



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

Кафедра метеорологических прогнозов

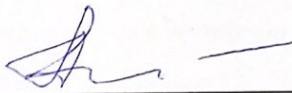
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Численное моделирование условий устойчивости стратосферного
полярного вихря с использованием модели МСВА

Исполнитель Ахмеров Илья Ильфатович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физ-мат наук
(ученая степень, ученое звание)
Савенкова Елена 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)

«15» 06 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	2
Общая характеристика работы	2
Актуальность	2
Цель работы	3
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	4
1.1 Полярный стратосферный вихрь.....	4
1.2 История изучения.....	8
1.2.1 Полярный вихрь на Уране	10
2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	11
2.1 Ход работы	11
2.2 Анализ данных реанализа	12
3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	25
3.1 Результат моделирования МСВА.....	25
3.2 Сравнение данных реанализа и моделирования МСВА	28
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	29
ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА	30
ИСТОЧНИКИ	30

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы

Данная научная работа находится в области анализа динамики зимней атмосферы, и в ней рассматривается использование полярного вихря в качестве индикатора динамической составляющей атмосферы.

Динамическая средняя атмосфера является неустойчивой зимой, и часто над полюсом устанавливается полярный вихрь, имеющий циркумполярное течение западного направления и характеризующийся низкой температурой в центральной части. В течение зимы, такой вихрь может возможно ослабевать или полностью разрушаться, что влияет на тропосферу и на погоду у земли. В данной исследовательской работе были рассмотрены зимы за последние пять лет: с 2018 года по 2022 год. Были проанализированы неустойчивость циркумполярного вихря, изменчивость среднезонального ветра, средняя температура над полюсом, а также была проведена модель оценки устойчивости и ослабления полярного вихря.

Актуальность

Полярные вихри представляют большой интерес из-за их влияния на распространение озона в стратосфере, перемещения воздушных масс в полярных и субполярных областях и изменение температурного режима в полюсных регионах. В наиболее активные периоды полярные вихри могут усилить стратосферно-тропосферный обмен, что уменьшает температурный градиент в области тропопаузы. Озоновые аномалии, формируемые в полярных вихрях с конца зимы и до весны, могут увеличить ультрафиолетовое излучение на поверхности, что опасно для биосферы. Масштаб и интенсивность разрушения стратосферного озона в

полярной области зависят от силы и устойчивости полярного вихря весной. Границы полярного вихря являются динамическим барьером, не позволяющим меридиональному переносу стратосферного озона из тропических и средних широт в полярные регионы. При экстремально низких температурах, особенно ниже -78°C , внутри полярного вихря образуются полярные стратосферные облака, в разном соотношении содержащие льды и кристаллы, инициирующие гетерогенные реакции с выделением молекулярного хлора. Солнечное излучение в полярной области запускает процесс фотодиссоциации молекулярного хлора, образующего радикалы хлора, которые вступают в каталитический процесс разрушения озона. Озоновый слой играет важную роль в защите биосферы от вредного солнечного излучения.

Ультрафиолетовое излучение, включая коротковолновое, может негативно воздействовать на растения, вызывая депрессию фотосинтеза и разрушение фотосинтетического аппарата, что может привести к ухудшению качества урожая и снижению продуктивности растений. В океане коротковолновое ультрафиолетовое излучение может иметь вредный эффект на морские организмы, что может негативно сказаться на экосистеме океана. Для человека ультрафиолетовое излучение также может иметь негативное воздействие, вызывая повреждение ДНК и приводя к развитию рака кожи, катаракте и изменению иммунной системы.

Цель работы

Целями работы являются исследование, использование данных реанализа, моделирование полярного вихря в численной модели верхней и средней атмосферы, а также его анализ.

Для реализации были произведены следующие действия:

1. Исследование и работа с данными реанализа.
2. Исследование особенностей внутри сезонных изменений стратосферных полярных вихрей.
3. Выбор граничных и стратовых условий для запуска модели
4. Вычисления с помощью МСВА

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Полярный стратосферный вихрь

Полярный вихрь, известный также как циркумполярный вихрь, является огромной областью холодного воздуха, вращающегося вокруг полюсов Земли и других планет с небольшим углом наклона. Термин "полярный вихрь" может быть использован для описания двух различных явлений: стратосферного и тропосферного полярных вихрей. Оба явления вращаются в направлении вращения Земли, но отличаются по размеру, структуре, сезонным циклам и влиянию на погоду.

Стратосферный полярный вихрь это область быстрых, циклонически вращающихся ветров, высотой от 15 до 50 км, которые указывают к полюсу на 50° и являются наиболее сильными зимой. Образуется в осенний период, когда температура быстро падает на полюсах и усиливает ветры. Весной вихрь начинает разрушаться. Внезапное стратосферное потепление (SSW) - это событие, которое возникает, когда вихрь разрушается зимой и может оказать значительное влияние на погоду на поверхности.

Тропосферный полярный вихрь характеризуется как область вокруг полюсов, где присутствует тропосферное струйное течение, который поднимается вверх к высоте от 10 до 15 км. Он также наиболее силен

зимой и существует круглый год, но его годовой цикл отличается от стратосферного вихря.

Когда северный тропосферный вихрь Арктики сильный, он имеет ясно выраженную круглую форму, и образуется одиночный вихрь с мощным потоком, который ограничивается полярным фронтом, и обеспечивает стабильность арктического воздуха. При ослаблении вихря он может разделиться на два или более мелких вихря, и наиболее мощный из них обычно находится над островом Баффин в Нунавуте, а другой на северо-востоке Сибири. Когда вихрь очень слабый, течение арктического воздуха становится менее упорядоченным, что может привести к перемещению холодных масс воздуха к экватору и резкому падению температуры.

Зона низкого давления, известная как Антарктический вихрь в Южном полушарии, расположена возле шельфового ледника Росса на западной долготе 160 градусов. Когда этот вихрь сильный, то западные ветры в средних широтах становятся постоянными и усиливаются. В случае ослабления полярного вихря, зоны высокого давления в средних широтах могут переместиться к полюсу, перенеся полярный вихрь, струйное течение и полярный фронт к экватору. Быстрая и резкая смена погоды, называемая "резким похолоданием", происходит из-за быстрого смешения холодного сухого воздуха с теплым влажным воздухом средних широт. В Австралии полярный вихрь, называемый там "полярным взрывом" или "полярным погружением", приносит холодный фронт из Антарктиды, что приводит к ливням, снегу и порывистым ледяным ветрам в юго-восточных частях страны.

Основания двух полярных вихрей находятся в средней и верхней тропосфере, а также в стратосфере. Они образуются из большой массы плотного и холодного арктического воздуха, под которыми простирается граница раздела между теплой влажной воздушной массой южнее и холодной-сухой воздушной массой полюса. Полярный фронт находится на широте примерно 60°. Полярный вихрь усиливается зимой и

ослабевает летом за счёт разницы температур между экватором и полюсами.

Полярные циклоны представляют собой зоны низкого давления, встроенные в полярные воздушные массы, и существуют круглый год. Стратосферный полярный вихрь образуется на широтах выше субтропического струйного течения, а большинство полюсов имеют радиус менее 1000 километров. Их положение обычно определяется на различных уровнях давления или высоты, от тропопаузы до поверхности давления 50 ГПа. Есть также методы идентификации полярного вихря на других уровнях давления до 500 ГПа.

Внетропические циклоны, при перемещении в высшие широты в период ослабления полярного вихря, могут разрушить единый вихрь, образовав в результате меньшие вихри (минимумы холодного ядра) в полярной воздушной массе, которые могут сохраняться до нескольких месяцев.

Извержения вулканов в тропиках могут привести к усилению полярного вихря зимой на протяжении двух лет. Сила и положение полярного вихря определяют структуру течения в обширной области вокруг него. В северном полушарии для оценки магнитуды полярного вихря используется индекс, который называется арктическим колебанием. С приближением зимы, а особенно поздней зимы и ранней весны, ядро полярного вихря охлаждается, ветры ослабевают, а энергия вихря снижается, что делает его наиболее слабым в конце зимы. В результате, большие фрагменты вихревого воздуха могут быть отведены в более низкие широты более сильными погодными системами, вторгающимися с этих широт. Распад полярного вихря происходит в период с середины марта по середину мая, что оказывает влияние на климатические явления, вегетационные периоды и общую продуктивность экосистемы. Поздний распад обычно ведет к быстрому рассеиванию остатков вихря, тогда как

ранний распад может привести к одному или двум периодам потепления и изменению климатических характеристик в зоне полярного круга. Ученые связывают задержку распада арктического вихря со снижением активности планетарных волн, несколькими внезапными потеплениями в стратосфере и истощением озонового слоя.

Эль-Ниньо и Ла-Нинья – это аномальные колебания температуры на поверхности океана. Когда происходит Ла-Нинья, вода в экваториальных зонах океана охлаждается, когда приходит время Эль-Ниньо - вода нагревается. Со всеми вытекающими последствиями для климата на планете.

Внезапные явления стратосферного потепления могут быть связаны с ослаблением полярного вихря и изменением циркуляции арктического вихря. Эти изменения могут привести к изменению скорости циркуляции в Атлантике и изменению течений океанов. Ослабление полярного вихря может привести к длинноволновому охлаждению и изменению концентрации водяного пара в вихре. Изменения в планетарных волнах могут также вызвать нестабильность вихревых колец и смещение планетарными волнами, что может влиять на силу и температуру полярного вихря. Количество волн связано с размером ядра вихря, и по мере уменьшения ядра вихря количество волн увеличивается. Более мощные штормы в тропосфере могут охлаждать полюса и усиливать полярный вихрь, в то время как Ла-Нинья может значительно усилить полюсной вихрь.

Степень смешения полярного и среднеширотного воздуха зависит от местонахождения струи полярной ночи и эволюции полярного вихря. Внутри вихря перемешивание происходит меньше, чем снаружи, но может происходить при нестабильных планетарных волнах зимой в средней и верхней стратосфере. Перед разрушением вихря перемещение воздуха из арктического полярного вихря минимально из-за сильных

барьеров на высотах более 420 км. В начале зимы струя полярной ночи слаба и не отклоняет нисходящий полярный воздух, который затем смешивается с воздухом в средних широтах. В конце зимы воздушные потоки становятся слабее, что уменьшает перемешивание. После разрушения вихря воздух распределяется в средних широтах в течение месяца. Иногда масса полярного вихря отрывается до окончания периода окончательного потепления и перемещается в Канаду и США, что влияет на температуру и погодные условия в разных регионах. Это может происходить из-за смещения полярного струйного течения или из-за воздушной массы высокого давления, известной как Гренландский блок, которые могут отклонить полярный вихрь на юг.

1.2 История изучения

Исследования динамики полярных стратосферных вихрей наблюдаются уже более 70 лет и по-прежнему важны в настоящее время. В научной литературе термин «полярный вихрь» используется в качестве сокращения термина «циркумполярный вихрь», который описывает западное стратосферное течение на планетарном масштабе, вращающееся вокруг полюсов и перемещающееся в полярных и субполярных областях. Первые упоминания о циркумполярных западных ветрах в стратосфере были сделаны в конце 1940-х годов.

В 2014 году полярный вихрь вызвал рекордно низкие температуры в США, а в прошлом - названный «Зверем с Востока», остудил своим ледяным дыханием Британию и часть Европы. В США потоки полярного воздуха обрели силу дотягиваться до курортной Флориды. Причем чем выше температура в Арктике, тем более жестоким становится удар по США и Европе.

В конце января 2019 года Соединенные Штаты и Канада были поражены глубоким замораживанием, за которое обычно обвиняют "полярный

вихрь". Термин не полностью точен с научной точки зрения, однако используется для обозначения холодных вспышек арктического воздуха после ослабления полярного вихря. Национальная метеорологическая служба США предупредила о возможности обморожения всего через 10 минут пребывания на улице при экстремальных температурах, и в результате сотни школ, колледжей и университетов в пострадавших районах были закрыты. Несколько десятков человек умерли в Соединенных Штатах вследствие сильного обморожения. Считается, что полярный вихрь также повлиял на климат в Европе в прошлом, например, в 2013-2014 годах в Соединенном Королевстве, где его обвиняли в сильных холодах в США и Канаде, а также в 2009-2010 и 2010-2011 годах, когда в Соединенном Королевстве царили сильные холода.

Антарктический полярный вихрь, из-за своего химического состава, является основной причиной серьезного уменьшения озонового слоя, но с 2000-х годов это явление стало менее выраженным и ожидается, что к 2075 году озоновый слой вернется к уровню 1980 года. Прямой причиной разрушения озона является химическая реакция азотной кислоты в полярных стратосферных облаках с хлорфторуглеродами, которые порождают хлор. Концентрация хлора возрастает в зимний период, в результате чего весной разрушение озона достигает пика. Такие облака могут образовываться только при температурах ниже -80°C . Разрушение озонового слоя на северном полюсе обычно происходит менее сильно, чем на южном, и характеризуется как "озоновая вмятина". Однако в 2011 году в арктическом полярном вихре химическое разрушение озона достигло уровня, который можно назвать "арктической озоновой дырой". Одна из гипотез образования полярного стратосферного вихря - это стабильные и очень холодные условия в зимнее время над полюсом. Разница в температуре между экватором и полюсом вызывает ветер, который перемещает холодный воздух над полюсом, толкнув его в стратосферу. Это утолщает стратосферу, вызывая понижение давления

над полюсом и установление мощных градиентов давления между полюсом и экватором. Хотя полярный вихрь образуется в стратосфере, малые вихри могут попасть в тропосферу и вызвать резкие, непредвиденные изменения погоды.

Возможно, новый мощный рукотворный фактор может быть причиной нестабильности полярного вихря, оказывая реальное воздействие на климат, не связанное с выбросами парниковых газов. В разных частях мира действуют излучатели чрезвычайно низкочастотного диапазона, которые могут отражаться от Земли и вызывать электронный резонанс в 50 км от ее поверхности. Предполагается, что такие волны могут генерировать сильные ливни и штормовую погоду. В эксперименте в США в 1977 году были созданы условия, которые привели к сильному ливню в Висконсине и ветрам, сокрушившим 350 акров лесных угодий при энергетическом выбросе 1,2 млн ватт, имитирующих процессы при образовании грозных ураганов в природе.

Изучение полярного стратосферного вихря является важным для лучшего понимания атмосферной динамики земли и способности прогнозировать погодные условия с высокой точностью. Он также является ключевым элементом изучения изменения климата и его влияния на окружающую среду.

1.2.1 Полярный вихрь на Уране

Ученые NASA обнаружили на Уране полярные циклоны с помощью изучения радиоволн, испускаемых планетой. Эти данные подтвердили гипотезу о возможности появления закрученных вихрей на полюсах атмосфер любых планет в Солнечной системе, независимо от их состава. Ранее ученым было известно о существовании закрученности у южного полюса Урана, что было подтверждено наблюдениями «Вояджера-2». Теперь стало известно, что температуры на планете также изменяются в

связи с наличием полярных циклонов, что не было отмечено ранее при анализе полученных с инфракрасных сканеров «Вояджера» данных. С помощью сложной антенны Very Large Array ученые на Уране обнаружили признаки сильного циклона и определили, что на северном полюсе циркулировавший воздух был гораздо теплее и суше, чем в остальной части планеты. Сравнив эти новые данные с предыдущими, полученными в 2015, 2021 и 2022 годах, ученые пришли к новым выводам, считая, что Уран является гораздо более динамичным миром, в котором постоянно происходят изменения, и не является застывшим ледяным шаром, как считалось ранее. Положение Урана также сыграло роль в возможности выполнения этих наблюдений, так как планета прошла длительный путь вокруг Солнца, цикл которого длится 84 года. До 2015 года ученым не удалось увидеть полярные области на Уране, но с тех пор они получили возможность изучать атмосферу планеты. Наблюденный циклон на Уране с горячим и сухим воздухом напоминал тот, что был обнаружен на Сатурне зондом NASA «Кассини». Таким образом, циклоны и антициклоны подтвердились на полюсах всех планет в Солнечной системе, за исключением Меркурия, у которого нет атмосферы. В отличие от ураганов на Земле, циклоны на Уране и Сатурне образуются не над водой и не дрейфуют, а остаются четко зафиксированными на полюсах. Ученые продолжают наблюдать за развитием обнаруженного циклона на Уране, чтобы определить, является ли это тем же явлением, которое было зафиксировано «Вояджером», или находится в атмосфере планеты скопление подобных циклонов.

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Ход работы

Основным методом решения поставленных в работе задач дальнейший

ход работы заключались в совместном анализе данных наземных и спутниковых наблюдений и данных глобальных атмосферных реанализов. В работе также использовались статистические методы, анализ с помощью модели MCBA (Модель средней и верхней атмосферы). Для проведения расчетов использовались данные реанализа MERRA2. MERRA-2 предназначен для замены оригинального продукта MERRA и отражает последние достижения в области атмосферного моделирования и ассимиляции данных. В MERRA-2 используются современные гиперспектральные наблюдения за излучением и микроволновыми излучениями, а также данные GPS-радио-затмения и наборы данных НАСА по озону. Большая часть структуры файлов данных остается прежней в MERRA-2. В то время как исходным форматом данных MERRA был HDF-EOS, двоичный формат данных, поставляемый MERRA-2, теперь является netCDF4.

2.2 Анализ данных реанализа

В летний период в субполярной стратосфере преобладают слабые восточные воздушные течения, а в зимний период начинают доминировать сильные западные. Полярные вихри, как правило, формируются в осенне-зимний период и разрушаются весной.

На рис. 1-6 представлены среднемесячные поля скорости зонального ветра и температуры на уровне 30 гПа над Арктикой с ноября по март, полученные по данным реанализа MERRA2. Как видно из рисунков, полярный стратосферный вихрь начинает формироваться ноябре или раньше и с декабря по январь границы вихря наиболее чёткие. Его устойчивость в этот период проявляется в областях низких температур над Арктикой, при этом в декабре и январе наблюдаются максимальные скорости полярного вихря. В том числе, видно, что вихрь может временно

разрушаться и снова восстанавливаться, как в 2019 и 2021 годах, а так же и полностью разрушиться в конце зимы, как в феврале 2018 года. Как видно из среднемесячных значений зонального ветра и температуры, арктический вихрь имеет вытянутую форму. Таким образом, как видно из рисунков вихрь начинает формироваться в середине–конце осени. Северный полярный вихрь достигает максимальных скоростей в середине зимы и в период с конца зимы по весну ослабляется и разрушается. Продолжительность существования арктического полярного вихря достигает 4-5 месяцев.

2017-
2018
Ноябрь

Температура

Зональный ветер

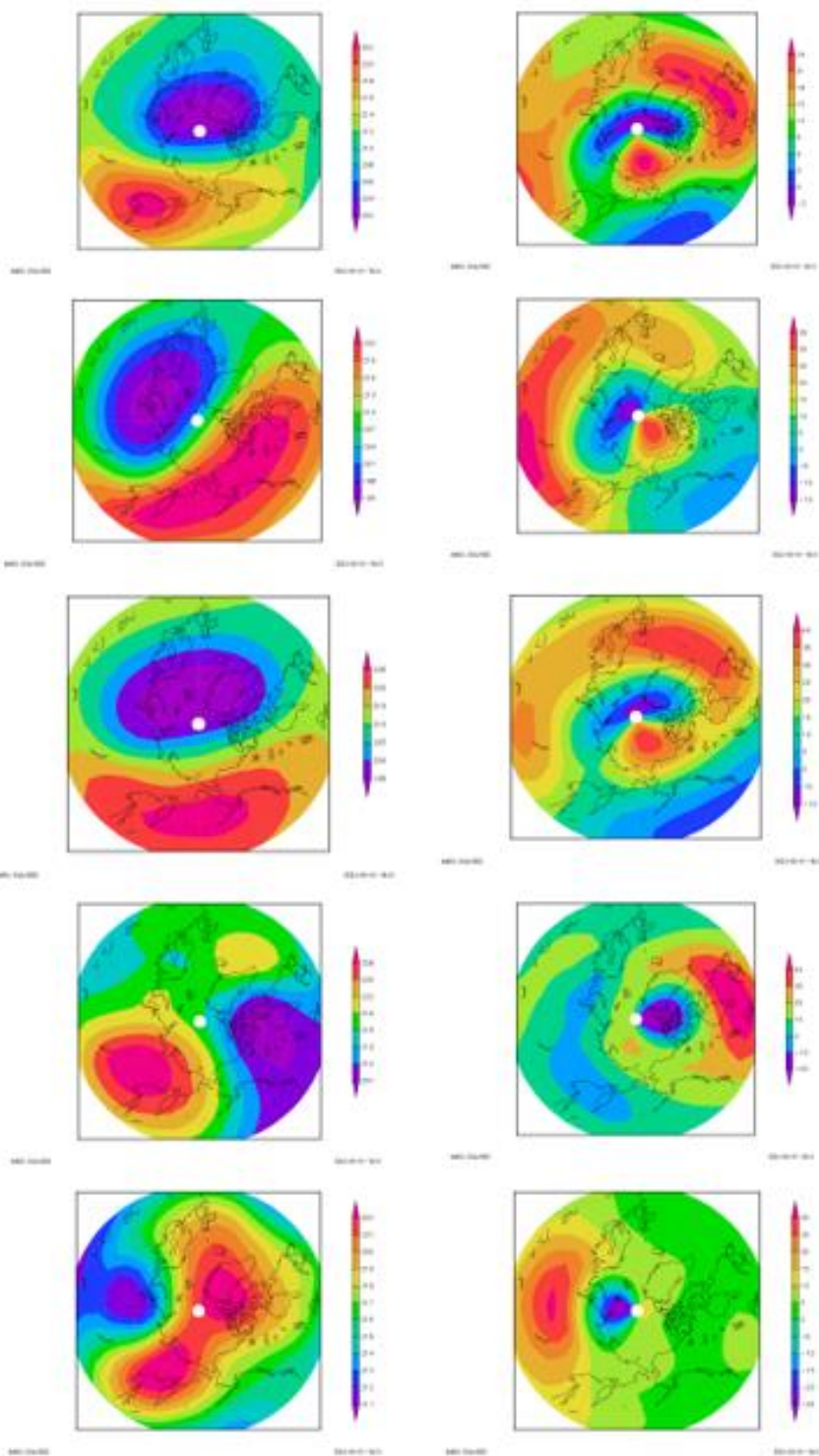


Рис. 1. Среднемесячные поля зонального ветра и температуры на уровне 30 гПас ноября по март над Арктикой. В 2017-2018 годах.

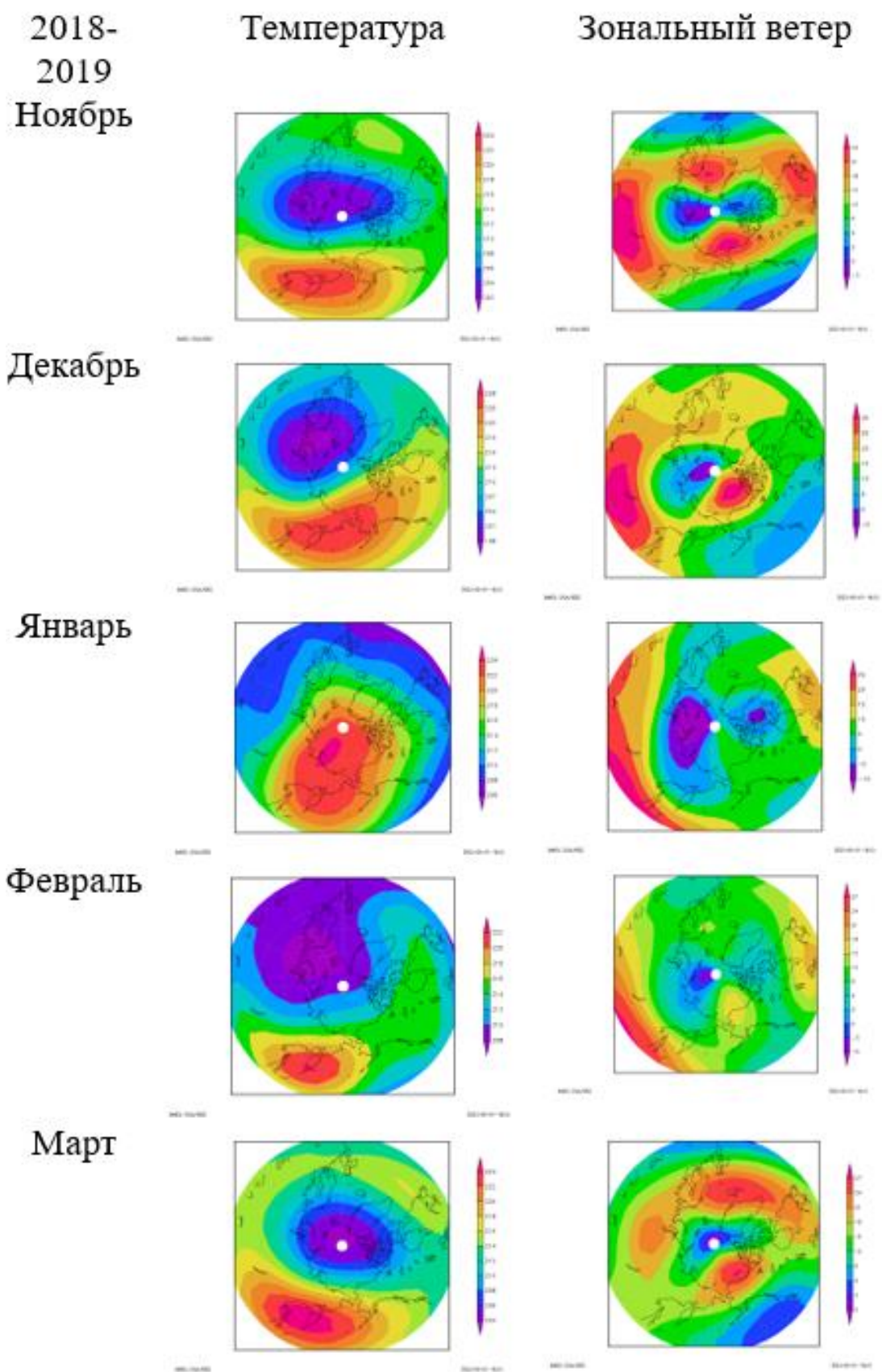


Рис. 2. Среднемесячные поля зонального ветра и температуры на уровне 30 гПас ноября по март над Арктикой. В 2018-2019 годах.

2019-
2020
Ноябрь

Температура

Зональный ветер

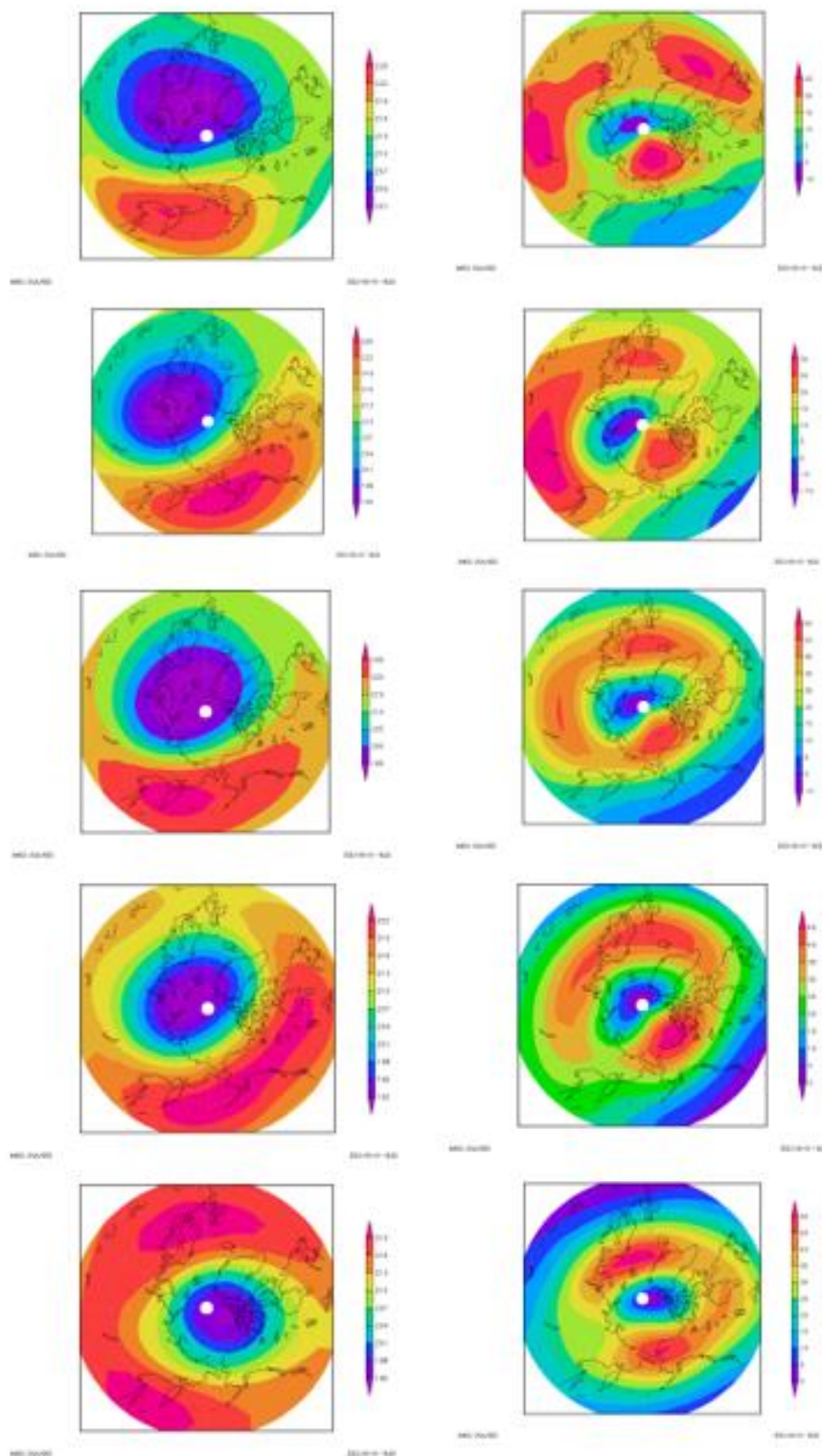
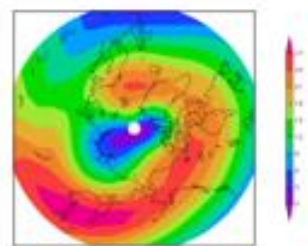
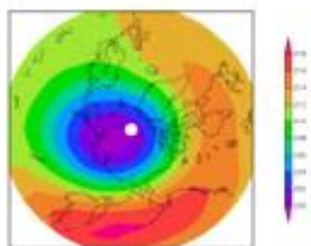


Рис. 3. Среднемесячные поля зонального ветра и температуры на уровне 30 гПас ноября по март над Арктикой. В 2019-2020 годах.

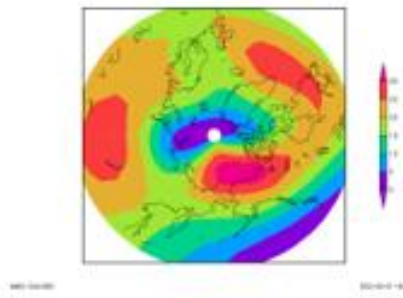
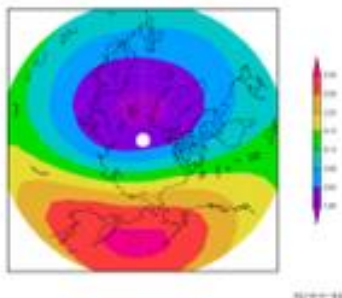
2020-
2021
Ноябрь

Температура

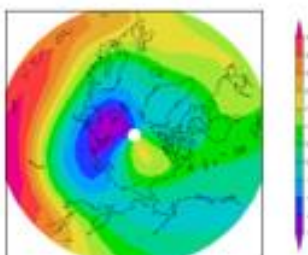
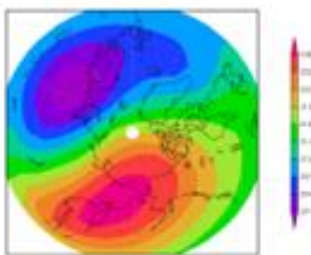
Зональный ветер



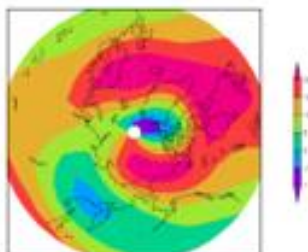
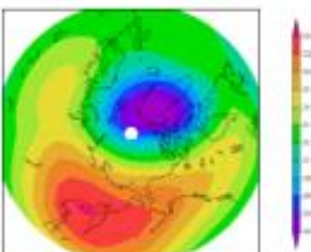
Декабрь



Январь



Февраль



Март

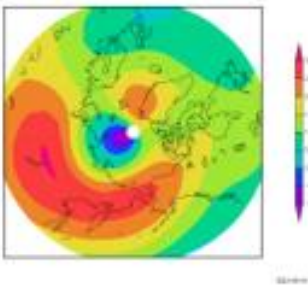
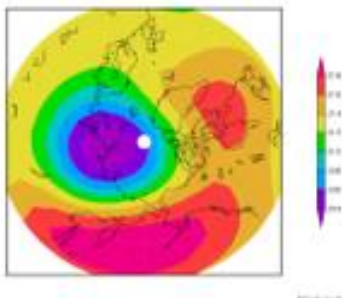


Рис. 4. Среднемесячные поля зонального ветра и температуры на уровне 30 гПа с ноября по март над Арктикой. В 2020-2021 годах.

2021-
2022
Ноябрь

Температура

Зональный ветер

Декабрь

Январь

Февраль

Март

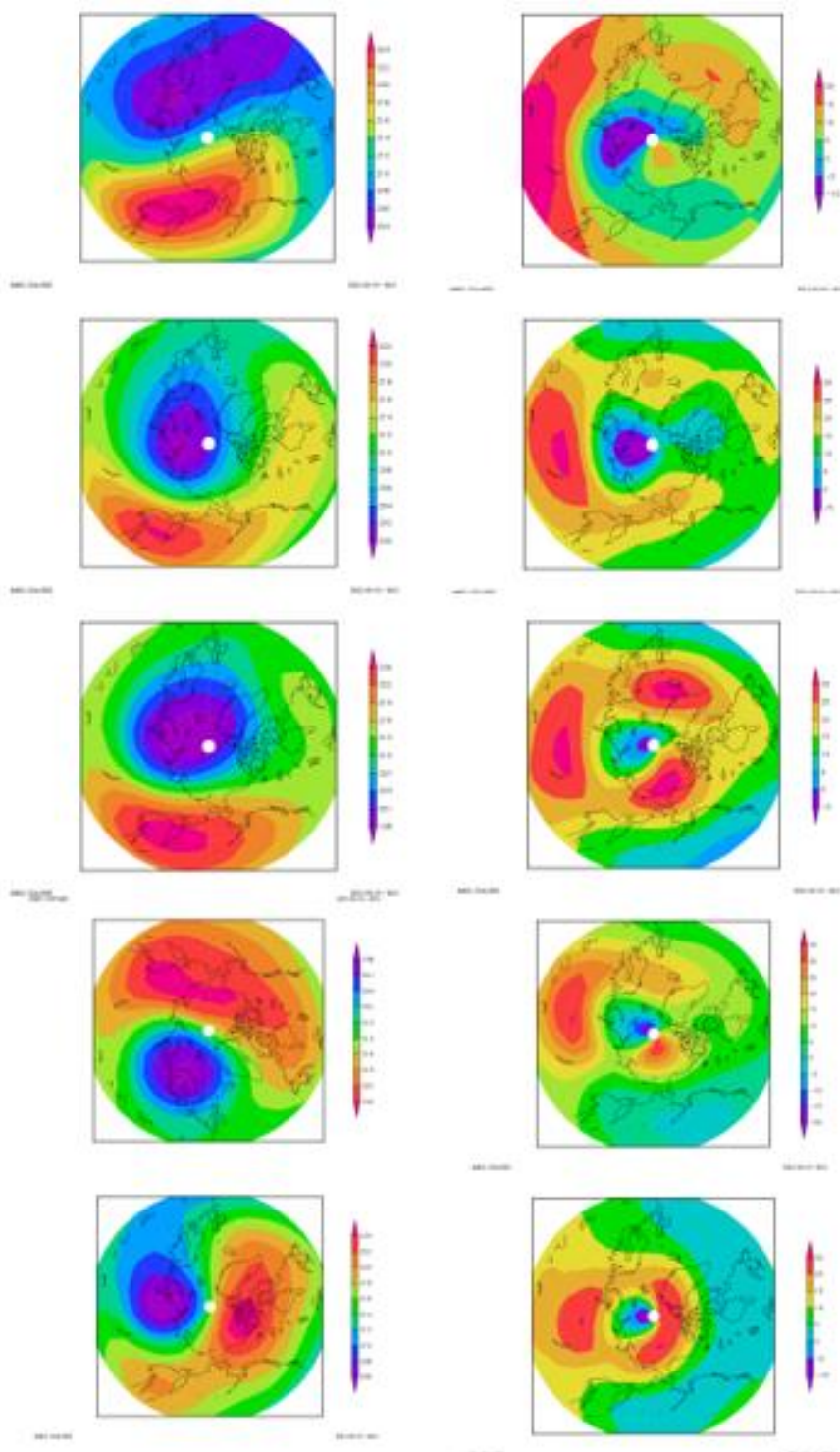


Рис. 5. Среднемесячные поля зонального ветра и температуры на уровне 30 гПас ноября по март над Арктикой. В 2021-2022 годах.

На рис.6.1 и рис. 6.2 представлены внутригодовые изменения скорости зонального ветра на 60° с.ш. и средней температуры в области 87° с.ш. на уровнях 15, 20, 25, 30 и 35 гПа, полученный по данным реанализа MERRA2. Согласно усреднённым значениям скорости зонального ветра на 60° с.ш. максимум скорости арктического полярного вихря проявляется в конце февраля, середине марта 2022 года и в конце января, начале марта 2020 года.

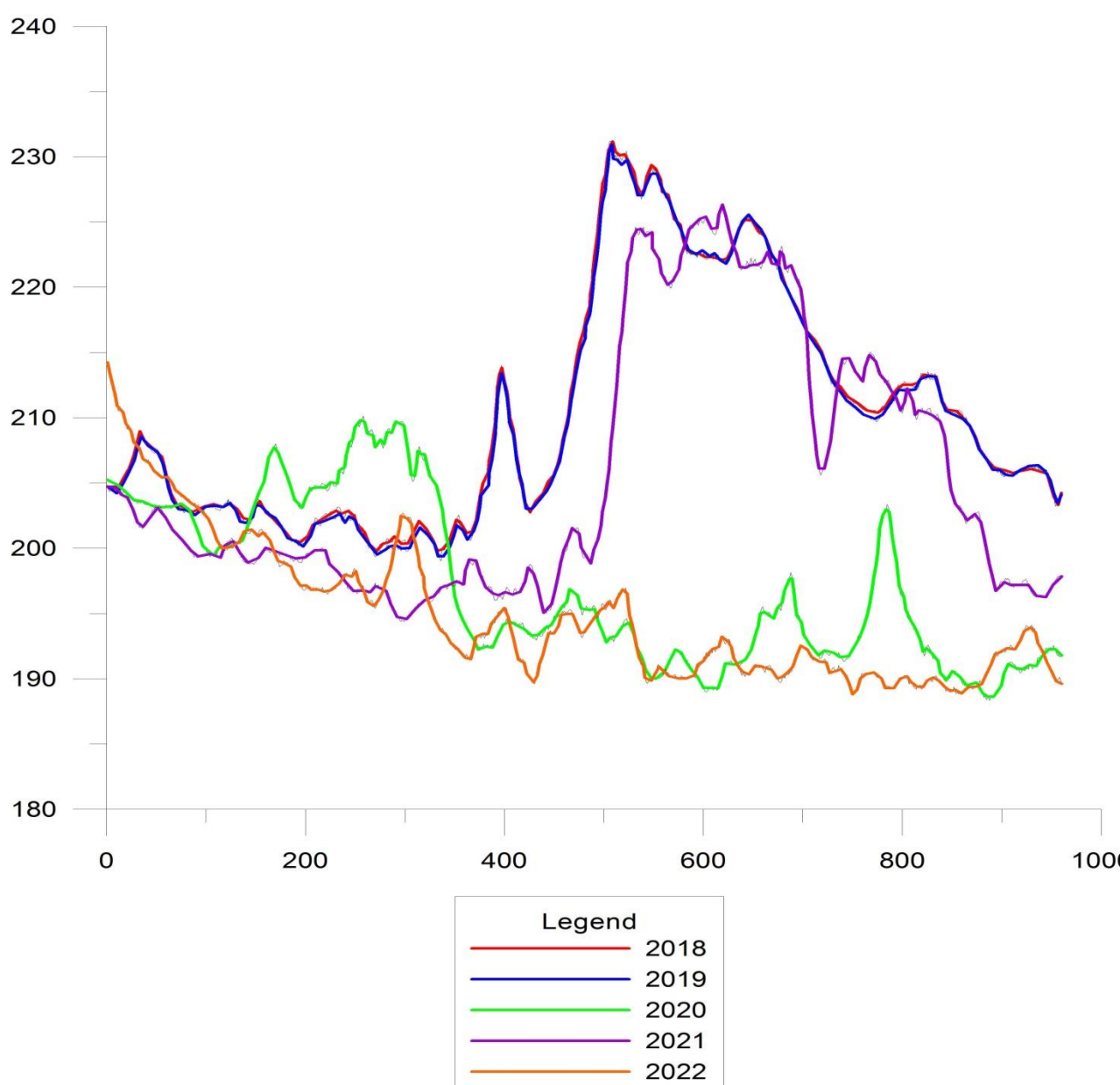


Рис. 6.1. Внутригодовой ход температуры на 87° с.ш. на уровнях 15, 20, 25, 30 и 35 гПа в среднем за 2018-2022 гг. Вертикальные линии соединяют сезонные максимумы температуры с осью времени.

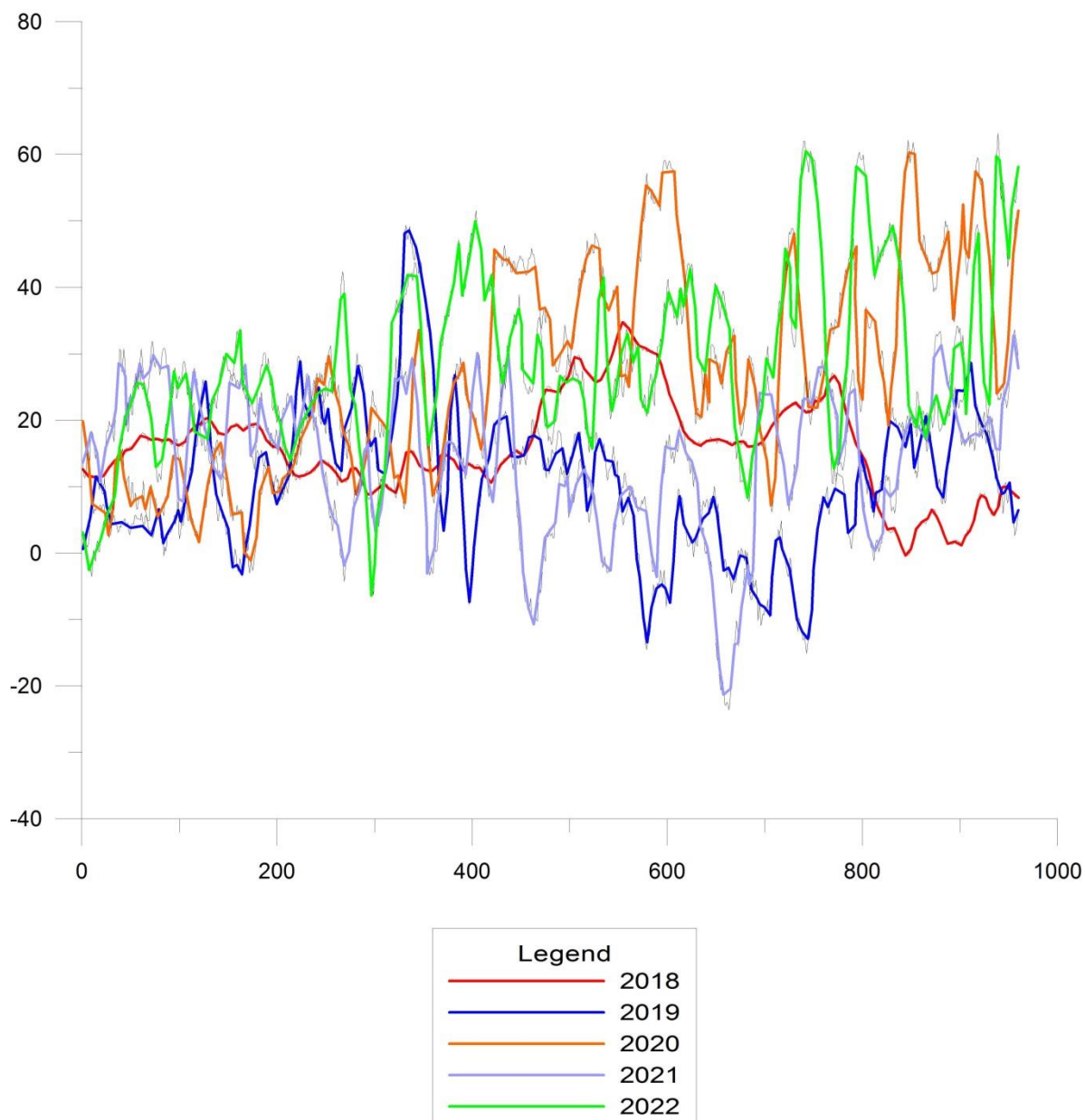
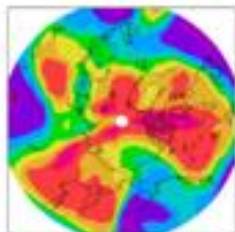


Рис. 6.2. Внутригодовой ход скорости зонального ветра на 60° с.ш. на уровнях 15, 20, 25, 30 и 35 гПа в среднем за 2018-2022 гг. (справа). Вертикальные линии соединяют сезонные максимумы скорости зонального ветра с осью времени.

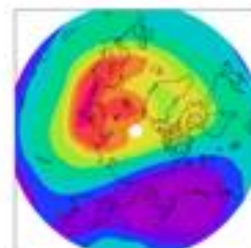
На рисунках 7-11 представлены средне осреднённые поля геопотенциала за январь с 2018 по 2022 года на уровнях 10, 20, 30, 40 и 50 гПа полученные по данным реанализа MERRA2. Как видно из рисунков, границы полярного стратосферного вихря лучше всего заметны на уровнях с 30 по 50 гПа.

2018

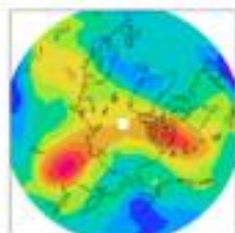
10
гПа



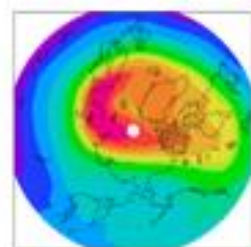
40
гПа



20
гПа



50
гПа



30
гПа

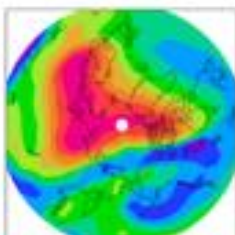
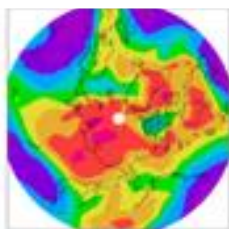


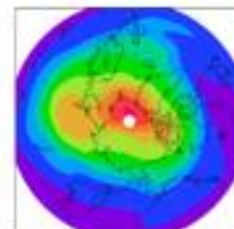
Рис. 7. Среднемесячные поля коэффициента завихрённости с ноября по март над Арктикой. В 2017-2018 годах.

2019

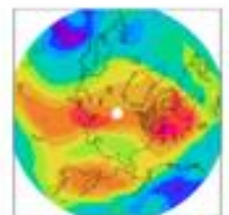
10
гПа



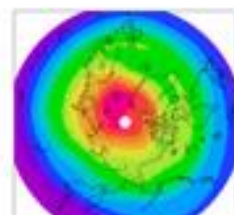
40
гПа



20
гПа



50
гПа



30
гПа

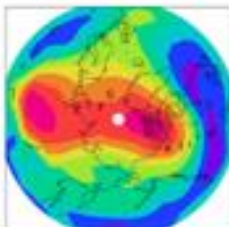
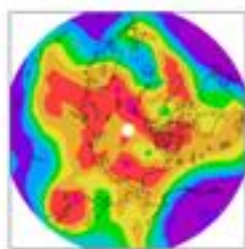


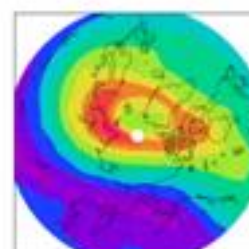
Рис. 8. Среднемесячные поля коэффициента завихрённости с ноября по март над Арктикой. В 2018-2019 годах.

2020

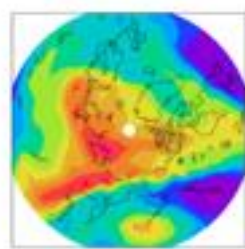
10
гПа



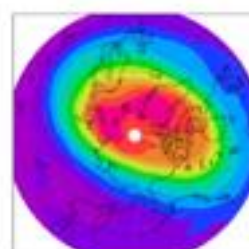
40
гПа



20
гПа



50
гПа



30
гПа

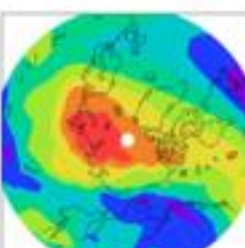
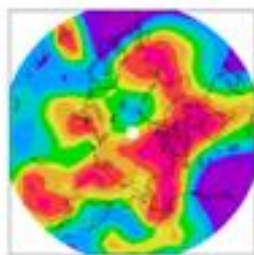


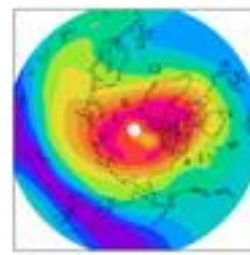
Рис. 9. Среднемесячные поля коэффициента завихрённости с ноября по март над Арктикой. В 2019-2020 годах.

2021

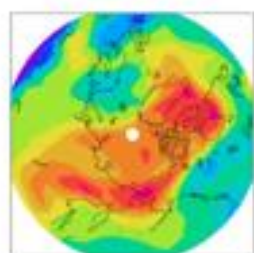
10
гПа



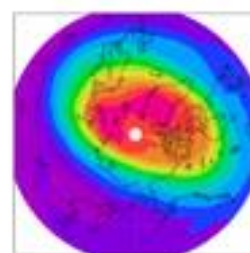
40
гПа



20
гПа



50
гПа



30
гПа

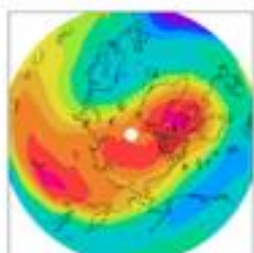


Рис. 10. Среднемесячные поля коэффициента завихрённости с ноября по март над Арктикой. В 2020-2021 годах.

2022

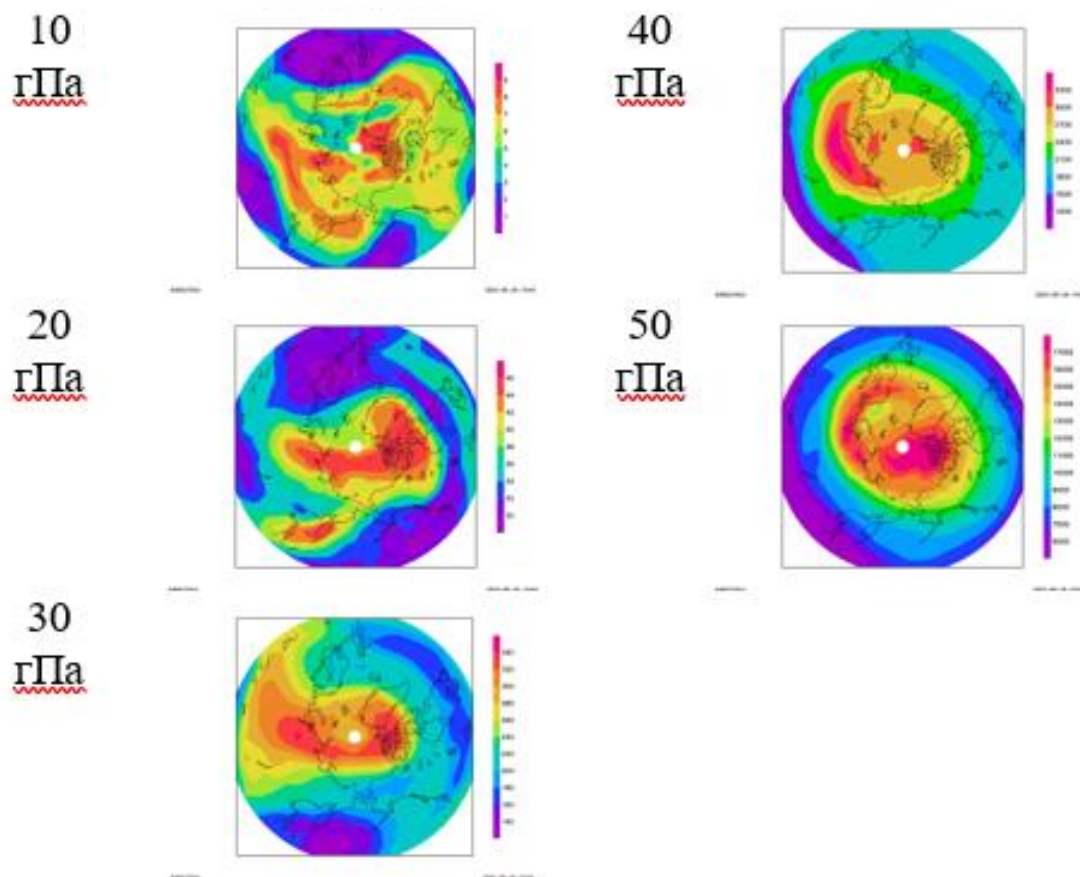


Рис. 11. Среднемесечные поля коэффициента завихрённости с ноября по март над Арктикой. В 2021-2022 годах.

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1 Результат моделирования МСВА

Далее в ходе работы, были выбраны года для запуска МСВА. 2018, 2019 и 2021 года как года, когда полярный стратосферный вихрь был неустойчивым, 2020 и 2022 года устойчивый, соответственно.

Из базы данных были выбраны данные реанализа и загружены в модель.

Визуализированный результат модели устойчивого вихря:

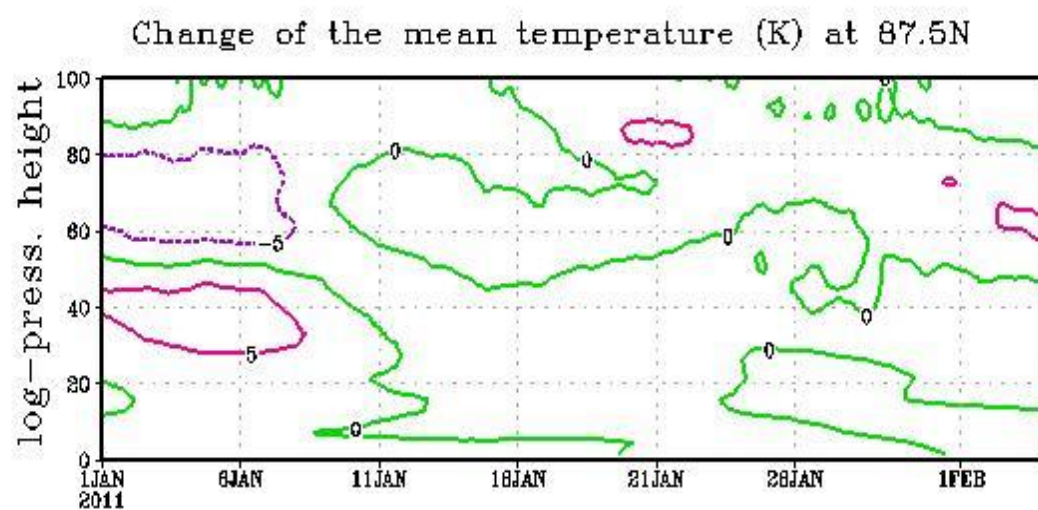
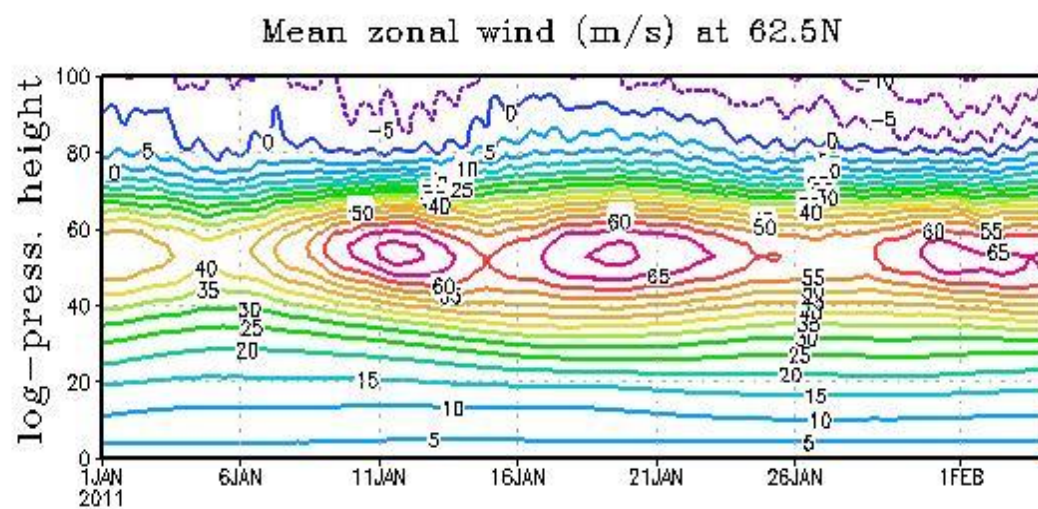


Рис.12. Сверху отображено среднемесячное поле зонального ветра на $62,5^\circ$ с.ш. по высотам. Снизу отображено среднемесячное поле температуры на $87,5^\circ$ с.ш.

Визуализированный результат модели неустойчивого вихря:

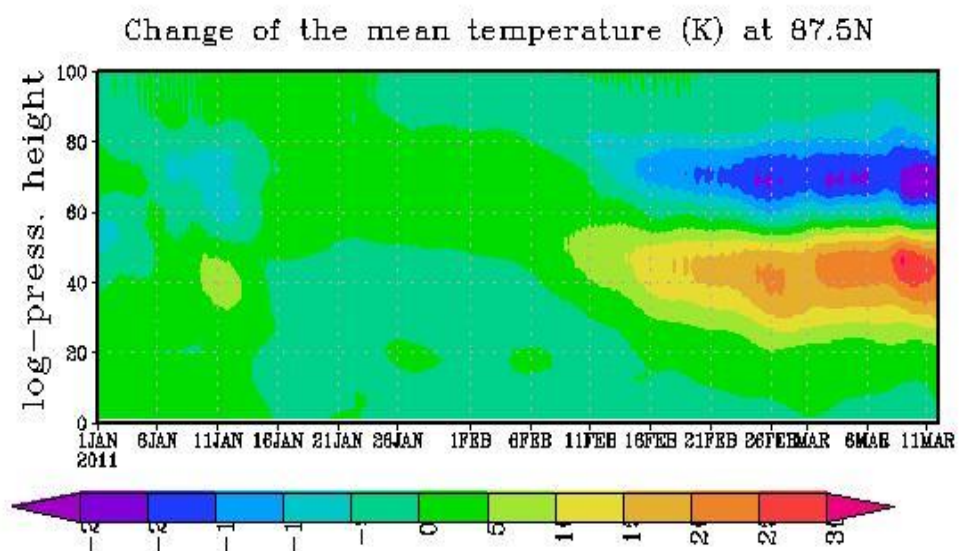
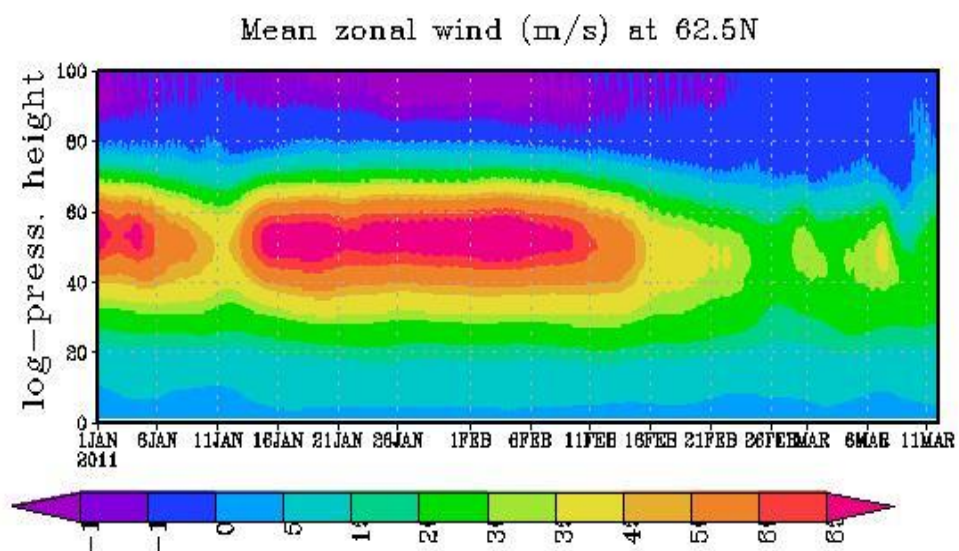


Рис.13. Сверху отображено среднемесячное поле зонального ветра на $62,5^\circ$ с.ш. по высотам. Снизу отображено среднемесячное поле температуры на $87,5^\circ$ с.ш в Кельвинах.

3.2 Сравнение данных реанализа и моделирования МСВА

На рис. 14-15 представлены среднемесячные поля скорости зонального ветра и температуры на уровне 30 гПа над Арктикой за январь, полученные по данным МСВА. Анализируя рисунки, можно увидеть устойчивый полярный циклон.

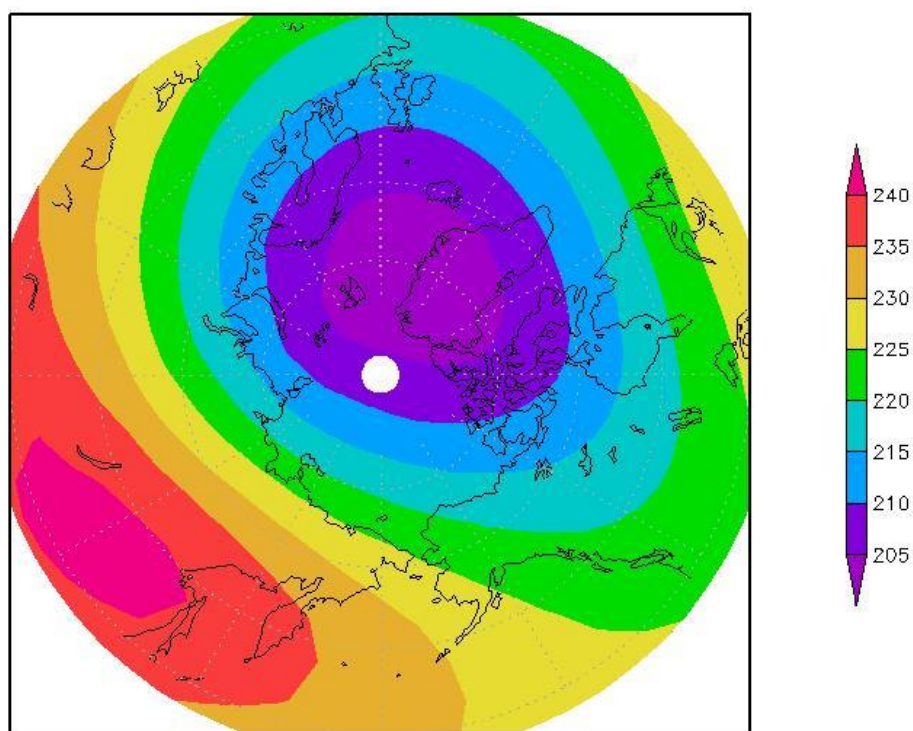
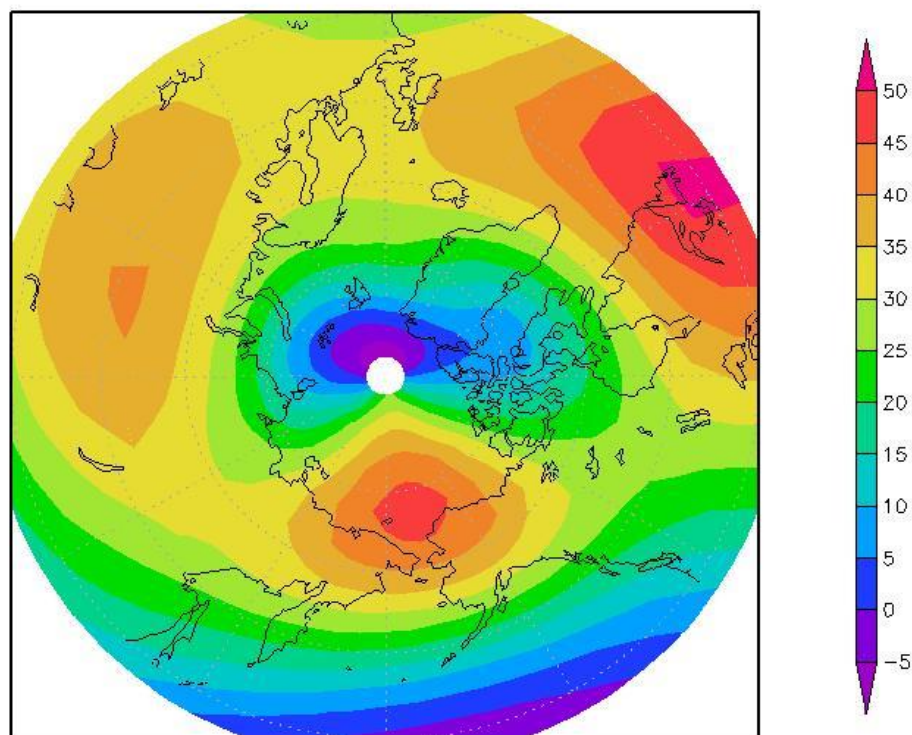


Рис.14. Среднемесячное поле температуры на уровне 30 гПа в январе над Арктикой, построенное по данным МСВА.



GrADS: COLA/IGES

2023-06-08-13:50

Рис.15. Среднемесячное поле зонального ветра на уровне 30 гПа в январе над Арктикой, построенное по данным МСВА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все представленные в работе результаты были получены на общедоступном фактическом материале с использованием стандартных методов анализа и могут воспроизводиться другими исследователями. Достоверность предложенного метода подтверждается хорошим согласием рассчитанных характеристик с данными наблюдений. Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием с результатами других авторов, внутренней согласованностью результатов. Научная и практическая ценность работы состоит в получении фактов и закономерностей, описывающих динамику стратосферных полярных вихрей.

Основные выводы:

Высокая устойчивость и сила арктического полярного вихря зимой и его ежегодное зимнее усиление обусловлены влиянием сезонного хода температуры нижней субтропической стратосферы, где наблюдаются постепенный спад, начиная с октября и максимум в апреле.

При снижении площади полярного вихря менее 10 млн. км² и последующем уменьшении средней скорости ветра по границе вихря ниже 30 и 45 м/с соответственно в нижней и средней стратосфере, полярный вихрь становится небольшим циклоном (с существенно более высокими температурами и отсутствием динамического барьера) и разрушается в пределах 3-х недель.

Для более точного анализа следует брать гораздо больший размах времени, чем 5 лет, учитывать индекс вулканической активности и изменчивость аномалий Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

Автором использован метод оценки основных параметров стратосферных полярных вихрей, основанный на их оконтуривании.

Постановка цели и задач работы, разработка методов решения поставленных задач, поиск и математическая обработка данных наблюдений, получение первичных результатов по теме работы выполнены лично автором. Результаты исследований обсуждались и анализировались совместно с научным преподавателем Еленой Николаевной Савенковой, доцентом кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского Государственного Гидрометеорологического Университета.

ИСТОЧНИКИ

1. Waugh, D.W. Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics / D.W. Waugh, W.J. Randel // *J. Atmos. Sci.* – 1999. – V. 56, N 11. – P. 1594–1613.
2. Waugh, D.W. Stratospheric polar vortices / D.W. Waugh, L.M. Polvani // *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophysical Monograph Series.* – 2010. – V. 190. – P. 43–57.
3. Waugh, D.W. What is the polar vortex and how does it influence weather? / D.W. Waugh, A.H. Sobel, L.M. Polvani // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* – 2017. – V. 98, N 1. – P. 37–44.
4. Scherhag, R. Neue Methoden der Wetteranalyse und Wetterprognose / R. Scherhag. – Berlin: Springer, 1948. – 424 p.
5. Gutenberg, B. New data on the lower stratosphere / B. Gutenberg // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* – 1949. – V. 30, N 2. – P. 62–64.
6. Brasefield, C.J. Winds and temperatures in the lower stratosphere / C.J. Brasefield // *J. Meteor.* – 1950. – V. 7, N 1. – P. 66–69.
7. Palmer, C.E. The stratospheric polar vortex in winter / C.E. Palmer // *J. Geophys. Res.* – 1959. – V. 64, N 7. – P. 749–764.
8. Solomon, S. On the depletion of Antarctic ozone / S. Solomon, R.R. Garcia,
9. F.S. Rowland, D.J. Wuebbles // *Nature.* – 1986. – V. 321. – P. 755–758.
10. Solomon, S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history / S. Solomon // *Rev. Geophys.* – 1999. – V. 37, N 3. – P. 275–316.
11. Manney, G.L. On the motion of air through the stratospheric polar vortex / G.L. Manney, R.W. Zurek // *J. Atmos. Sci.* – 1994. – V. 51, N 20. – P. 2973–2994.
12. Sobel, A.H. Methods of calculating transport across the polar vortex edge / A.H. Sobel, R.A. Plumb, D.W. Waugh // *J. Atmos. Sci.* – 1997. – V. 54, N 18. – P. 2241–2260.
13. Finlayson-Pitts, B.J. Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications / B.J. Finlayson-Pitts, J.N. Pitts. – California: Academic Press, 2000. – 969 p.
14. Holton, J.R. The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb / J.R. Holton, H.C. Tan // *J. Atmos. Sci.* – 1980. – V. 37, N 10. – P. 2200–2208.
15. Driscoll, S. Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5) simulations of climate following volcanic eruptions / S. Driscoll, A. Bozzo, L.J. Gray, A. Robock, G. Stenchikov // *J. Geophys. Res.* – 2012. – V. 117, N 17. – P. D17105.
16. Stenchikov, G. Arctic Oscillation response to the 1991 Mount Pinatubo eruption: Effects of volcanic aerosols and ozone depletion / G. Stenchikov, A. Robock, V. Ramaswamy, M.D. Schwarzkopf, K. Hamilton, S. Ramachandran // *J. Geophys. Res.* – 2002. – V. 107, N 24. – P. ACL28.
17. Козельцева, В.Ф. Весенняя перестройка циркуляции стратосферы и устойчивый переход температуры воздуха через 0 °C, +5 °C весной / В.Ф. Козельцева, А.М. Алешина, Н.Н. Кузнецова // *Труды Гидрометцентра России.* – 2015. – No 353. – С. 88–108.
18. Зуев, В.В. Динамика стратосферных полярных вихрей / В.В. Зуев, Е.С. Савельева. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2020. – 115 с.
19. Newman, P.A. Chemistry and dynamics of the Antarctic ozone hole / P.A. Newman // *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophysical Monograph Series.* – 2010. – V. 190. – P. 157–171.
20. Young, P.J. Changes in stratospheric temperatures and their implications for changes in the Brewer–Dobson circulation, 1979–2005 / P.J. Young, K.H. Rosenlof, S. Solomon, S.C. Sherwood, Q. Fu, J.-F. Lamarque // *J. Climate.* – 2012. – V. 25, N 5. – P. 1759–1772.
21. Conway, J. Bifurcation of potential vorticity gradients across the Southern Hemisphere stratospheric polar vortex / J. Conway, G. Bodeker, C. Cameron // *Atmos.*

- Chem. Phys. – 2018. – V. 18, N 11. – P. 8065–8077.
22. Grooß, J.-U. The impact of transport across the polar vortex edge on Match ozone loss estimates / J.-U. Grooß, R. Müller, P. Konopka, H.-M. Steinhorst, A. Engel, T. Möbius, C.M. Volk // *Atmos. Chem. Phys.* – 2008. – V. 8, N 3. P. 565–578.
23. De la Cámara, A. Polar night vortex breakdown and large-scale stirring in the southern stratosphere / A. de la Cámara, C.R. Mechoso, K. Ide, R. Walterscheid, G. Schubert // *Clim. Dynam.* – 2010. – V. 35, N 6. – P. 965–975.
24. Holton, J. An Introduction to Dynamic Meteorology. 4th Edition / J. Holton. – California: Academic Press, 2004. – 535 p.
25. Butler, A.H. Defining Sudden Stratospheric Warmings / A.H. Butler, D.J. Seidel, S.C. Hardiman, N. Butchart, T. Birner, A. Match // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* – 2015. – V. 96, N 11. – P. 1913–1928.
26. Боровко, И.В. Влияние динамики стратосферного полярного вихря на циркуляцию в нижней тропосфере / И.В. Боровко, В.Н. Крупчатников // *Сиб. журн. вычисл. матем.* – 2009. – Т. 12, No 2. – С. 145–160.
27. Kim, B.-M. Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss / B.-M. Kim, S.-W. Son, S.-K. Min, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, X. Zhang, T. Shim, J.-H. Yoon // *Nat. Commun.* – 2014. – V. 5. – P. 4646.
28. Hoshi, K. Poleward eddy heat flux anomalies associated with recent Arctic sea ice loss / K. Hoshi, J. Ukita, M. Honda, K. Iwamoto, T. Nakamura, K. Yamazaki, K. Dethloff, R. Jaiser, D. Handorf // *Geophys. Res. Lett.* – 2017. – V. 44, N 1. – P. 446–454.
29. Polvani, L.M. Upward wave activity flux as a precursor to extreme stratospheric events and subsequent anomalous surface weather regimes / L.M. Polvani, D.W. Waugh // *J. Climate.* – 2004. – V. 17, N 18. – P. 3548–3554.
30. Zuev, V.V. Dynamics of the Arctic polar vortex during the 1984/1985 sudden stratospheric warming / V.V. Zuev, E.S. Savelieva // *IOP Conf. Series: Earth Env. Sci.* – 2019. – V. 386. – P. 12010.
31. Zuev, V.V. Sudden stratospheric warming effects during the winter 1998/1999 / V.V. Zuev, E.S. Savelieva // *Proc. SPIE.* – 2019. – V. 11208. – P. 112086F.
32. Zuev, V.V. Influence of the upward wave activity flux in the winter 2012/2013 on the Arctic polar vortex / V.V. Zuev, E.S. Savelieva // *Proc. SPIE.* – 2019. – V. 11208. – P. 112088M.
33. Harvey, V.L. A climatology of stratospheric polar vortices and anticyclones / V.L. Harvey, R.B. Pierce, T.D. Fairlie, M.H. Hitchman // *J. Geophys. Res.* – 2002. – V. 107, N 20. – P. ACL10.
34. Stohl, A. Stratosphere-troposphere exchange: A review, and what we have learned from STACCATO / A. Stohl, P. Bonasoni, P. Cristofanelli, W. Collins, J. Feichter, A. Frank, C. Forster, E. Gerasopoulos, H. Gaggeler, P. James, T. Kentarchos, H. Kromp-Kolb, B. Krüger, C. Land, J. Meloen, A. Papayannis, A. Priller, P. Seibert, M. Sprenger, G.J. Roelofs, H.E. Scheel, C. Schnabel, P. Siegmund, L. Tobler, T. Trickl, H. Wernli, V. Wirth, P. Zanis, C. Zerefos // *J. Geophys. Res.* – 2003. – V. 108, N 12. – P. 8516.
35. Иванова, А.Р. Стратосферно-тропосферный обмен и его некоторые особенности во внетропических широтах / А.Р. Иванова // *Метеорология и гидрология.* – 2016. – No 3. – С. 22–45.
36. Зуев, В.В. Лазерное зондирование средней атмосферы / В.В. Зуев, А.В. Ельников, В.Д. Бурлаков / Под ред. чл.-корр. РАН В.В. Зуева. – Томск: РАСКО, 2002. – 352 с.
37. Mohanakumar, K. Stratosphere Troposphere Interactions: An Introduction / K. Mohanakumar. – Netherlands: Springer, 2008. – 424 p.
38. Zuev, V.V. Influence of the stratospheric polar vortex on the tropospheric vortex dynamics in winter / V.V. Zuev, N.E. Zueva, E.S. Savelieva // *Proc. SPIE.* – 2020. – V. 11560. – P. 115607P.

39. Zuev, V.V. Influence of the stratospheric polar vortex on the Barents Sea ice extent in early 2012 / V.V. Zuev, E.S. Savelieva // IOP Conf. Series: Earth Env. Sci. – 2019. – V. 386. – P. 12002.
40. Savelieva, E. Possible influence of the tropospheric polar vortex on the Barents Sea ice extent in winter / E. Savelieva // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2020. – V. 197. – P. 105173.
41. Limpasuvan, V. Stratosphere-troposphere evolution during polar vortex intensification / V. Limpasuvan, D.L. Hartmann, D.W.J. Thompson, K. Jeev, Y.L. Yung // J. Geophys. Res. – 2005. – V. 110, N 24. – P. D24101.
42. Zhou, S. An inter-hemisphere comparison of the persistent stratospheric polar vortex / S. Zhou, M.E. Gelman, A.J. Miller, J.P. McCormack // Geophys. Res. Lett. – 2000. – V. 27, N 8. – P. 1123–1126.
43. Waugh, D.W. Interannual variability in the decay of lower stratospheric Arctic vortices / D.W. Waugh, P.-P. Rong // J. Meteorol. Soc. Jpn. – 2002. – V. 80, N 4. – P. 997–1012.
44. Burnett, A.W. Interannual variations in the Southern Hemisphere winter circumpolar vortex: Relationships with the semiannual oscillation / A.W. Burnett, A.R. McNicoll // J. Climate. – 2000. – V. 13, N 5. – P. 991–999.
45. Díaz-Durán, A. Intra-seasonal variability of extreme boreal stratospheric polar vortex events and their precursors / A. Díaz-Durán, E. Serrano, B. Ayarzagüena, M. Abalos, A. de la Cámara // Clim. Dynam. – 2017. – V. 49, N 9–10. – P. 3473–3491.
46. Waugh, D.W. Persistence of the lower stratospheric polar vortices / D.W. Waugh, W.J. Randel, S. Pawson, P.A. Newman, E.R. Nash // J. Geophys. Res. – 1999. – V. 104, N 22. – P. 27191–27201.
47. Ren, R. Polar vortex oscillation viewed in an isentropic potential vorticity coordinate / R. Ren, M. Cai // Adv. Atmos. Sci. – 2006. – V. 23, N 6. – P. 884–900.
48. Зоркальцева, О.С. Динамика среднезональных характеристик циркуляции в средней атмосфере / О.С. Зоркальцева, В.И. Мордвинов, А.И. Погорельцев, Н.С. Домбровская // Известия РАН, ФАО. – 2020. – Т. 56, № 4. – С. 433–445.
49. Гаврилов, Н.М. Численное моделирование волновых взаимодействий во время внезапного стратосферного потепления / Н.М. Гаврилов, А.В. Коваль, А.И. Погорельцев, Е.Н. Савенкова // Известия РАН, ФАО. – 2017. – Т. 53, № 6. – С. 674–685.
50. Савенкова, Е.Н. Статистическая неравномерность дат внезапных стратосферных потеплений в зимнем Северном полушарии / Е.Н. Савенкова, Н.М. Гаврилов, А.И. Погорельцев, Р.О. Мануйлова // Известия РАН, ФАО. – 2017. – № 3. – С. 287–295.
51. Агеева, В.Ю. Внезапные стратосферные потепления: статистические характеристики и влияние на общее содержание NO₂ и O₃ / В.Ю. Агеева, А.Н. Груздев, А.С. Елохов, И.И. Мохов, Н.Е. Зуева // Известия РАН, ФАО. – 2017. – Т. 53, № 5. – С. 545–555.
52. Lefèvre, F. The 1997 Arctic Ozone depletion quantified from three dimensional model simulations / F. Lefèvre, F. Figarol, K.S. Carslaw, T. Peter // Geophys. Res. Lett. – 1998. – V. 25, N 13. – P. 2425–2428.
53. Müller, R. HALOE observations of the vertical structure of chemical ozone depletion in the Arctic vortex during winter and early spring 1996–1997 / R. Müller, J.-U. Grooß, D.S. McKenna, P.J. Crutzen, C. Brühl, J.M. Russell III, A.F. Tuck // Geophys. Res. Lett. – 1997. – V. 24, N 22. – P. 2717–2720.
54. Newman, P.A. Anomalous low ozone over the Arctic / P.A. Newman, J.F. Gleason, R.D. McPeters, R.S. Stolarski // Geophys. Res. Lett. – 1997. – V. 24, N 22. – P. 2689–2692.
55. Sinnhuber, B.-M. Ground based millimeter-wave observations of Arctic ozone

- depletion during winter and spring of 1996/97 / B.-M. Sinnhuber, J. Langer, U. Klein, U. Raffalski, K. Künzi, O. Schrems // *Geophys. Res. Lett.* – 1998. – V. 25, N 17. – P. 3327–3330
56. Wang, H. First simulations with a whole atmosphere data assimilation and forecast system: The January 2009 major sudden stratospheric warming / H. Wang, T.J. Fuller-Rowell, R.A. Akmaev, M. Hu, D.T. Kleist, M.D. Iredell // *J. Geophys. Res.* – 2011. – V. 116, N 12. – P. A12321.
 57. Yue, X. Global ionospheric response observed by COSMIC satellites during the January 2009 stratospheric sudden warming event / X. Yue, W.S. Schreiner, J. Lei, C. Rocken, D.C. Hunt, Y.-H. Kuo, W. Wan // *J. Geophys. Res.* – 2010. – V. 115, N 11. – P. A00G09.
 58. Klimenko, M.V. Ionospheric effects of the sudden stratospheric warming in 2009: Results of simulation with the first version of the EAGLE model / M.V. Klimenko, F.S. Bessarab, T.V. Sukhodolov, V.V. Klimenko, Yu.N. Koren'kov, I.E. Zakharenkova, N.V. Chirik, P.A. Vasil'ev, D.V. Kulyamin, Kh. Shmidt, B. Funke, E.V. Rozanov // *Russ. J. Phys. Chem. B.* – 2018. – V. 12, N 4. – P. 760–770.
 59. Salmi, S.-M. Mesosphere-to-stratosphere descent of odd nitrogen in February–March 2009 after sudden stratospheric warming / S.-M. Salmi, P.T. Verronen, L. Thölix, E. Kyrölä, L. Backman, A.Yu. Karpechko, A. Seppälä // *Atmos. Chem. Phys.* – 2011. – V. 11, N 10. – P. 4645–4655.
 60. Langematz, U. An update on dynamical changes in the Arctic and Antarctic stratospheric polar vortices / U. Langematz, M. Kunze // *Clim. Dynam.* – 2006. – V. 27, N 6. – P. 647–660.
 61. France, J.A. A climatology of stratopause temperature and height in the polar vortex and anticyclones / J.A. France, V.L. Harvey, C.E. Randall, M.H. Hitchman, M.J. Schwartz // *J. Geophys. Res.* – 2012. – V. 117, N 6. – P. D06116.
 62. Manney, G.L. The high Arctic in extreme winters: vortex, temperature, and MLS and ACE-FTS trace gas evolution / G.L. Manney, W.H. Daffer, K.B. Strawbridge, K.A. Walker, C.D. Boone, P.F. Bernath, T. Kerzenmacher, M.J. Schwartz, K. Strong, R.J. Sica, K. Krüger, H.C. Pumphrey, A. Lambert, M.L. Santee, N.J. Livesey, E.E. Remsberg, M.G. Mlynchzak, J.R. Russell // *Atmos. Chem. Phys.* – 2008. – V. 8, N 3. – P. 505–522.
 63. Gimeno, L. A new diagnostic of stratospheric polar vortices / L. Gimeno, L. la Torre, R. Nieto, D. Gallego, P. Ribera, R. García-Herrera // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 2007. – V. 69, N 15. – P. 1797–1812.
 64. Криволуцкий, А.А. Незональная структура отклика глобального поля температуры атмосферы Земли на солнечную активность / А.А. Криволуцкий, А.В. Дементьева // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2017. – Т. 57, No 1. – С. 116–122.
 65. Zuev, V.V. Temperature variability in the upper polar stratosphere depending on the polar vortex strength / V.V. Zuev, N.E. Zueva, E.S. Savelieva, A.V. Pavlinskiy // *Proc. SPIE.* – 2020. – V. 11560. – P. 115607R.
 66. Manney, G.L. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 / G.L. Manney, M.L. Santee, M. Rex, N.J. Livesey, M.C. Pitts, P. Veefkind, E.R. Nash, I. Wohltmann, R. Lehmann, L. Froidevaux, L.R. Poole, M.R. Schoeberl, D.P. Haffner, J. Davies, V. Dorokhov, H. Gernandt, B. Johnson, R. Kivi, E. Kyro, N. Larsen, P.F. Levelt, A. Makshtas, C.T. McElroy, H. Nakajima, M.C. Parrondo, D.W. Tarasick, P. von der Gathen, K.A. Walker, N.S. Zinoviev // *Nature.* – 2011. – V. 478, N 7370. – P. 469–475.
 67. Kuttippurath, J. Record-breaking ozone loss in the Arctic winter 2010/2011: comparison with 1996/1997 / J. Kuttippurath, S. Godin-Beekmann, F. Lefevre, G. Nikulin, M.L. Santee, L. Froidevaux // *Atmos. Chem. Phys.* – 2012. – V. 12, N 15. – P. 7073–7085.
 68. Evers, L.G. Infrasonic signature of the 2009 major sudden stratospheric warming / L.G. Evers, P. Siegmund // *Geophys. Res. Lett.* – 2009. – V. 36, N 23. – P. L23808.
 69. Fang, T.-W. Longitudinal variation of ionospheric vertical drifts during the 2009

- sudden stratospheric warming / T.-W. Fang, T. Fuller-Rowell, R. Akmaev, F. Wu, H. Wang, D. Anderson // *J. Geophys. Res.* – 2012. – V. 117, N 3. – P. A03324.
70. Sridharan, S. Variabilities of mesospheric tides during sudden stratospheric warming events of 2006 and 2009 and their relationship with ozone and water vapour / S. Sridharan, S. Sathishkumar, S. Gurubaran // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 2012. – V. 78–79. – P. 108–115.
71. Yamashita, C. Gravity wave variations during the 2009 stratospheric sudden warming as revealed by ECMWF-T799 and observations / C. Yamashita, H.-L. Liu, X. Chu // *Geophys. Res. Lett.* – 2010. – V. 37, N 22. – P. L22806.
72. Fuller-Rowell, T. Did the January 2009 sudden stratospheric warming cool or warm the thermosphere? / T. Fuller-Rowell, R. Akmaev, F. Wu, M. Fedrizzi, R.A. Viereck, H. Wang // *Geophys. Res. Lett.* – 2011. – V. 38, N 18. – P. L18104.
73. Liu, H. Equatorial electrodynamics and neutral background in the Asian sector during the 2009 stratospheric sudden warming / H. Liu, M. Yamamoto, S.T. Ram, T. Tsugawa, Y. Otsuka, C. Stolle, E. Doornbos, K. Yumoto, T. Nagatsuma // *J. Geophys. Res.* – 2011. – V. 116, N 8. – P. A08308.
74. Lin, J.T. Observational evidence of ionospheric migrating tide modification during the 2009 stratospheric sudden warming / J.T. Lin, C.H. Lin, L.C. Chang, H.H. Huang, J.Y. Liu, A.B. Chen, C.H. Chen, C.H. Liu // *Geophys. Res. Lett.* – 2012. – V. 39, N 2. – P. L02101.
75. Rodrigues, F.S. C/NOFS observations of the equatorial ionospheric electric field response to the 2009 major sudden stratospheric warming event / F.S. Rodrigues, G. Crowley, S.M.I. Azeem, R.A. Heelis // *J. Geophys. Res.* – 2011. – V. 116, N 9. – P. A09316.
76. Thurairajah, B. Gravity wave activity in the Arctic stratosphere and mesosphere during the 2007–2008 and 2008–2009 stratospheric sudden warming events / B. Thurairajah, R.L. Collins, V.L. Harvey, R.S. Lieberman, M. Gerding, K. Mizutani, J.M. Livingston // *J. Geophys. Res.* – 2010. – V. 115. – P. D00N06.
77. Брасье, Г. Аэрономия средней атмосферы. Химия и физика стратосферы и мезосферы / Г. Брасье, С. Соломон. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 414 с.
78. Зуев, В.В. Лидарный контроль стратосферы / В.В. Зуев. – Новосибирск: Наука, 2004. – 307 с.
79. Криволуцкий, А.А. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли / А.А. Криволуцкий, А.И. Репнев. – М.: ГЕОС, 2009. – 384 с.
80. Криволуцкий, А.А. Изменения химического состава в полярных областях Земли после протонных вспышек на Солнце (трехмерное моделирование) А.А. Криволуцкий, Т.Ю. Вьюшкова, И.А. Миронова // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2017. – Т. 57, No 2. – С. 173–194.
81. Криволуцкий, А.А. Результаты российских исследований средней атмосферы в 2015–2018 гг. / А.А. Криволуцкий, А.И. Репнев, И.А. Миронова, А.Н. Груздев, Т.И. Туниянц // *Известия РАН, ФАО*. – 2019. – Т. 55, No 6. – С. 48–65.
82. Тарасова, Н.П. Задачи и вопросы по химии окружающей среды / Н.П. Тарасова, В.А. Кузнецов, Ю.В. Сметанников, А.В. Малков, А.А. Додонова. – Москва: Мир, 2002. – 368 с.