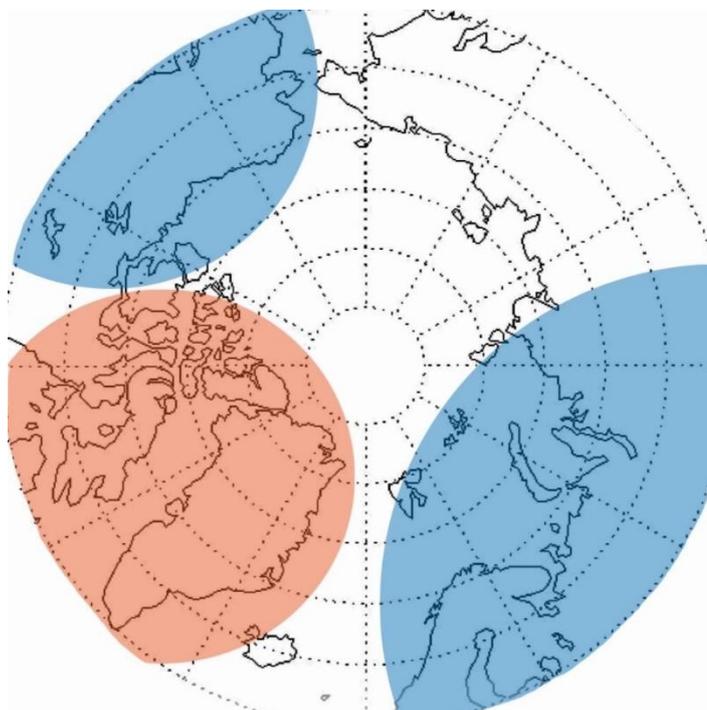
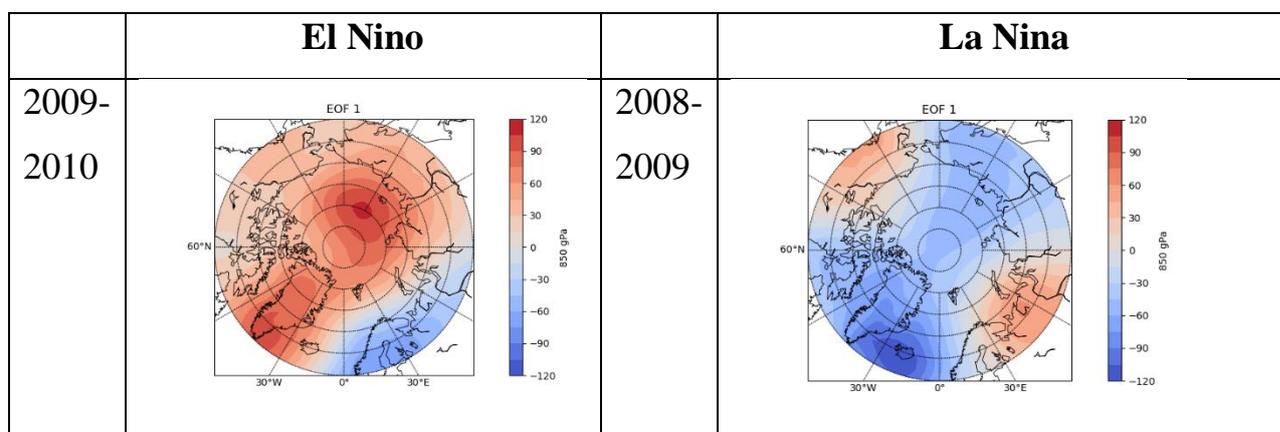


Рис. 3.33 – Характер распределения аномалий температуры в зимы с ВСП

Годы Эль Ниньо отличаются преобладанием положительных аномалий геопотенциальной высоты над всей рассматриваемой территорией, особенно Гренландией, кроме Скандинавии и Европы, где наблюдаются отрицательные аномалии (Рис. 3.34-3.35). Годы Ла Нинья, напротив, отмечены отрицательными аномалиями над территорией Гренландии и положительными над Европой.



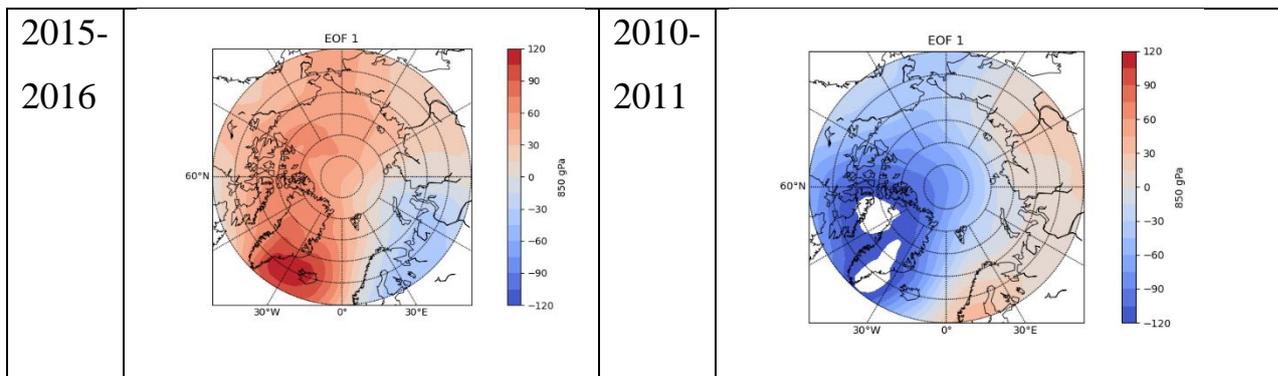
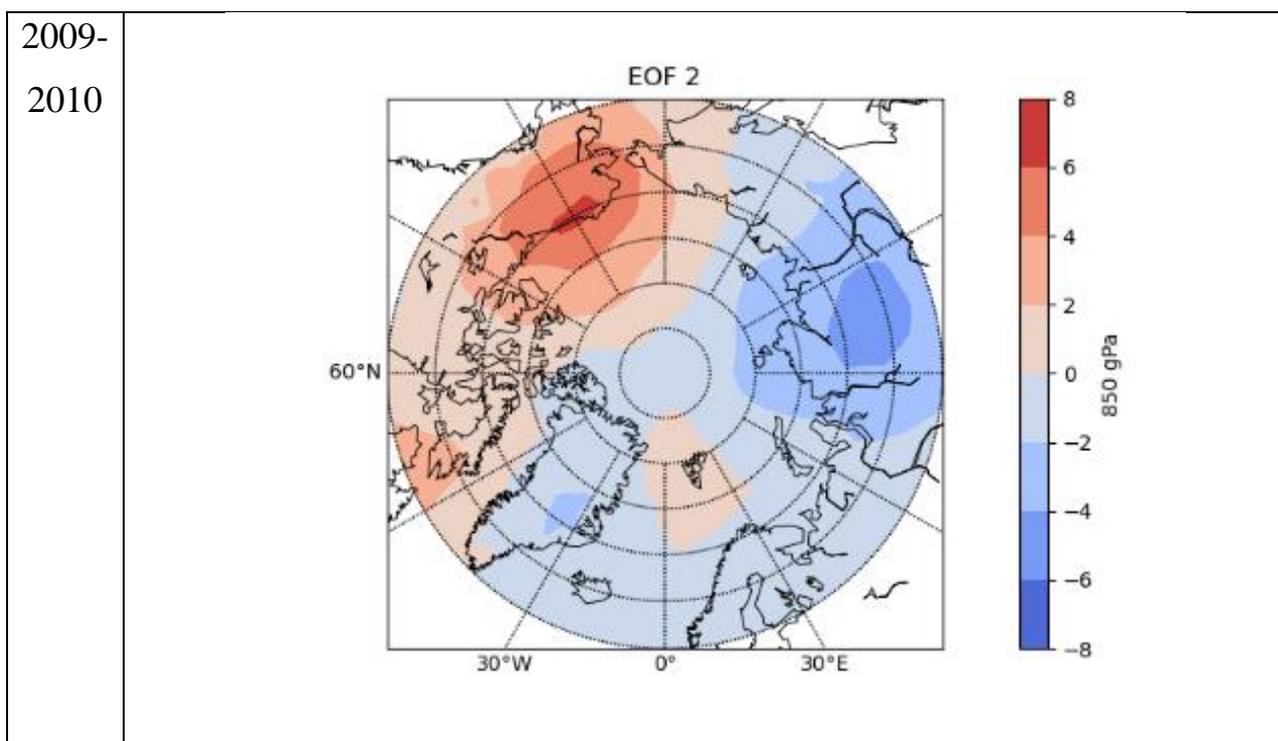


Рис. 3.34 – EOF аномалий геопотенциальной высоты в годы Эль Ниньо (слева) и Ла Нинья (справа)

Также влияние Южного Колебания отмечается на аномалиях температуры, где в годы Эль Ниньо на Дальнем Востоке России наблюдаются отрицательные аномалии, а положительные – над территорией Северной Америки.



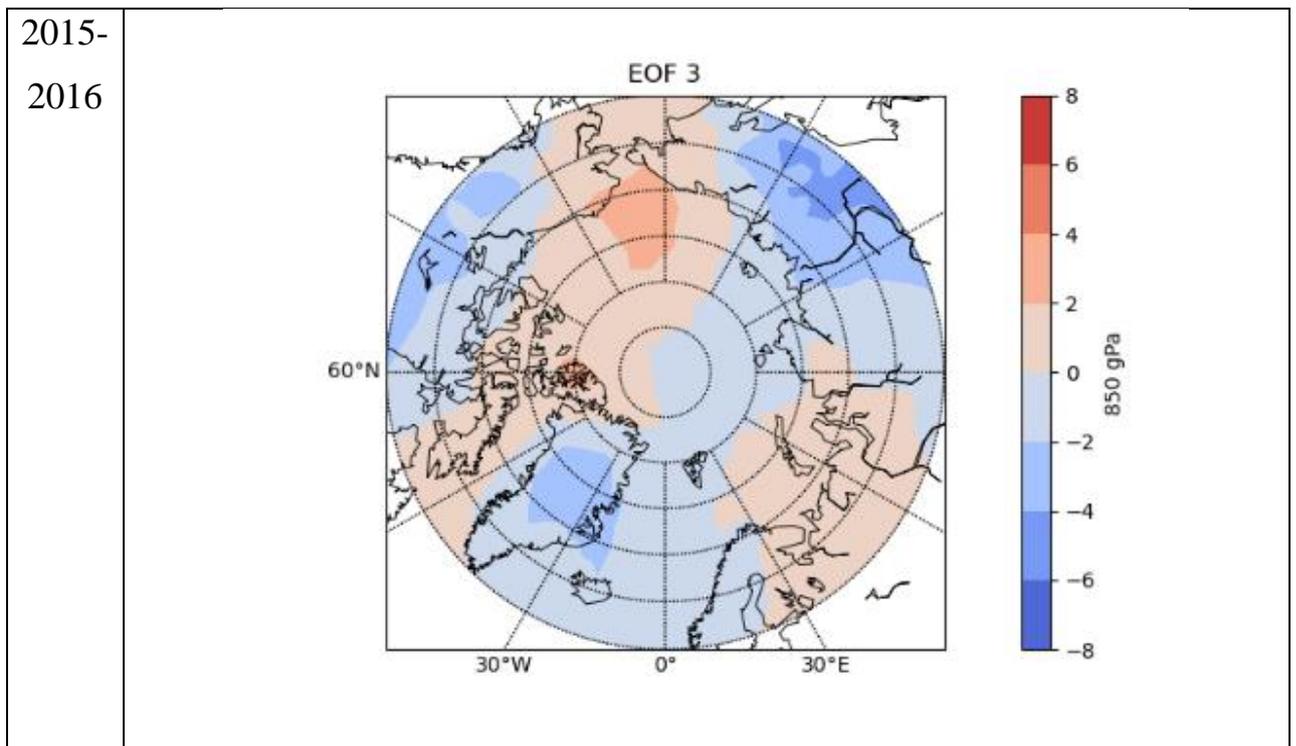


Рис. 3.35 – EOF аномалий температуры в годы Эль Ниньо

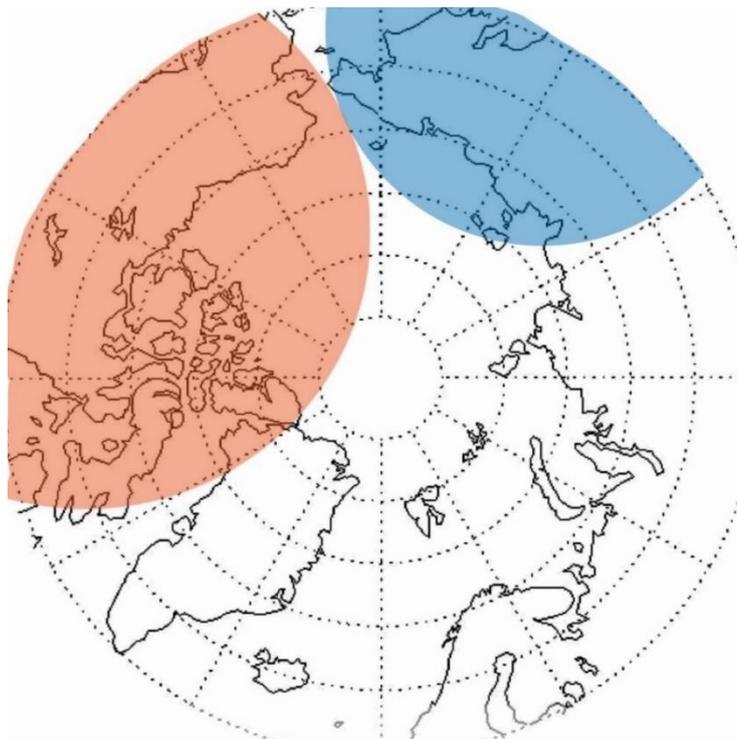
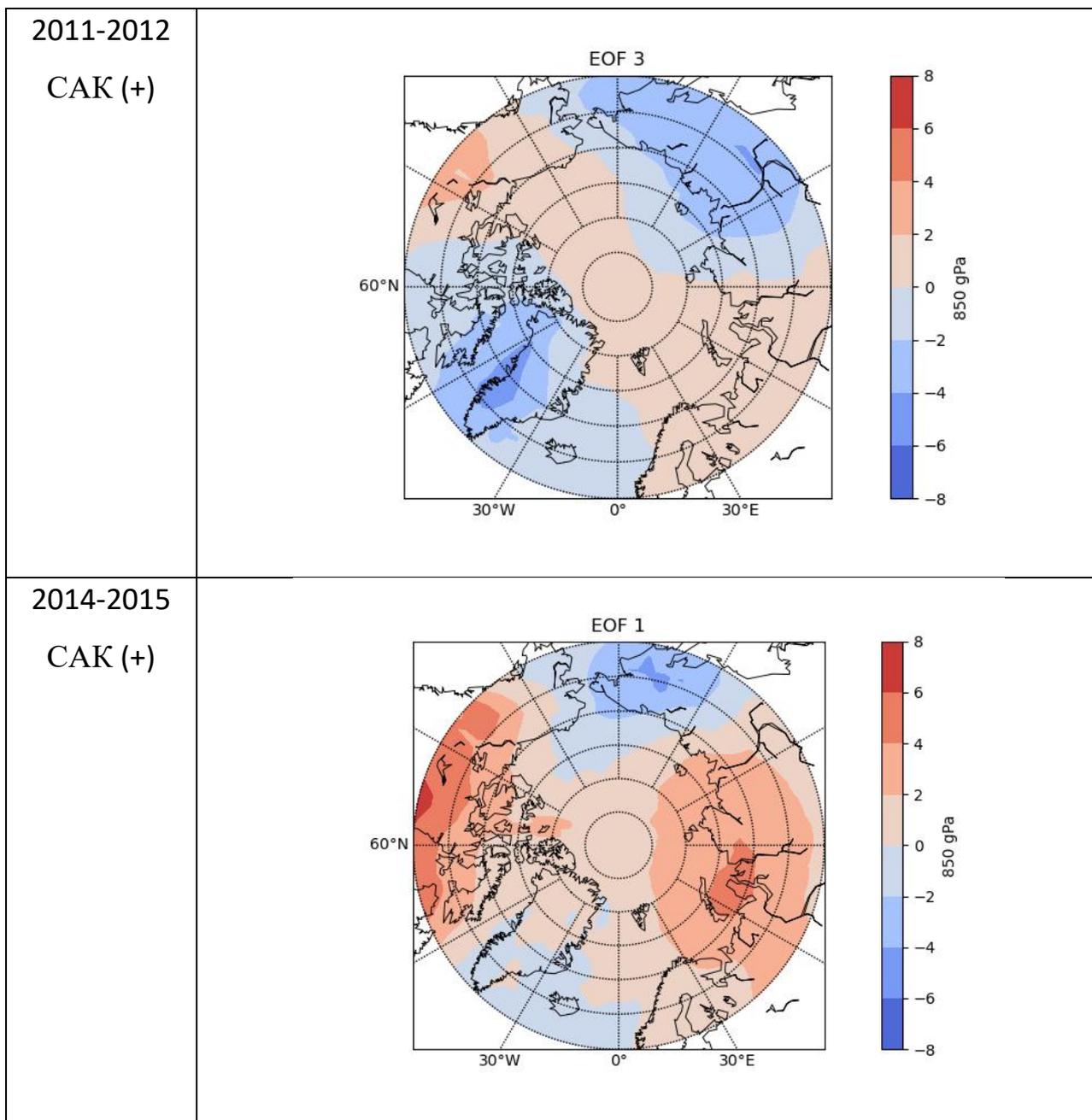


Рис. 3.36 – Характер распределения аномалий температуры в зимы Эль Ниньо

Положительная фаза САК приводит к теплым зимам в Европе (Рис. 3.38), отрицательная – к снежным и холодным зимам в Европе и Северной Америке (Рис. 3.39).



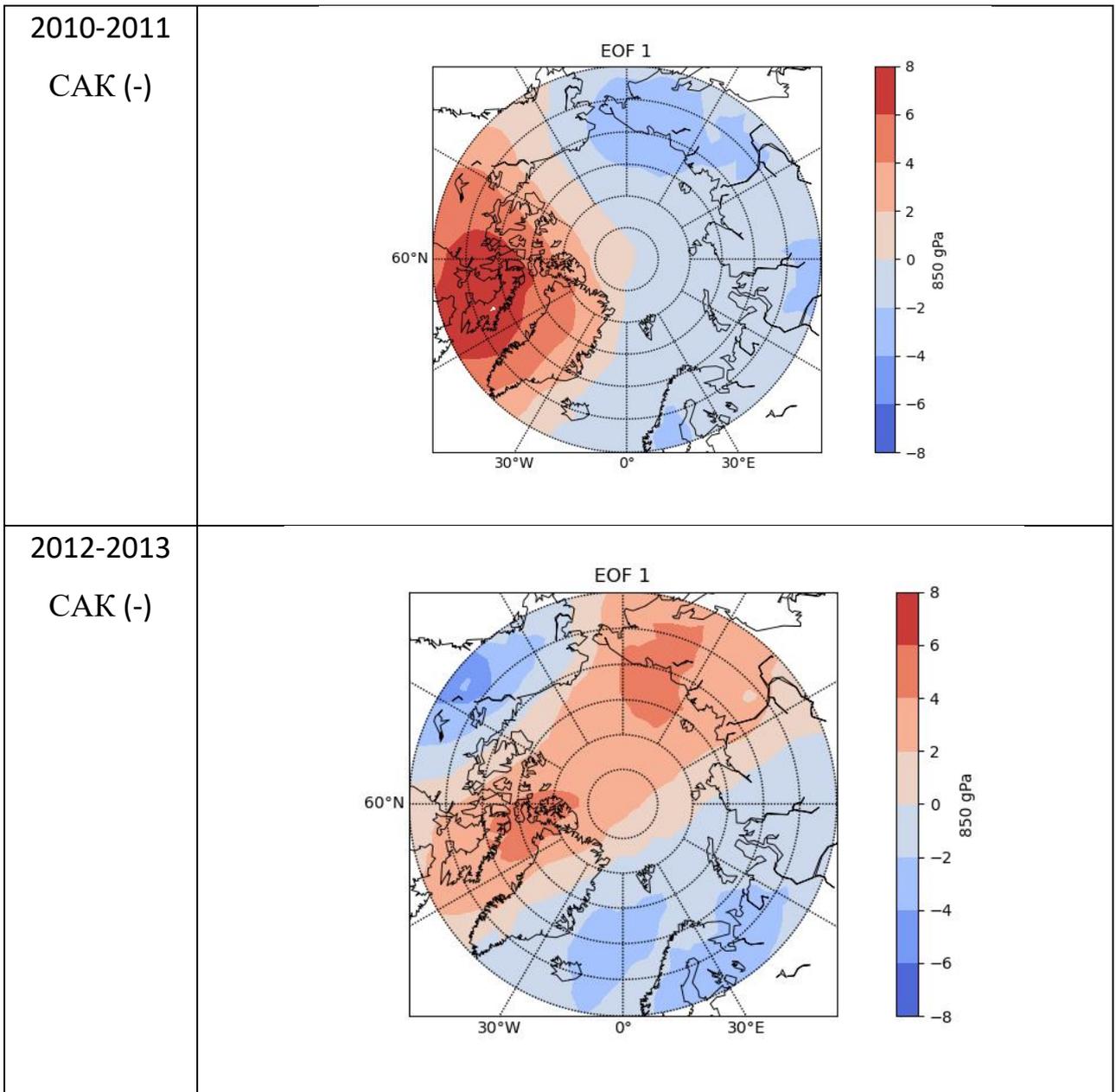


Рис. 3.37 – EOF аномалий температуры в годы с САК

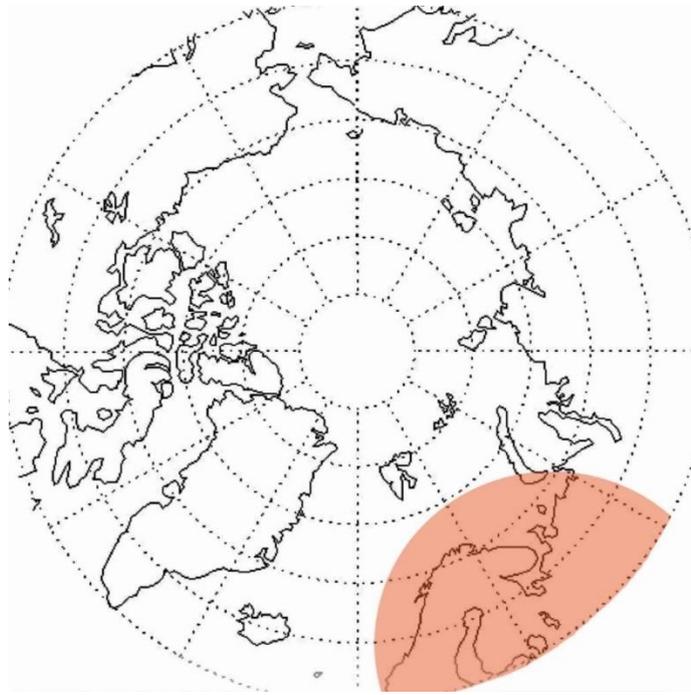


Рис. 3.38 – Характер распределения аномалий температуры в зимы с положительным индексом САК

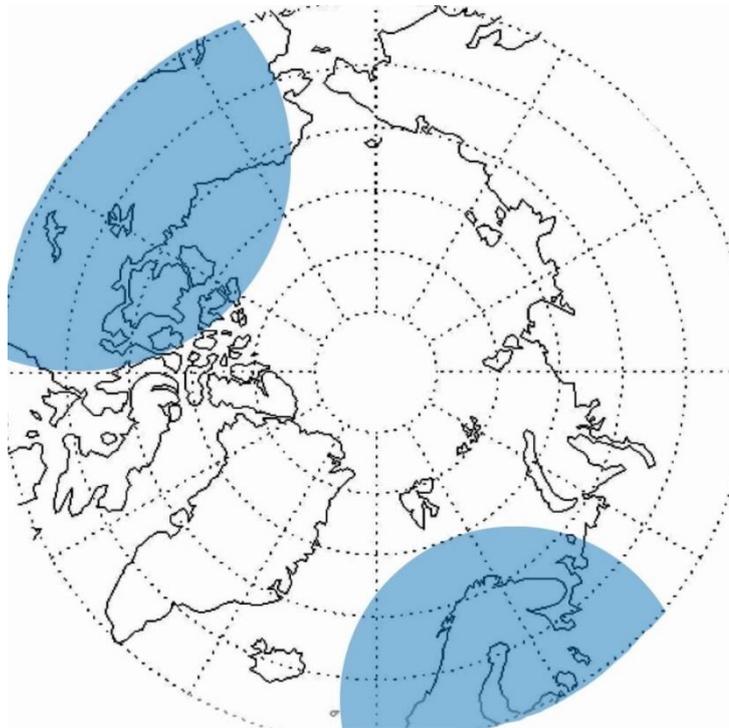


Рис. 3.39 – Характер распределения аномалий температуры в зимы с отрицательным индексом САК

3.5.1. На разных номерах ЕОФ

Рассматривая зимние периоды, в которые наблюдались несколько явлений, например, ЭНЮК и ВСП или САК и ВСП, можно отметить, что чем сильнее явление влияет на атмосферу, тем раньше оно проявляется на ЕОФ.

К примеру, в зимний период 2017-2018 гг. наблюдалась положительная фаза САК (с величиной индекса 0,6) и ВСП, произошедшее в середине февраля. На картах ЕОФ аномалий температуры можно видеть, что характер распределений, соответствующий явлению САК, наблюдается на ЕОФ1 и, в большей мере, на ЕОФ2. А поля, характерные для явления ВСП, видны только на ЕОФ3 (Рис. 3.41).

Рассматривая следующую зиму, 2018-2019 гг., в которую наблюдалась положительная фаза САК с величиной индекса 0,5, характерная для данного явления картина аномалий температуры проявляется только на третьей составляющей, в то время как на первой виден характер распределений, соответствующий явлению ВСП, которое в этот зимний период наблюдалось в начале января раньше, чем в предыдущий год (Рис. 3.41).

Также можно видеть, что паттерны, соответствующие разным явлениям, могут накладываться. К примеру, в зимний период 2002-2003 гг. на первой ЕОФ можно видеть, что в западной части полушария наблюдаются положительные, а в восточной – отрицательные аномалии температуры, в целом характер распределения совмещает в себе аномалии, характерные для зим с ЭН и ВСП (Рис. 3.40).

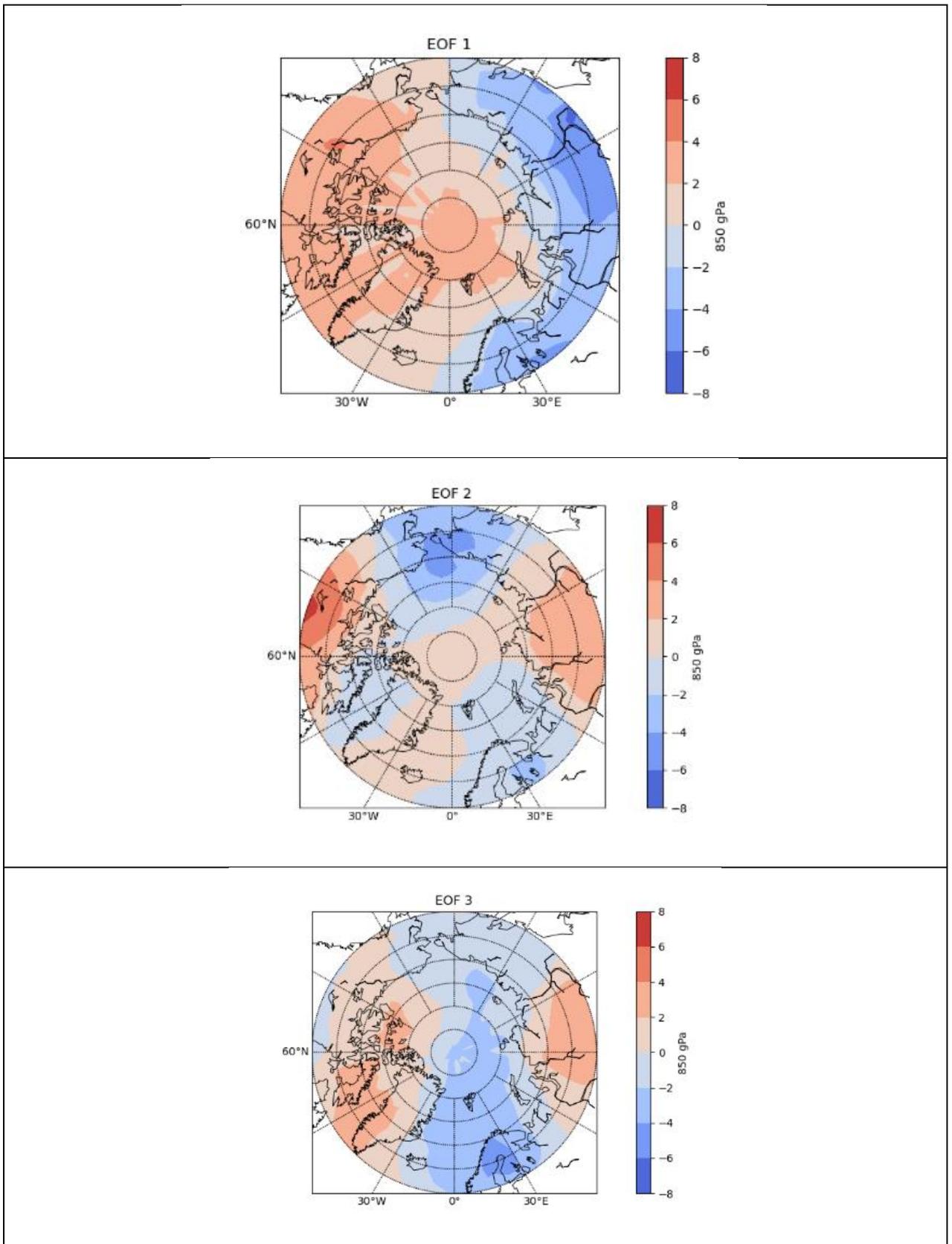


Рис. 3.40 – EOF аномалий температуры, 2002-2003 гг.

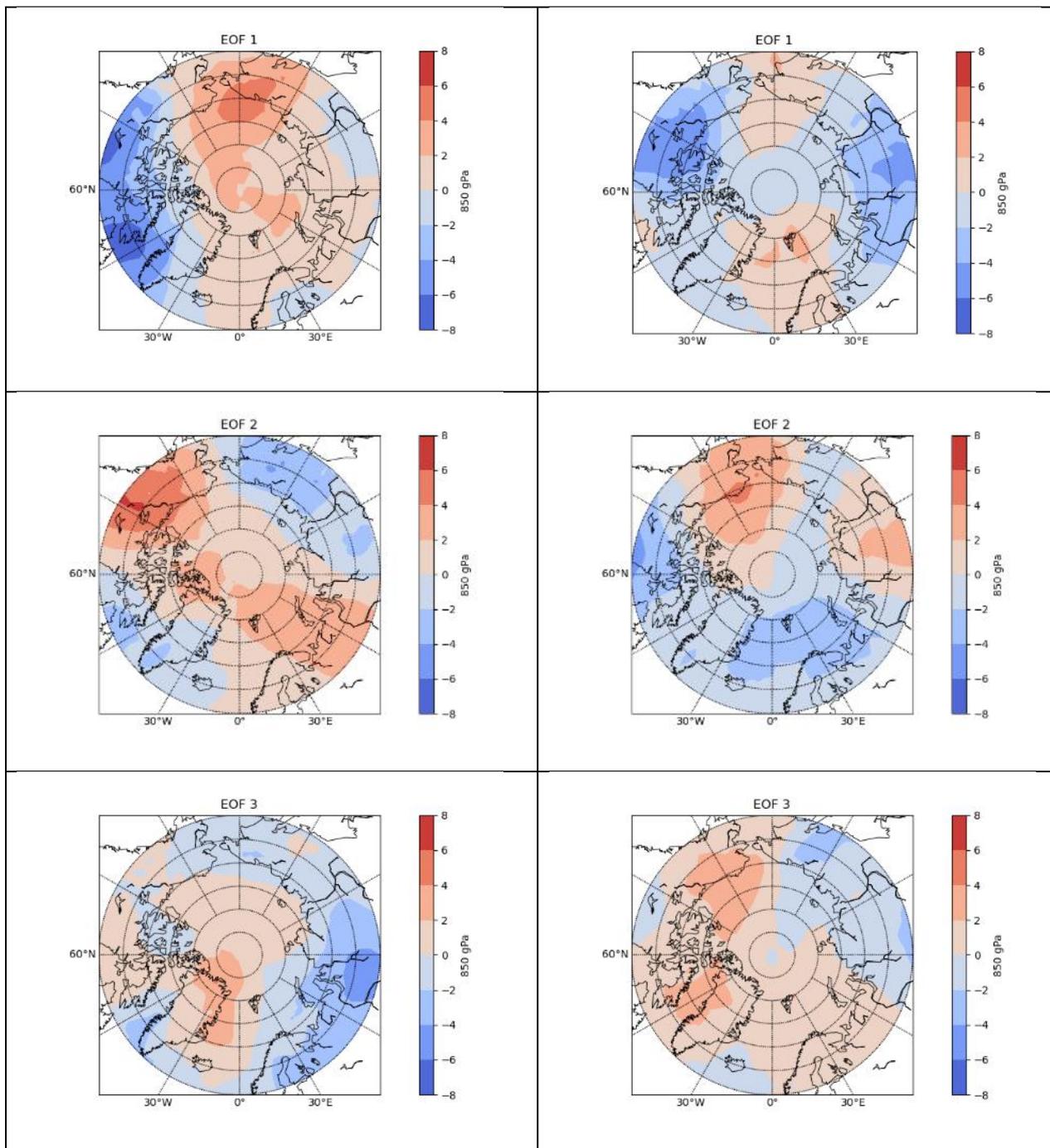


Рис. 3.41 – EOF аномалий температуры, 2017-2018 гг. (слева) и 2018-2019 гг. (справа)

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод об исключительном динамическом и термическом состоянии атмосферы Северного полушария в годы 2010-2011, 2014-2015 и 2019-2020 гг., о чем свидетельствуют поведения геопотенциальной высоты и температуры на высотах тропосферы и стратосферы.

Выявлены периоды с ошибками в данных реанализов UKMO2, ERA5 и MERRA2.

На величину аномалий температуры и геопотенциальной высоты влияют такие явления как Эль-Ниньо Южное Колебание, Северо-Атлантическое Колебание, Внезапные Стратосферные Потепления.

Паттерны распределения аномалий, характерные для определенного явления, проявляются на ЕОФ с наименьшим собственным числом, если данное явление играло большую роль на состояние атмосферы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Zachary D. Lawrence et al. The Remarkably Strong Arctic Stratospheric Polar Vortex of Winter 2020: Links to Record-Breaking Arctic Oscillation and Ozone Loss.
2. Электронный ресурс]. - 2022. - Режим доступа: <https://psl.noaa.gov/enso/mei>
3. [Электронный ресурс]. - 2015. - Режим доступа: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/history/method.shtml
4. Багров Н.А. Аналитическое представление последовательностей метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // Тр. ЦИП. 1959. Вып. 74. С. 3–24.
5. Даценко Н.М., Иващенко Н.Н., Сонечкин Д.М. Свойства и изменения естественных ортогональных составляющих температурных полей северной Евразии в XX веке // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2011, том 47, No 1, с. 35–49
6. Моханакумар К. Взаимодействие стратосферы и тропосферы / Пер с англ. Р.Ю. Лукьяновой; Под ред. Г.В. Алексеева – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 452 с.
7. Charlton, A. J., and L. M. Polvani, 2007: A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks. *J. Climate*, 20, 449–469.
8. A sudden stratospheric warming compendium Amy H. Butler et al. *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 63–76, 2017
9. Г.Р. Хайруллина, Н.М. Астафьева Квазидвухлетние Колебания в атмосфере Земли Обзор: наблюдение и механизмы формирования Учреждение Российской Академии Наук Институт Космических Исследований Ран 2011
10. Dawson, A 2016 eofs: A Library for EOF Analysis of Meteorological, Oceanographic, and Climate Data. *Journal of Open Research Software*