

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи
УДК 551.46 : 551.510

Яковлев Андрей Романович

Влияние долгопериодных и
короткопериодных изменений
температуры поверхности океана на
структуру и состав атмосферы

Специальность: 25.00.30 - Метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук

Санкт-Петербург 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Российский государственный
гидрометеорологический университет»

Научный руководитель: **Смышляев Сергей Павлович,**

Доктор физико-математических наук, профессор
кафедры метеопрогнозов ФГБОУ ВО «Российский
государственный гидрометеорологический
университет»

**Официальные
оппоненты:**

Зубов Владимир Аркадьевич,

Кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник Отдела динамической
метеорологии и климатологии (ОДМК) Главной
Геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова

Грицун Андрей Сергеевич,

Доктор физико-математических наук, заместитель
директора по науке Института вычислительной
математика им. Г.И. Марчука Российской академии
наук

Ведущая организация: ФГБУ «Центральная Аэрологическая Обсерватория»

Защита диссертации состоится «___» _____ 2022 г. в _____ на заседании
диссертационного совета Д.212.197.01 при Российском государственном
гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г., Санкт-Петербург,
Малоохтинский пр., 98.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации,
просим направлять по адресу 192007, Россия, Санкт-Петербург, ул., Воронежская,
дом 79, Российский государственный гидрометеорологический университет,
диссертационный совет Д.212.197.01, Учёному секретарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского
государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан « » _____ 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, доцент

Т.С. Ермакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Нагрев океана приводит к излучению тепла в атмосферу, что оказывает влияние на нагрев приземного воздуха, вертикальные потоки тепла и массы, циркуляцию атмосферы и, следовательно, на погоду, климат и состав атмосферы по всему земному шару, и является актуальным предметом многочисленных научных исследований. Обмен теплом между океаном и атмосферой происходит на пространстве, которое составляет около 70% поверхности планеты и, следовательно, является важным компонентом радиационного баланса атмосферы как регионально, так и в глобальном масштабе. Важной характеристикой нагрева океана является температура поверхности океана (ТПО). Изменения ТПО оказывают существенное влияние на нижнюю тропосферу как прямо в области изменчивости, так и косвенно на удалённые области земного шара за счет влияния на общую циркуляцию атмосферы. В стратосфере изменения ТПО влияют на её структуру и состав за счет воздействия на вертикальные потоки тепла и массы, в свою очередь влияющие на циркуляцию стратосферы. При этом особое значение имеют полярные регионы, так как это воздействие влияет на стратосферный полярный вихрь (СПВ). Устойчивость СПВ определяется зональным ветром. Изменение ТПО воздействует на общую циркуляцию, что ослабляет СПВ, и на волновую активность, что приводит к разрушению СПВ. Воздействие на остаточную циркуляцию усиливает циркуляцию Брюера-Добсона, а усиление волновой активности тормозит зональный ветер, в результате чего усиливается перенос тепла и озона из тропиков в полярную стратосферу, что приводит к повышению температуры и внезапным стратосферным потеплениям, а также увеличению содержания озона в полярной стратосфере.

На структуру и состав атмосферы могут влиять короткопериодные и долгопериодные изменения ТПО. Долгопериодные изменения ТПО характеризуются многолетним трендом ТПО, который наблюдается в среднем по всему земному шару, и оказывает влияние на процессы в атмосфере как локально, так и в удалённых областях. Что касается короткопериодных изменений ТПО, то одно из наиболее значительных изменений – это явление Эль-Ниньо – Ла-Нинья в тропической части Тихого океана, с которым связано атмосферное Южное колебание. Эти процессы могут способствовать усилению потоков тепла в стратосферу, что оказывает влияние на общую циркуляцию и сказывается на устойчивости СПВ, а, следовательно, и на содержании озона в полярных районах, а также могут способствовать усилению потока волновой активности.

На долгопериодные изменения температуры воздуха, помимо тренда ТПО, также оказывает влияние изменения уровня углекислого газа CO_2 . CO_2 представляет собой парниковый газ, который вызывает повышение температуры в нижней тропосфере, и способствует понижению температуры в нижней стратосфере.

На озоновый слой, помимо ТПО, также существенное влияние оказывают изменения в химическом составе, обусловленные естественными и антропогенными загрязнениями стратосферы озоноразрушающими веществами, в том числе содержащими хлор и бром, которые способствуют уменьшению содержания озона.

Для того, чтобы изучать и прогнозировать влияние океанических процессов на тропосферу и стратосферу, необходимо корректно учитывать влияние ТПО на параметры атмосферы, при этом также нужно отделять другие важные факторы (например, CO₂).

Актуальность проблемы заключается в том, что изменения температуры поверхности океана оказывают значимое влияние на структуру и состав атмосферы на разных широтах, особенно в полярных широтах. Эти изменения воздействуют на температуру воздуха и зональную скорость ветра, что оказывает влияние на общую циркуляцию атмосферы и приводит к изменениям в динамических и химических процессах в атмосфере. Несмотря на то, что многие моменты влияния изменений ТПО на атмосферные процессы достаточно точно исследованы, есть много других моментов, которые нужно уточнить (прежде всего, это касается удалённых областей атмосферы – полярных широт и стратосферы).

Целью данной работы является оценка влияния короткопериодных и долгопериодных изменений ТПО на структуру, динамику и состав атмосферы на разных широтах, с основным вниманием на полярные районы.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Анализ изменений ТПО (тренд и Южное колебание) за период с 1980 по 2020 годы для разных широтных зон по данным реанализа.

2. Анализ изменений температуры воздуха, содержания озона и скорости ветра и их связи с изменениями температуры поверхности океана по данным реанализа в разных широтных зонах, особенно в полярных районах.

3. Проведение численных экспериментов с помощью химико-климатической модели по разным сценариям изменения ТПО для оценки чувствительности метеорологических и химических полей к изменению ТПО для разных широтных зон.

4. Анализ влияния изменения ТПО на остаточную циркуляцию и поток волновой активности в разных широтных зонах с особым вниманием полярным районам.

Методы исследования. Основными методами исследования влияния ТПО на изменчивость структуры и состава атмосферы являются анализ данных реанализа и проведение численных экспериментов с использованием глобальной химико-климатической модели, позволяющей на основе заданных изменений температуры поверхности океана по данным реанализа рассчитывать изменения температуры воздуха и содержание озона для тропосферы и стратосферы при

разных сценариях. При этом проводились эксперименты с различными данными температуры поверхности океана; эксперименты, где были зафиксированы данные температуры поверхности океана или концентрации углекислого газа; а также эксперименты с учётом взаимодействия атмосферной химии и динамики. Для изучения влияния океана на нижнюю и среднюю атмосферу осуществлялись следующие оценки:

1) Эффекты влияния океана на тропосферу: оценка влияния изменчивости ТПО на температуру воздуха в разных широтных зонах, в том числе в удалённых областях;

2) Эффекты влияния океана на стратосферу: оценка влияния океанических процессов на динамику и температурный режим стратосферы, и на состояние озонового слоя.

Научная новизна. Анализируется влияние короткопериодных и долгопериодных изменений ТПО на физические и химические процессы в стратосфере, а именно: влияние на полярный вихрь, на термический режим стратосферы, остаточную циркуляцию, потоки волновой активности и состояние озонового слоя в разных широтных зонах. Также показано, что в распределении температуры воздуха в тропосфере ТПО играет большую роль, чем уровень CO_2 , в том числе в удалённых областях вследствие дистанционных эффектов, тогда как в стратосфере большее значение имеет уровень CO_2 . В ходе работы получены следующие результаты:

1. Получены новые оценки влияния Южного колебания на физические и химические процессы в стратосфере на разных широтных зонах: влияние на СПВ, термический режим стратосферы и состояние озонового слоя.

2. Приводятся новые оценки влияния изменений ТПО на динамические и волновые процессы в атмосфере на разных широтных зонах.

3. Получены новые оценки влияния локальных вариаций температуры поверхности океана на изменение температуры воздуха в удалённых регионах.

4. Получены результаты экспериментов, позволяющие оценить чувствительность к короткопериодным и долгопериодным изменениям ТПО (то есть к Эль-Ниньо и к тренду), а также результаты экспериментов с фиксированными ТПО и CO_2 .

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Изменения температуры поверхности океана приводят к откликам в температуре воздуха и содержании озона не только в тропосфере, но и в стратосфере, и на разных широтах, наиболее заметных в полярных районах.

2. Короткопериодные колебания температуры поверхности океана в тропиках (Эль-Ниньо/Ла-Нинья Южного колебания) приводят к повышению/понижению температуры воздуха в тропосфере и усилению/ослаблению потоков тепла и массы в стратосфере, приводя к усилению/ослаблению остаточной циркуляции и ослаблению/усилению зонального ветра на границе полярной области, а также к усилению/ослаблению

волновой активности, ослабляющей/укрепляющей полярный вихрь, что способствует повышению/понижению температуры стратосферы и содержания озона в полярных районах.

3. Положительный тренд температуры поверхности океана приводит к повышению температуры воздуха в тропосфере и возникновению потоков тепла в стратосфере, однако по сравнению с короткопериодными колебаниями эти потоки слабее, поэтому воздействие на зональный ветер, остаточную циркуляцию и планетарные волны слабее, и, в основном, проявляется в Северном полушарии.

4. Результаты химико-климатического моделирования показывают большее влияние увеличения температуры поверхности океана на температуру воздуха в тропосфере, чем увеличение уровня CO_2 , и более существенное по сравнению с температурой поверхности океана влияние уровня CO_2 на температуру воздуха и концентрацию озона в стратосфере.

Обоснованность и достоверность результатов. Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается строгой постановкой задачи, актуальностью и большим объёмом используемых данных метеорологических полей температуры воздуха, концентрации и общего содержания озона, скорости ветра, температуры поверхности океана и площади ледяного покрова. Полученные результаты не противоречат существующим представлениям о взаимодействии атмосферы и океана, и климатической изменчивости в атмосфере.

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту положения основаны на результатах, полученных самостоятельно. Личный вклад автора заключается в постановке целей и формулировке задач всех исследований, проведении экспериментов для решения этих задач, а также анализе и интерпретации полученных результатов и данных ре-анализа. Также автор подготовил материалы для публикаций и выступлений, сформулировал выводы и заключения по работе.

Теоретическая и практическая значимость.

1. Работа может служить методологической базой для проведения исследований влияния тренда и Южного колебания температуры поверхности океана на структуру и состав атмосферы в любом районе Земли в условиях изменения климата.

2. Результаты исследований могут быть использованы для уточнения прогнозов эволюции стратосферы и озонового слоя.

3. Результаты могут быть использованы для диагностики глобальных изменений в тропосфере и стратосфере, а также озоновом слое, и для принятия решений в различных областях административной и хозяйственной деятельности.

Диссертационная работа соответствует пункту 1 паспорта специальности 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология "Атмосферные процессы в полярных, умеренных и тропических широтах и их моделирование".

Апробация работы. Работа выполнялась на метеорологическом факультете РГГМУ с 2016 по 2022 гг. Тема работы включена в план кафедры метеорологических прогнозов РГГМУ.

Основные результаты исследований, изложенные в данной работе, докладывались и обсуждались на сессиях Учёного Совета и межкафедральных семинарах Российского государственного гидрометеорологического университета; на конференции XIII школы молодых учёных «Физика окружающей среды», (Томск, 2018); на Международной молодёжной школе и конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES-2019 (Москва, 2019); на Международном симпозиуме «Атмосферная радиация и динамика» (Санкт-Петербург, 2019); на Семнадцатой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)» (Москва, 2019); на конференции «М.А. Петросянец и отечественная метеорология» (Москва, 2019); Международном симпозиуме «Атмосферная радиация и динамика» (Санкт-Петербург, 2021).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 198 страниц, в том числе 62 рисунка и 1 таблицу. Список цитируемой литературы содержит 214 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность исследования влияния изменений температуры поверхности океана (ТПО) на температуру воздуха, озон и динамические процессы, сформулированы цели и задачи работы, излагается теоретическая новизна и практическая значимость. Определены выносимые на защиту положения и результаты, а также описана структура диссертации.

В разделах **Главы 1** «Влияние изменений температуры поверхности океана на структуру и состав атмосферы» раскрыта актуальность исследования, дан обзор существующих научных исследований, раскрыто общее состояние темы исследования и имеющиеся на данный момент научные результаты. Также описаны основные типы изменений ТПО – долгопериодные (тренд на изменение ТПО) и короткопериодные (явление Эль-Ниньо – Южное колебание).

В первом разделе первой главы описано влияние изменений ТПО на структуру и состав атмосферы, и сравнение с другими факторами, прежде всего, с концентрацией углекислого газа.

Основными процессами, происходящими при взаимодействии океана и атмосферы, являются тепловое и динамическое взаимодействие, а также обмен влагой. Воздействие океана на атмосферу заключается в передаче ей тепла и влаги. Тепло от океана передается в атмосферу посредством процессов испарения, турбулентного теплообмена и длинноволнового излучения с поверхности океана (Лаппо С.С. и др., 1990). В результате этого усиливаются вертикальные потоки тепла из тропосферы в стратосферу, которые оказывают воздействие на зональный ветер и планетарные волны, способствуя усилению меридионального переноса температуры и озона от тропиков к полюсам (рисунок 1). Вертикальный и

меридиональный перенос озона из тропической части стратосферы в средние и полярные широты называется циркуляцией Брюера-Добсона (Brewer-Dobson) (Brewer, A. W., 1949, Dobson, G. M. B., 1956). Также на атмосферные процессы влияют не только океанические процессы. Важным фактором является уровень углекислого газа CO₂ (Solomon S, et al 2007), который представляет собой парниковый газ, и вызывает потепление в нижней тропосфере, и может способствовать похолоданию в стратосфере.

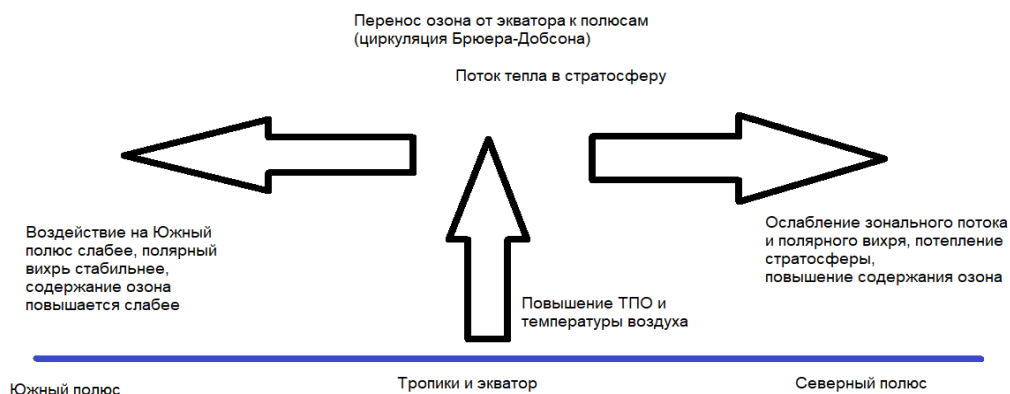


Рисунок 1 – Схема влияния повышения ТПО на атмосферные процессы

Изменения ТПО бывают долгопериодные и короткопериодные. Долгопериодные изменения – это тренд на изменение ТПО, который оказывает влияние на температуру воздуха и воздействует на динамические и химические процессы в атмосфере, а также способствует изменению климата. Короткопериодные изменения – это колебания ТПО, которые оказывают кратковременное воздействие на атмосферные процессы. Наиболее известным короткопериодным колебанием ТПО является Эль-Ниньо – Южное колебание (Taylor K.E., et al, 2000).

Во втором разделе первой главы подробно описаны короткопериодные колебания ТПО – явление Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

В третьем разделе первой главы проведён подробный обзор исследований на тему влияния изменений ТПО на динамические и химические процессы в атмосфере, а также влияния концентрации углекислого газа на эти процессы.

В настоящее время проведено множество научных исследований процессов взаимодействия атмосферы и океана. В последнее время актуальной становится проблема влияния океана на стратосферу и полярные регионы (Newman Paul A, et al 2001). В работе проведён обзор этих исследований. Также показано, что циркуляционный перенос газовых примесей между нижней и средней атмосферой оказывает значительное влияние на распределение озона и других газов в атмосфере. Для оценки влияния изменений ТПО циркуляционные процессы и волны Россби используются остаточная циркуляция и поток волновой активности Пламба, которые также описаны в этом разделе. Также актуальной темой многих научных исследований последнего времени является изучение трендов температуры на разных высотах атмосферы. Изучение особенностей этих трендов является важным компонентом мониторинга климата.

Результаты исследований показывает (Зубов В.А. и др., 2011), что рост содержания парниковых газов приводит к повышению температуры воздуха в тропосфере и нагреванию подстилающей поверхности, а также к понижению температуры воздуха в стратосфере, особенно во второй половине XXI века. Потепление тропосферы способствует повышению волновой активности планетарных волн, распространяющихся из тропосферы в стратосферу, и усилению меридионального потока к 2100 году вследствие разогрева тропосферы из-за парникового эффекта, что способствует усилению вертикального потока зонального импульса в стратосферу. Таким образом, взаимодействие волновых возмущений с зональным потоком в зимне-весенний период приводит к усилению меридионального потока и ослаблению зонального. Также исследования показывают (Володин Е.М., Грицун А.С., 2020), что сильнее всего теплеет в Арктике «Арктическое усиление», чем в остальном мире, в Южном полушарии теплеет существенно меньше, чем в Северном. На суше теплеет сильнее, чем над океаном. Показано, что парниковый эффект способствует изменению динамики атмосферы – происходит увеличение ячеек Хэдли и Ферреля, что может быть связано с изменением потоков импульса, связанными с волнами Россби. При этом интенсивность циркуляции Хэдли уменьшается из-за увеличения температуры и влажности воздуха. Что касается Эль-Ниньо – Южного колебания, то исследования показывают (Варгин П.Н. и др., 2021), что зимние сезоны характеризуются более высокими температурами воздуха в стратосфере при Эль-Ниньо по сравнению с Ла-Нинья, а также при Эль-ниньо происходит уменьшение зональной скорости ветра. В то же время многие моменты, связанные с влиянием Эль-Ниньо – Южное колебание, а также многолетнего тренда ТПО на удалённые районы атмосферы (в том числе на полярные районы) до сих пор полностью не изучены.

В разделах **Главы 2** «Основные методы исследования влияния параметров океана на структуру и состав атмосферы» описываются основные инструменты исследования воздействия изменений ТПО на структуру и состав атмосферы – химико-климатическая модель, данные реанализа и методы исследования.

Основными методами исследования является численное моделирование с помощью химико-климатической модели и анализ данных реанализа. Для исследований процессов, происходящих в результате долгопериодных и короткопериодных изменений ТПО, и оказывающих воздействие на общую циркуляцию атмосферы и перенос газовых примесей, используются химико-климатические модели. Для исследования таких проблем, как уменьшение содержания озона в атмосфере, «озоновые дыры» в полярных регионах, изменение климата и воздействие на циркуляцию атмосферы необходимо изучать взаимодействие физических и химических процессов в атмосфере.

В первом разделе второй главы описана химико-климатическая модель.

Химико-климатическая модель (ХКМ) представляет собой комбинацию двух частей – динамическую, которая была разработана в ИВМ РАН (Варгин П.Н., Володин Е.М., 2016), и химическую (Галин В.Я. и др., 2007), разработанную в РГГМУ. Разрешение этой модели – 5° долготы и 4° широты. Охват по долготе от 185° з.д. до 180° в.д., по широте – от 88° ю.ш. до 88° с.ш. По вертикали количество

σ -уровней модели равно 39 (от 0 до 88 км или от поверхности до уровня 0.003 гПа), при этом результаты моделирования интерполируются в изобарическую систему координат на 31 стандартную изобарическую поверхность. Количество узлов в модели 72 по долготе и 45 по широте. Шаг по времени – 12 минут. Модель обновляет начальные данные через каждые 6 часов (4 раза в сутки). Схема процессов, моделируемых с помощью ХКМ, представлена на рисунке 2. В схеме показано, что ТПО оказывает воздействие на нагрев атмосферы, что, в свою очередь, влияет на температуру воздуха и динамические процессы, которые влияют на изменения концентраций озона и других газовых примесей.

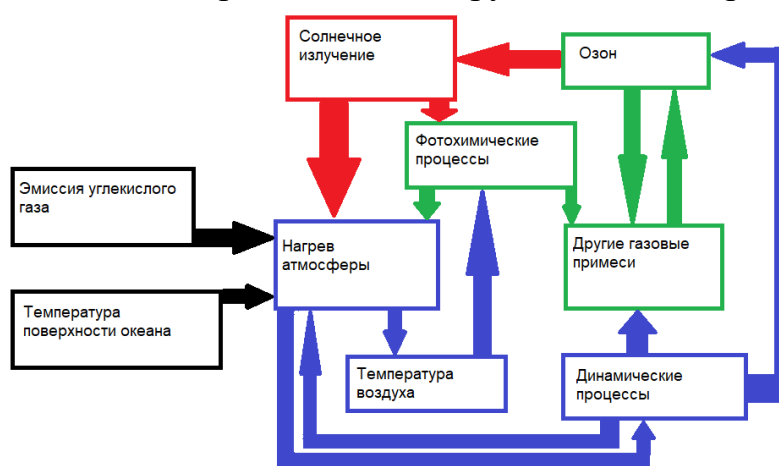


Рисунок 2 – Схема процессов, моделируемых ХКМ

Во втором разделе второй главы описаны методы исследования и данные реанализа.

Основным методом данного исследования является численное моделирование атмосферных процессов. Изменения основных метеорологических параметров (температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, плотности воздуха и скорости ветра) описываются уравнениями термодинамики, сохранения водяного пара, состояния воздуха, неразрывности и движения атмосферы. Эти уравнения решаются численными методами. Неадиабатические процессы, связанные с солнечной радиацией, турбулентностью, конвекцией и влиянием подстилающей поверхности на атмосферу, учитываются посредством параметризации. Эволюция газовых примесей определяется с помощью уравнений их переноса, которые также решаются конечно-разностными методами; при этом для решения данной задачи определяются скорости химических реакций. Между динамической и химической частями модели происходит обмен расчётными данными, что позволяет учитывать влияние всех этих процессов друг на друга.

С помощью ХКМ были проведены численные эксперименты. Для оценки влияния долгопериодных изменений ТПО на атмосферные процессы и чувствительности к этим изменениям проведены эксперименты на период с 2021 по 2030 годы, при этом использовались данные ТПО с условиями, характерными для начала периода (начало 1980-х) и конца периода (конец 2010-х). Для оценки влияния короткопериодных изменений ТПО на атмосферные процессы проведены аналогичные эксперименты с данными ТПО, характерными для Ла-Нинья и для Эль-Ниньо. Для оценки влияния изменений ТПО и CO_2 проводились эксперименты за период с 1980 по 2019 годы: базовые эксперименты, эксперимент

с фиксированными ТПО и CO₂, эксперимент с фиксированным ТПО и эксперимент с фиксированным CO₂.

Для того чтобы результаты моделирования можно было сравнить с наблюдаемыми в период моделирования процессами в атмосфере, а также для подробных исследований процессов в атмосфере, использовались данные ре-анализа – это данные о температуре, скорости ветра, концентрации и общего содержания озона MERRA2, основанные на данных спутниковых наблюдений NASA, и данные ECMWF ERA5, по которым исследуются процессы с временными масштабами в месяцы и сутки, и с которыми сравниваются результаты моделирования. При этом в MERRA2 есть 26 вертикальных уровня, тогда как в ERA5 – 21 уровень. Отличие моделирования от ре-анализа в том, что при моделировании начальные данные используются один раз, тогда как при ре-анализе – ассимиляция на каждом шаге по времени. Данные ре-анализа были приведены к модельной сетке (72 узла по долготе, 45 узлов по широте, 31 уровень по вертикали) для сравнения с результатами моделирования. Моделирование осуществлялось для периода с 1979 по 2019 г. Для данных ре-анализа MERRA2 и ERA5 выбран период с 1980 по 2020 годы.

В третьем разделе второй главы приведены формулы для расчёта остаточной циркуляции и потока Пламба.

Изменения ТПО приводят к усилению потоков тепла, которые оказывают воздействие на зональный ветер и переносятся через планетарные волны, что способствует изменению меридионального переноса и потока волновой активности (рисунок 3). Для анализа этих изменений и связанных с ними процессов были рассчитаны остаточная циркуляция и поток волновой активности Пламба.

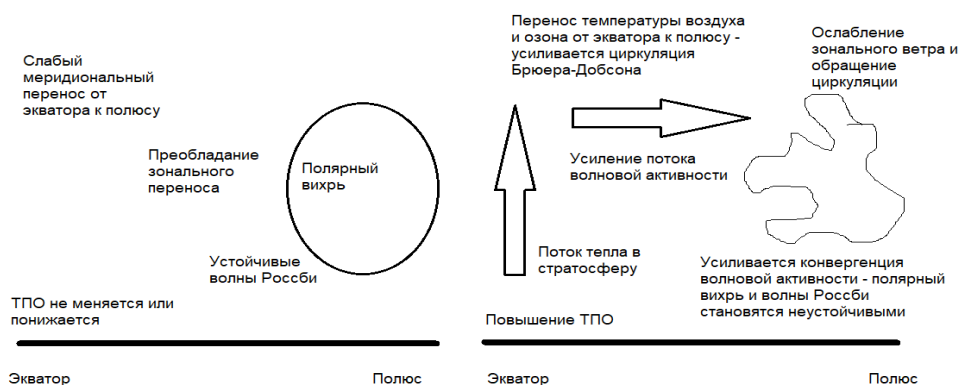


Рисунок 3 – Схема процессов, связанных с изменениями ТПО

Остаточная циркуляция понимается как преобразование эйлеровой средней циркуляции (Andrews et al., 1987; Dunkerton, T., 1978). Она представляет собой характеристику, в которой из регулярной скорости ветра вычитаются поправки, связанные с влиянием адвективных потоков тепла и импульса и короткопериодическими эффектами, представляя собой суперпозицию адвективного движения и индуцированного планетарными волнами вихревого движения. Учитывая, что потенциальная температура равна $\theta = T \exp\left(\frac{Rz}{C_p H}\right)$, где $R = 287 \text{ м}^2 \text{ с}^{-2} \text{ К}^{-1}$ – удельная газовая постоянная воздуха, $H = 7 \text{ км}$ – высота

однородной атмосферы, C_p – теплоёмкость при постоянном давлении, получены уравнения для остаточной циркуляции. Если взять отклонения от средних зональных значений меридиональной и вертикальной компонент скорости ветра $v' = v - \bar{v}$; $w' = w - \bar{w}$, и потенциальной температуры $\theta' = \theta - \bar{\theta}$, то формулы для расчёта меридиональной и вертикальной компонент остаточной циркуляции будут выглядеть так (Коваль А.В., 2019):

$$\bar{v}^* = \bar{v} - \frac{1}{\partial \bar{\theta} / \partial z} \left(-\frac{\overline{v'\theta'}}{H} + \frac{\partial \overline{v'\theta'}}{\partial z} - \frac{\overline{v'\theta'}}{\partial \bar{\theta} / \partial z} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$\bar{w}^* = \bar{w} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{1}{\partial \bar{\theta} / \partial z} \left(-\sin \varphi \overline{v'\theta'} + \cos \varphi \left(\frac{\partial \overline{v'\theta'}}{\partial \varphi} - \frac{\overline{v'\theta'}}{\partial \bar{\theta} / \partial z} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z \partial \varphi} \right) \right), \quad (2)$$

где z – высота, a – радиус Земли, черта сверху – зональное осреднение.

В отличие от регулярной скорости ветра, остаточная циркуляция основана на глобальном перемещении и изменении температуры воздуха, она демонстрирует тенденции перемещения в глобальном масштабе температуры и озона, таким образом позволяя оценить меридиональный перенос от экватора к полюсу, и вертикальные потоки. Остаточная вертикальная циркуляция пропорциональна скорости неадиабатического нагрева – неадиабатическая циркуляция в меридиональной плоскости, при которой происходит неадиабатический нагрев поднимающегося воздуха и неадиабатическое охлаждение опускающегося, при этом их потенциальная температура приспособливается к локальной среде. Осреднённая по времени остаточная меридиональная циркуляция аппроксимирует среднее движение воздуха и представляет собой аппроксимацию среднего адвективного перемещения газовых примесей.

Потоки тепла в стратосферу оказывают воздействие на полярный вихрь посредством планетарных волн, интенсивность распространения которых оценивается с помощью потока волновой активности Пламба. Волновая активность распространяется в стратосфере и воздействует на упорядоченный перенос и остаточную циркуляцию. Формулы для расчёта трёх компонент и дивергенции потока Пламба (Plumb R. Alan, 1985):

$$F_L = \frac{p}{p_0} \cos \varphi \left(-\frac{1}{2af \cos \varphi} \frac{\partial \overline{v'\Phi'}}{\partial \lambda} + \overline{v'^2} \right), \quad (3)$$

$$F_\varphi = \frac{p}{p_0} \cos \varphi \left(\frac{1}{2af \cos \varphi} \frac{\partial \overline{u'\Phi'}}{\partial \lambda} - \overline{u'v'} \right), \quad (4)$$

$$F_z = \frac{p}{p_0} \frac{f \cos \varphi}{S} \left(-\frac{1}{2af \cos \varphi} \frac{\partial \overline{T'\Phi'}}{\partial \lambda} + \overline{v'T'} \right), \quad (5)$$

$$\text{div} \vec{F} = \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial F_L}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial F_\varphi \cos \varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial F_z}{\partial z}, \quad (6)$$

где Φ - геопотенциал, $\kappa = \frac{R}{C_p}$, p – атмосферное давление, $p_0 = 1000$ гПа, $S = \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + \lambda \frac{\bar{T}}{H}$

- параметр статической устойчивости, λ - долгота, φ - широта, $f = 2\Omega \sin \varphi$ -

переносный вихрь (параметр Кориолиса), c^{-1} , Ω - угловая скорость вращения Земли, $u' = u - \bar{u}$, $v' = v - \bar{v}$ и $T' = T - \bar{T}$ - отклонения от средних зональных значений зональной и меридиональной компонент скорости ветра ($m\ c^{-1}$) и температуры воздуха (К), характеризующие планетарные волны.

Как видно по формуле (5), повышение зонального отклонения температуры приводит к усилению вертикальной компоненты потока волновой активности, что указывает на перенос тепла из тропосферы в стратосферу через планетарные волны. Формула (4) показывает, что воздействие на зональный ветер и его обращение (уменьшение зонального отклонения зональной компоненты и увеличение зонального отклонения меридиональной компоненты скорости ветра) приводит к усилению меридионального потока волновой активности от экватора к полюсу. Усиление меридиональной и вертикальной компонент потока способствует неустойчивости планетарных волн и западного переноса, и усиление меридиональных процессов. Дивергенция потока волновой активности отражает ускорение зонально осреднённого зонального потока под действием планетарных волн. Отрицательные значения дивергенции (конвергенция) соответствуют отрицательному (направленному на запад) ускорению среднего ветра. Таким образом, вектор потока Пламба является важным инструментом для оценки условий распространения планетарных волн в широтно-долготной плоскости.

В разделах **Главы 3** «Исследование влияния изменений температуры поверхности океана (ТПО) и явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья на температуру тропосферы и стратосферы, а также на состояние озонового слоя» представлены анализ изменений ТПО, температуры воздуха и озона по данным реанализа и результатам моделирования.

В первом разделе третьей главы проанализированы изменения ТПО в разных широтных зонах.

Как уже сказано ранее, различают долгопериодные и короткопериодные изменения ТПО. Долгопериодные изменения ТПО проявляются в тренде на повышение, как показано на рисунке 4. Как видно, ТПО за период с 1980 по 2020 годы повысилась на 0.3 градуса. Этот тренд проявляется на разных широтных зонах, за исключением Антарктического региона (90-60 градусов южной широты), где наблюдается тренд на понижение ТПО.

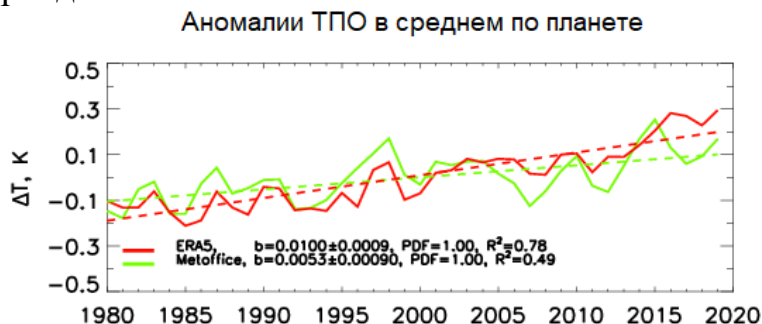


Рисунок 4 - Временная изменчивость и тренд среднегодовых значений аномалий ТПО по данным Met Office с 1980 по 2020 годы

Помимо тренда есть также и короткопериодные изменения ТПО, к которым относятся, прежде всего, явление Эль-Ниньо – Южное колебание. Эти колебания

ТПО происходят в тропической части Тихого океана, но при этом проявляются в глобальном масштабе, как видно по рисунку 4.

Во втором разделе третьей главы проведён анализ изменений температуры воздуха и озона в тропосфере и стратосфере по данным реанализа.

Воздействие изменений ТПО на атмосферу проявляется в отклике температуры воздуха в тропосфере, как видно по рисунку 5, и полярной стратосфере (рисунок 6).

Изменения ТПО в полной мере проявляются в нижней тропосфере, так как в ней идёт непрерывный теплообмен с океаном. Поэтому, как видно по рисунку 5, температура воздуха в тропосфере имеет тенденцию к повышению. Мощные фазы Эль-Ниньо в 1982-1983, 1997-1998 и 2015-2016 и Ла-Нинья 1988-1989, 1999-2000 и 2010-2011 имеют отклики в температуре воздуха в тропосфере как в тропической зоне, так и в глобальном масштабе.

В Арктической стратосфере (рисунок 6) наблюдаются отклики на Эль-Ниньо 1997-1998 и 2015-2016, а также на Ла-Нинья 1999-2000 и 2010-2011. В Антарктической стратосфере эти отклики видны только для Ла-Нинья 2010-2011 и Эль-Ниньо 2015-2016. Что касается тренда, то в стратосфере, в целом, наблюдается понижение температуры воздуха в Южном полушарии.

Эль-Ниньо – Южное колебание оказывает значимое воздействие на всю тропосферу, а также на стратосферу Северного полушария, тогда как в стратосфере Южного полушария это влияние незначимо. Тренд на повышение ТПО оказывает значимое влияние только на температуру воздуха в тропосфере.

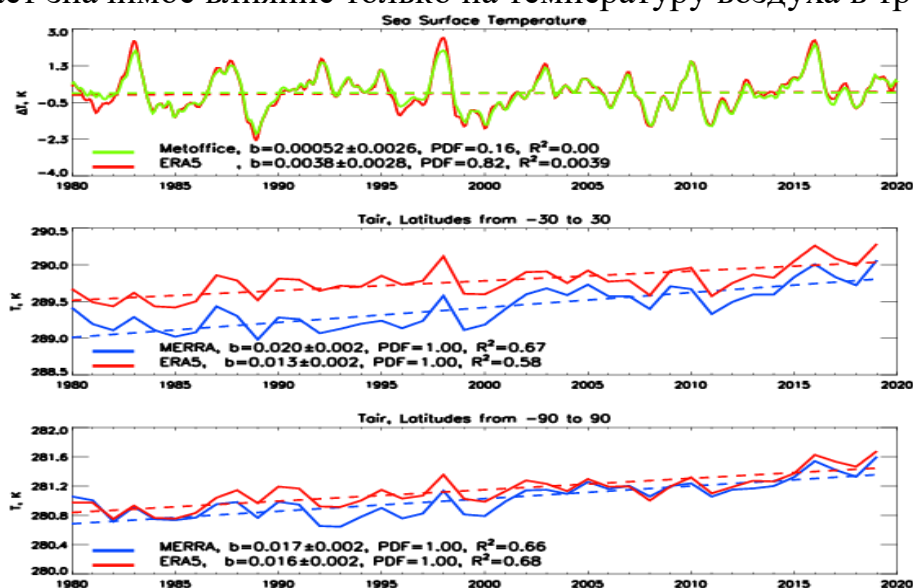


Рисунок 5 - Межгодовая изменчивость аномалий ТПО в районе Южного колебания (5N-5S, 170W-120W) по данным реанализа ERA5 (красный), Met Office (зеленый) (вверху) и температуры воздуха в нижней тропосфере для тропиков (в центре) и в глобальном масштабе (внизу) на основе данных реанализа MERRA (синий) и ERA5 (красный) с оценкой трендов и их значимости

При Южном колебании происходит сильный нагрев тропосферы в тропической части Тихого океана, что приводит к возникновению вертикальных потоков тепла в стратосферу, которые усиливают упорядоченное вертикальное движение воздушных масс и способствует стратосферным потеплениям. Эти

потоки оказывают воздействие на зональный ветер, способствуя изменениям в общей циркуляции атмосферы, что, в свою очередь, оказывает влияние на содержание озона в стратосфере.

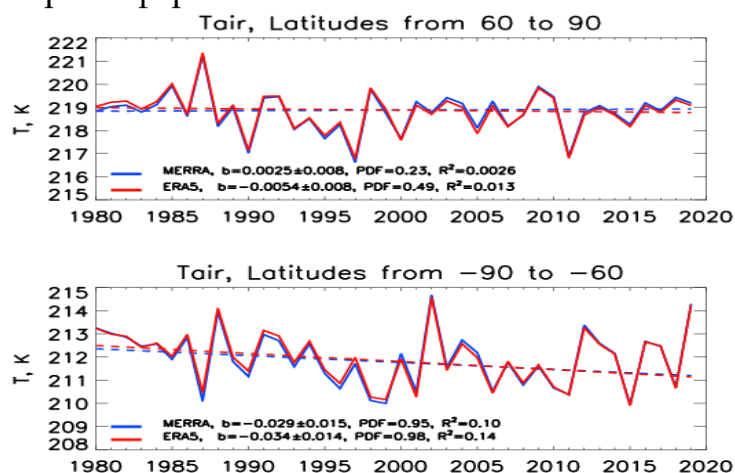


Рисунок 6 - Межгодовая изменчивость температуры воздуха в нижней стратосфере в полярных широтах Северного полушария (вверху) и Южного полушария (внизу) по данным реанализа MERRA2 (синий) и ERA 5 (красный) с оценкой трендов, значимости и коэффициент детерминации

В третьем разделе третьей главы проведён анализ температуры воздуха и концентрации озона по результатам моделирования.

Результаты моделирования, в целом, согласуются с данными ТПО и данными реанализа по температуре воздуха для нижней тропосферы. По нижней стратосфере значения температуры воздуха значительно расходятся с данными реанализа, но при этом тренды согласуются. Концентрация озона также расходится с данными реанализа, при этом тренды меньше согласуются, чем по температуре воздуха в стратосфере. В целом, стратосфера всё же реагирует на изменения ТПО. Значит, модель достаточно корректно воспроизводит основные процессы в атмосфере, связанные реакцией атмосферы на тренд ТПО и Южное колебание.

В четвёртом разделе третьей главы приведены выводы этих исследований.

В разделах **Главы 4** «Исследование влияния короткопериодных изменений ТПО на динамику атмосферы и озоновый слой» проведён подробный анализ процессов, происходящих в атмосфере при Южном колебании.

В первой части четвёртой главы проведён анализ воздействия Южного колебания на физические и химические процессы в Арктической стратосфере по данным реанализа.

Данные реанализа MERRA2 показывают, что при фазе Эль-Ниньо происходит усиление потоков тепла в стратосферу, и повышается вероятность внезапных стратосферных потеплений, что видно по данным температуры воздуха – при Эль-Ниньо стратосферные потепления выражены сильнее – температура воздуха в период с февраля по апрель поднималась до 230 К, тогда как при Ла-Нинья она оставалась около 200 К (рисунок 7). Данные MERRA2 показывают ослабление и обращение зонального потока на 64 широте – границе СПВ при фазе Эль-Ниньо. Это указывает на ослабление СПВ. Расчёты остаточной циркуляции указывают на усиление меридионального переноса от экватора к полюсам,

которое ослабляет зональный ветер и СПВ, что способствует нагреву Арктической стратосферы и переносу озона от экватора к Северному полюсу, а, следовательно, увеличению содержания озона. Поток тепла в стратосферу также усиливает поток волновой активности в меридиональном и вертикальном направлении, что видно по расчётам потока Пламба. Расчёты указывают на усиление конвергенции этого потока при фазе Эль-Ниньо, а также на увеличение амплитуды волны с зональным числом 1 и уменьшение амплитуды волны с зональным числом 2, что соответствует другим исследованиям (Варгин П.Н. и др, 2021). В результате планетарные волны Россби становятся неустойчивыми и ослабевают, что способствует ослаблению зонального ветра и разрушению СПВ, а потоки тепла через эти волны в стратосферу Арктики усиливаются. При Ла-Нинья потоки тепла в стратосферу отсутствуют, и динамические процессы (зональный поток, полярный вихрь и волны Россби) сохраняют устойчивость. В результате этого содержание озона уменьшается.

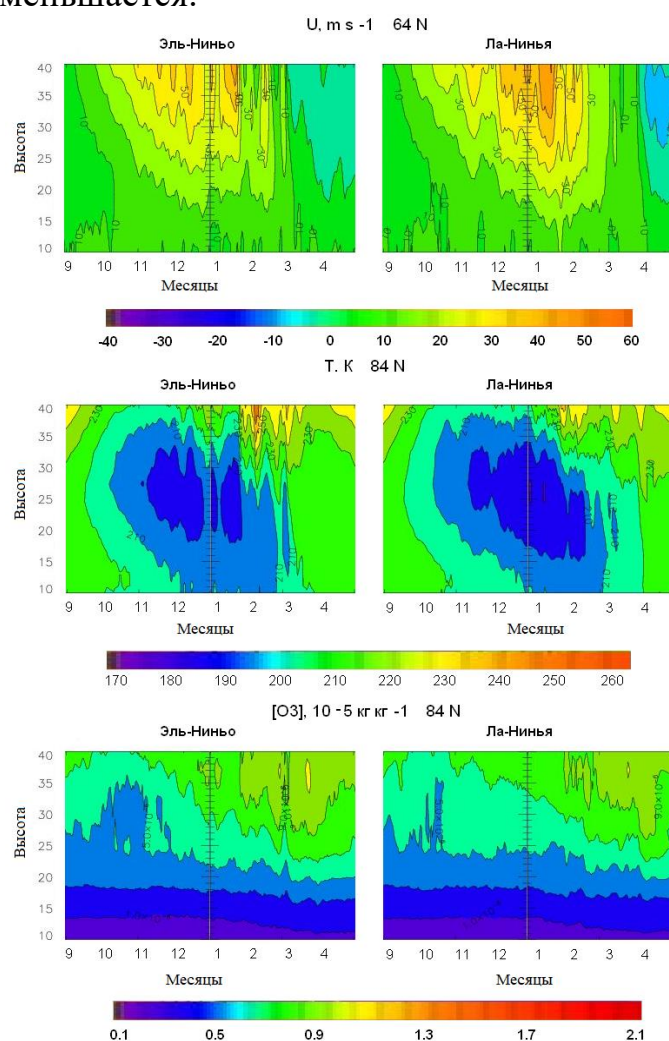


Рисунок 7 – Вертикальные годовые профили зональной скорости ветра (U) в м/с на широте 64° с.ш. (вверху), температуры воздуха (T) в K (в центре) и концентрации озона ([O3]) в кг кг⁻¹ (внизу) на широте 84° с.ш. и по среднесуточным данным MERRA2, для фазы Эль-Ниньо и для фазы Ла-Нинья

Во второй части четвёртой главы проведён анализ чувствительности атмосферы к Южному колебанию по результатам моделирования.

Для анализа чувствительности были проведены численные эксперименты за прогностический период с 2021 по 2030 годы. В этих экспериментах использовались данные ТПО для условий, характерных для Ла-Нинья и для Эль-Ниньо (остальные процессы зафиксированы на уровне 2020 года), и рассчитаны разности между этими результатами.

Южное колебание проявляется в сильном повышении ТПО на 4 градуса в экваториальной части Тихого океана, и понижении ТПО на 1-2 градуса в районе 30 широты к северу и югу от экватора. Расчёты, проведённые с помощью ХКМ для сценариев с фазами Эль-Ниньо и Ла-Нинья показывают, что Эль-Ниньо проявляется в повышении температуры воздуха (рисунок 8) над экваториальной частью Тихого океана на 2-3 градуса на высотах до 20 км, а также на 1 градус в районе 60 широты над Тихим океаном в Южном полушарии и на 3 градуса в Северном. Это связано с углублением циклонических центров действия атмосферы над Тихим океаном, особенно Алеутского минимума. В нижней стратосфере (высоты 20-30 км) расчёты показывают понижение температуры на 2.5 градуса и содержания озона на 1-2% над тропической частью Тихого океана и повышение температуры на 2 градуса и содержания озона на 2-3% к югу и северу от этого региона. Над Арктикой на высотах до 30 км наблюдается повышение температуры на 2 градуса и концентрации озона на 5 %, над Антарктикой – повышение температуры на 1 градус и концентрации озона на 5%. Эти изменения указывают на усиление переноса температуры и озона из тропиков в полюса.

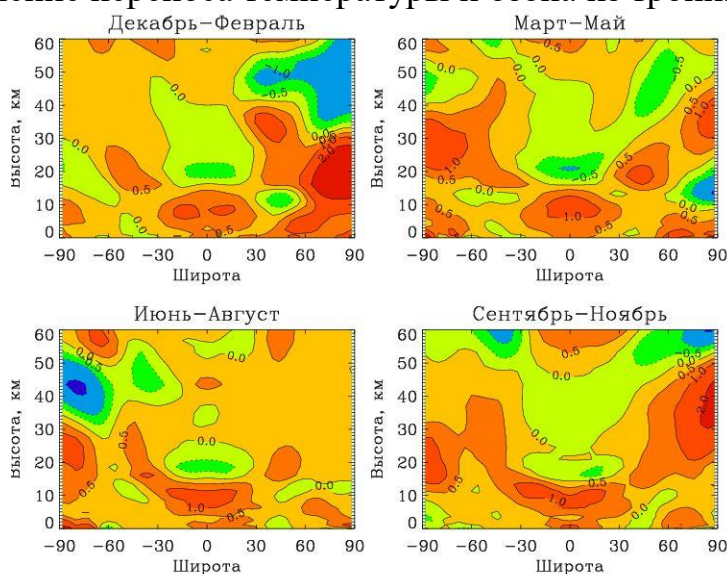


Рисунок 8 - Вертикальные среднезональные среднесезонные профили разностей температуры воздуха в К по результатам моделирования для сценариев с фазами Эль-Ниньо и Ла-Нинья

Южное колебание способствует усилению потоков тепла в стратосферу, что оказывает воздействие на зональный ветер. Расчёты для сценариев с фазами Эль-Ниньо и Ла-Нинья показывают уменьшение зональной скорости ветра на 10 м/с в Северном полушарии в зимние месяцы, и на 2 м/с в Южном полушарии в весенние и летние месяцы. Эти изменения указывают на ослабление зонального потока и СПВ. В результате этого происходит усиление меридионального переноса воздушных масс, вследствие чего усиливается перенос тепла и озона из тропического региона в полярные. В стратосфере происходит повышение

температуры воздуха, концентрации и общего содержания озона в полярных регионах, тогда как в тропическом – понижение. При этом в Северном полушарии ослабление зонального потока сильнее, чем в Южном.

Анализ остаточной циркуляции по расчётам для сценариев с фазами Эль-Ниньо и Ла-Нинья показывает усиление вертикального потока в экваториальной зоне 10^{-3} м/с и усиление меридионального потока от экватора к Северному полюсу на 0.05-0.1 м/с и к Южному полюсу на 0.01-0.05 м/с. Эти изменения указывают на усиление меридионального переноса озона от экватора к полюсу (циркуляции Брюера-Добсона) при фазе Эль-Ниньо, и, как результат, поступлением озона из тропических широт в Арктические. Эль-Ниньо приводит к нагреву воздуха в тропическом регионе, что способствует усилению вертикальных потоков и углублению Алеутского минимума. Эти потоки способствуют нагреву стратосферы и ВСП, что приводит к ослаблению зонального потока и СПВ, и усилению меридионального, что, в свою очередь, усиливает циркуляцию Брюера-Добсона. В Южном полушарии, как показывают расчёты по ХКМ, данный эффект выражен значительно слабее, чем на Северном, поэтому озоновые дыры над Антарктикой более мощные и устойчивые, чем над Арктикой.

Анализ потока волновой активности Пламба показывает усиление меридиональной компоненты на $5 \text{ м}^2 \text{ с}^{-2}$ и вертикальной компоненты на $0.1-0.5 \text{ м}^2 \text{ с}^{-2}$ на высотах 0-30 км в Северном полушарии, которое указывает на усиление меридиональных процессов вследствие нагрева стратосферы, способствующие ослаблению зонального потока и волн Россби, и разрушению СПВ. Что касается Южного полушария, там это усиление значительно слабее, чем на Северном – меридиональная компонента уменьшается на $0.5-1.0 \text{ м}^2 \text{ с}^{-2}$ на высотах до 20 км, а вертикальная – увеличивается на $1-2 \text{ м}^2 \text{ с}^{-2}$ на высотах от 20 км. Анализ дивергенции потока Пламба показывает усиление конвергенции над Северным полушарием (дивергенция уменьшилась на $2-5 \text{ с}^{-2}$ в зимние и осенние месяцы), и слабое усиление на Южном (дивергенция уменьшилась на 2 с^{-2} в весенние месяцы). Анализ амплитуд планетарных волн показывает увеличение амплитуды волны с числом 1 на 50-200 гп м и уменьшение амплитуды волны с числом 2 на 20 гп м в зимние месяцы в Северном полушарии, тогда как в Южном – увеличение амплитуды волны с числом 1 на 20-50 гп м в весенние и осенние месяцы. Усиление меридиональной и вертикальной компонент потока Пламба, усиление его конвергенции над полюсами и увеличение амплитуды волны с числом 1 и уменьшение амплитуды волны с числом 2 указывают на мощное усиление потока волновой активности в Северном полушарии и более слабое усиление этого потока в Южном полушарии, что, в свою очередь, способствует ослаблению планетарных волн Россби и разрушению СПВ, особенно в Северном полушарии. Это означает, что в годы Эль-Ниньо происходят более резкие изменения в потоке волновой активности на Северном полушарии, чем в годы Ла-Нинья. При этом Эль-Ниньо способствует усилению конвергенции потока Пламба и увеличению амплитуды волны с числом 1, а, следовательно, обращению зонального потока и ослаблению волн Россби, что приводит к разрушению СПВ. Эти изменения связаны с усилением потока тепла в стратосферу при фазе Эль-Ниньо и его воздействием на зональный ветер, и приводят к усилению потока волновой

активности, что означает ослабление планетарных волн Россби при фазе Эль-Ниньо, и усиление переноса тепла посредством этих волн от экватора к полюсам и из тропосферы в стратосферу. В Южном полушарии это влияние значительно слабее, чем на Северном.

В третьей части четвёртой главы приведены выводы исследований.

В разделах **Главы 5** «Влияние долгопериодных изменений ТПО на динамику атмосферы и озоновый слой» проведён анализ процессов, связанных с трендом на повышение ТПО.

В первой части пятой главы проведён анализ чувствительности атмосферы к повышению ТПО по результатам моделирования.

Для анализа чувствительности были проведены численные эксперименты за прогностический период с 2021 по 2030 годы. В этих экспериментах использовались условия начала периода (начало 1980-х) и конца периода (конец 2010-х) (остальные процессы зафиксированы на уровне 2020 года), и рассчитаны разности между этими результатами.

Тренд ТПО проявляется в повышении ТПО на 0.5-1.0 градусов в среднем по планете. Расчёты, проведённые с помощью ХКМ для сценариев конца и начала тренда, показывают, что происходит повышение температуры воздуха в тропосфере на 0.6-1.0 градусов в среднем по планете (рисунок 9). Особенно сильно потепление проявляется в Арктике (на 1.5-2.0 градусов), которое называется «Арктическим усилением». В Антарктике, а также к западу от Южной Америки, наблюдается понижение ТПО и температуры воздуха на 1 градус. В стратосфере в Северном полушарии температура воздуха увеличилась на 1 градус, а содержание озона увеличилось на 1-3%, при этом в Южном полушарии наблюдается понижение температуры на 1 градус, а содержания озона на 1-3 %. Это означает, что тренд ТПО, в отличие от Южного колебания, способствует более слабому потоку тепла в стратосферу, который не оказывает влияния на стратосферу Южного полушария, и оказывает слабое влияние на стратосферу Северного полушария. При этом в Южном полушарии тренд на повышение ТПО способствует углублению озоновой дыры.

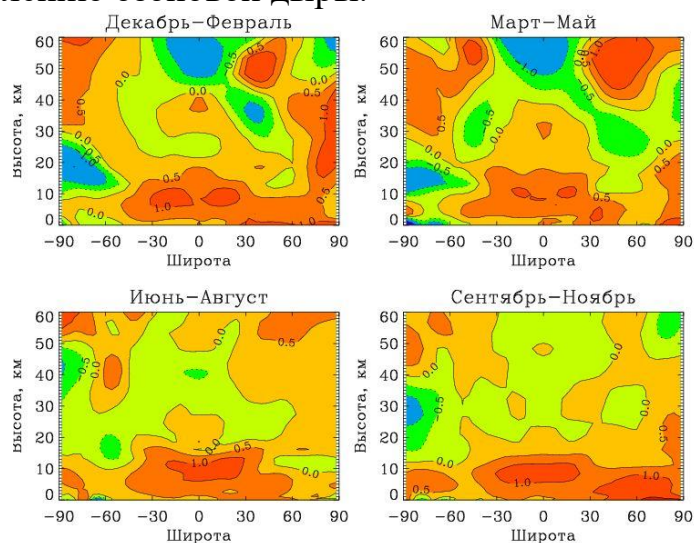


Рисунок 9 - Вертикальные среднезональные среднесезонные профили разностей температуры воздуха в К по результатам моделирования для сценариев конца и начала тренда

Зональный ветер в Северном полушарии, согласно расчётам для сценариев конца и начала тренда, ослабевает на 2-5 м/с в результате воздействия потоков тепла и усиления меридионального переноса, но это воздействие на зональный ветер слабее, чем в случае с Южным колебанием. В Южном полушарии зональный ветер усиливается на 2 м/с. Это связано с проявлением «Арктического усиления» - усиление потоков тепла в стратосферу Арктики вследствие потепления океана и тропосферы. Потепление тропосферы способствует ослаблению зонального потока на Северном полушарии, и усилению меридионального потока. В Южном полушарии зональный поток, в целом, усиливается, что может быть связано также с понижением ТПО и температуры воздуха в Антарктике. Ослабление зонального потока вследствие повышения ТПО меньше, чем вследствие короткопериодных колебаний ТПО, и проявляется только в Арктической стратосфере.

Анализ остаточной циркуляции, согласно расчётам для сценариев конца и начала тренда, показывает усиление вертикального потока тепла в экваториальных широтах на 10^{-3} м/с, и меридионального переноса от экватора к Северному полюсу с увеличением меридиональной компоненты на 0.1 м/с. Это указывает на усиление потоков тепла вследствие потепления океана из тропосферы в стратосферу вследствие «Арктического усиления» и общего повышения ТПО и температуры в тропосфере, что приводит к усилению меридионального переноса и ВСП, и ослабляет зональный поток и СПВ в Северном полушарии. Всё это способствует усилению меридионального переноса от экватора к полюсам по мере потепления тропосферы вследствие повышения ТПО. В Южном полушарии эффект отсутствует, так как ТПО и температура в тропосфере понижаются, и содержание озона уменьшается вследствие химических процессов. По сравнению с Южным колебанием, в целом, остаточная циркуляция усиливается слабее.

Анализ потока волновой активности Пламба показывает, что в отличие от Южного колебания, потепление океана вследствие тренда оказывает меньшее воздействие на поток волновой активности. Расчёты для сценариев конца и начала тренда показывают усиление меридиональной компоненты на $2-10 \text{ м}^2 \text{ с}^{-2}$ и вертикальной компоненты на $10^{-3} \text{ м}^2 \text{ с}^{-2}$ над Арктикой, что способствует неустойчивости планетарных волн Россби, и ослаблению зонального переноса, разрушая СПВ. Анализ дивергенции показывает, что происходит усиление конвергенции на 1 с^{-2} на высотах 20-30 км в зимние месяцы над Арктикой. Анализ амплитуд показывает увеличение амплитуды волны с числом 1 на 50 гп м и уменьшение амплитуды волны с числом 2 на 20 гп м на высотах до 40 км в зимние месяцы в Северном полушарии. В Южном полушарии происходит уменьшение обеих амплитуд (кроме летних месяцев и для волны с числом 2 - весенних). Это означает, что при сценариях конца и начала тренда поток волновой активности, в целом, мало меняется, при этом в Арктике немного усиливается, что может быть связано с потеплением тропосферы и «Арктическим усилением», и возможным усилением потоков тепла в стратосферу, что может способствовать неустойчивости планетарных волн Россби. В Южном полушарии эффект отсутствует, поток волновой активности не усиливается. По сравнению с Южным

колебанием, эффект от воздействия тренда на повышение ТПО значительно слабее.

Во второй части пятой главы проведён анализ влияния изменений ТПО по результатам моделирования и данным реанализа.

Были проведены базовые эксперименты с химико-климатической моделью. ТПО за период с 1980 по 2019 годы повысилась на 0.2-0.5 градусов, а температура воздуха в тропосфере – на 0.5-1.0 градусов в среднем по планете. В стратосфере наблюдается понижение температуры воздуха на 1.5-2.0 градусов в среднем по планете. Концентрация озона в стратосфере мало меняется в целом по планете, при этом в тропиках она увеличивается. Данные реанализа (рисунок 10), в целом, подтверждают результаты моделирования. Этот анализ показывает, что тренд ТПО оказывает значительное влияние на тропосферу посредством её нагрева, но незначительное влияние на стратосферу.

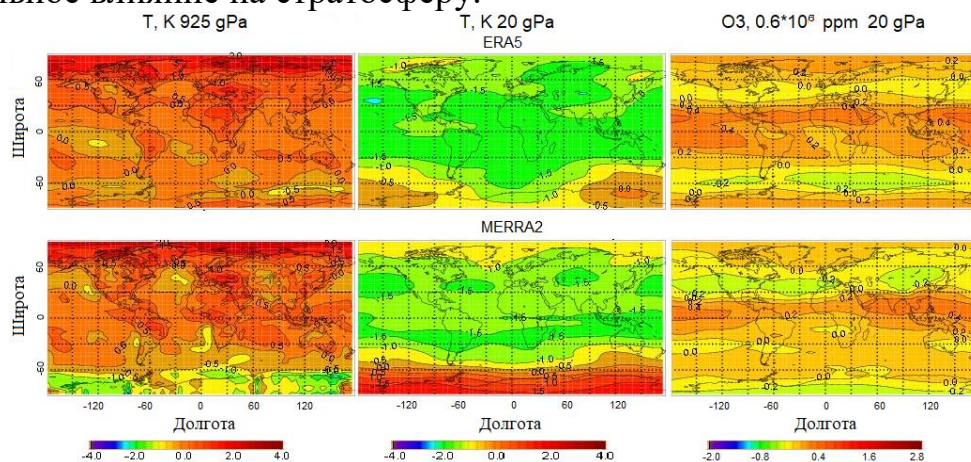


Рисунок 10 – Разность величин, осреднённых за периоды с 2009 по 2019 и с 1980 по 1990 годы: по данным ре-анализа ERA5 (1 ряд) и MERRA2 (2 ряд). Левая колонка - температура воздуха (Т) на уровне 925 гПа (тропосфера), средняя колонка – температура воздуха (Т) на уровне 20 гПа (стратосфера), правая колонка – концентрация озона ([O3]) на уровне 20 гПа (стратосфера)

В третьей части пятой главы проведён анализ влияния изменений ТПО и уровня углекислого газа CO₂ по результатам моделирования.

Были проведены эксперименты с фиксированными ТПО и CO₂, фиксированным ТПО, фиксированным CO₂ и базовый эксперимент (рисунок 11). Повышение ТПО способствует повышению температуры воздуха в тропосфере, тогда как повышение уровня CO₂ без учёта влияния ТПО даёт незначительное повышение температуры воздуха. В нижней тропосфере в Арктике отмечается значительно более сильное потепление, чем в Антарктике, что соответствует известной гипотезе «Арктического усиления». В Антарктике же, в отличие от Арктики, потепление выражено слабее, а в некоторых районах южной полярной зоны отмечается даже похолодание. Данные ре-анализа также подтверждают менее существенное потепление, а местами похолодание, в Антарктике и арктическое усиление глобального потепления. Это говорит о том, что с одной стороны, динамические факторы, определяющие разницу между полярными зонами северного и южного полушария, играют важнейшую роль в изменчивости температуры нижней тропосферы в Арктике и Антарктике, а, с другой стороны, о

способности химико-климатической модели с заданной изменчивостью влияющих параметров описывать наблюдаемые особенности температурных вариаций в приземном слое полярной атмосферы.

Однако в стратосфере наоборот – повышение уровня CO_2 способствует понижению температуры воздуха в стратосфере на 1.0-1.5 градусов, и незначительным изменениям концентрации озона. При фиксированном уровне CO_2 температура воздуха в стратосфере меняется незначительно, а концентрация озона уменьшается.

Сопоставление результатов дополнительных сценариев модельных расчетов с базовым сценарием, в котором задана изменчивость всех влияющих параметров, позволяет сделать вывод, что в связи с особенностями циркуляции в полярных районах увеличение содержания углекислого газа приводит к меньшему охлаждению стратосферы в Арктике по сравнению с другими широтами и большему охлаждению в Антарктике, если не принимать во внимание влияние изменчивости ТПО и площади поверхности льда на циркуляцию в северной полярной области. Совокупный эффект климатических изменений, связанных с влиянием изменчивости углекислого газа и температуры поверхности моря, приводит к локализации СПВ, в результате чего в восточном полушарии, особенно в север Сибири, сильнейшее охлаждение стратосферы.

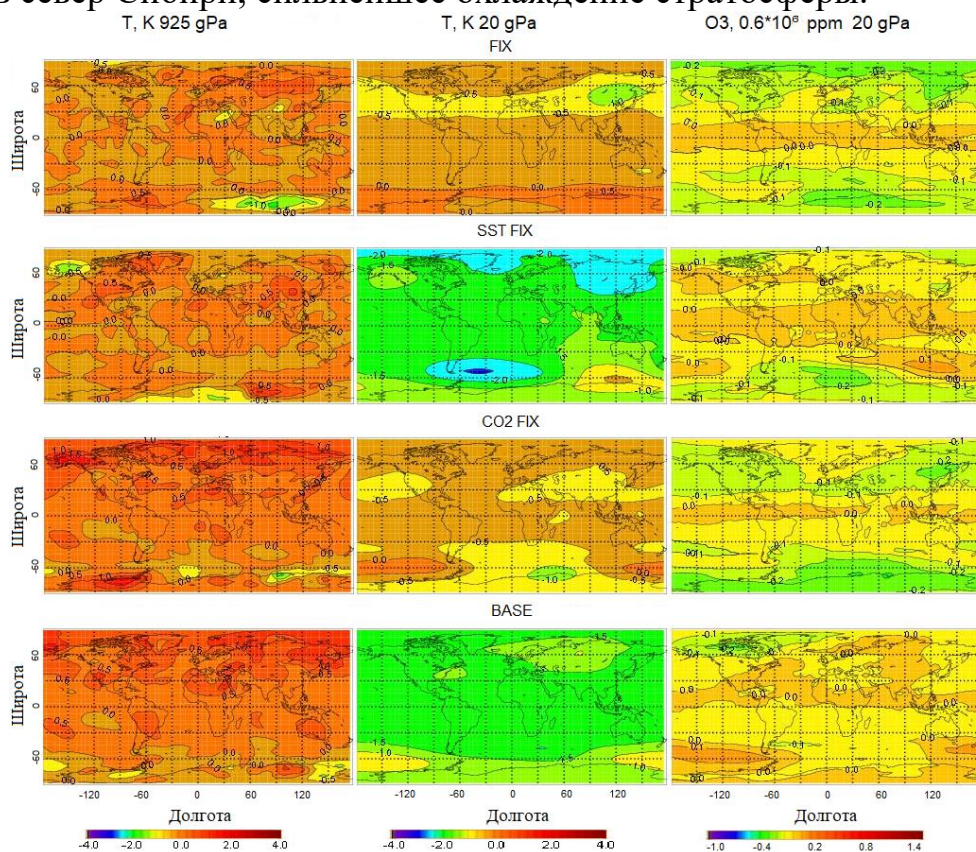


Рисунок 11 – Разность результатов моделирования, осреднённых за периоды с 2009 по 2019 и с 1980 по 1990 годы, с учётом взаимодействия атмосферной химии и динамики: в экспериментах с фиксированными значениями ТПО и CO_2 на уровне 1979 года (первый ряд), с фиксированными ТПО на уровне 1979 года (второй ряд), с фиксированным CO_2 на уровне 1979 года (третий ряд) и базовым (нижний ряд). Левая колонка – температура воздуха на уровне 925 гПа, средняя

колонка – температура воздуха на уровне 20 гПа, правая колонка - концентрация озона на уровне 20 гПа.

В четвёртой части пятой главы приведены выводы исследований.

В **Заключении** приводятся основные выводы проведённого в ходе диссертационной работы исследования.

Численные эксперименты на глобальном уровне, а также данные ре-анализа показали значительное влияние ТПО на температуру воздуха в тропосфере. Коэффициенты корреляции между ТПО и температурой воздуха в тропосфере составляют 0.9. Температура воздуха в нижней тропосфере характеризуется положительным значимым трендом в среднем по земному шару. Кратковременная изменчивость средней глобальной температуры нижней тропосферы хорошо согласуется с фазами Южного колебания, имеющего тропическое происхождение. В нижней стратосфере наблюдается значительное похолодание. Кратковременная изменчивость температуры нижней стратосферы в меньшей степени зависит от фаз Южного колебания и в большей степени определяется особенностями циркуляции разных полушарий и широтных зон. Данные по состоянию озонового слоя показывают небольшое уменьшение концентрации озона везде, кроме тропического региона, при этом тренды статистически незначимы. Как и в случае с температурой воздуха, кратковременная изменчивость концентрации и содержания озона в меньшей степени зависит от фаз Южного колебания.

Короткопериодные изменения ТПО (Южное колебание) способствуют углублению Алеутского минимума и распространению потоков тепла в стратосферу, усиливая упорядоченный поток тепла в стратосферу, которые приводят к нагреву стратосферы и ВСП. Всё это оказывает воздействие на зональный ветер, ослабляя или даже обращая его, что способствует ослаблению СПВ. Усиление потоков тепла в стратосферу и ослабление зонального ветра на 10 м/с также способствует усилению меридионального переноса от экватора к полюсам, и, следовательно, усилению циркуляции Брюера-Добсона, что, в свою очередь, способствует усилению переноса температуры и озона из тропиков в полюса и увеличению температуры на 2 градуса и содержания озона на 2-5% в полярной стратосфере. Также это способствует усилению потока волновой активности, что приводит к неустойчивости и ослаблению планетарных волн Россби и переносу тепла посредством этих волн из тропосферы в стратосферу, а, значит, и ослаблению зонального переноса, разрушению СПВ и усилению меридиональных процессов в атмосфере. При этом все эти эффекты более ярко выражены в Северном полушарии, чем в Южном. Значит, Южное колебание оказывает более сильное воздействие на стратосферу Северного полушария, чем Южного.

Что касается общего глобального тренда по ТПО, потепление океана и нижней тропосферы также способствует усилению конвективных процессов в атмосфере, что приводит к возникновению потоков тепла в стратосферу и может способствовать ВСП. Всё это оказывает воздействие на зональный ветер, ослабляя его на 5 м/с, что приводит к ослаблению и распаду СПВ. Но этот эффект слабее, чем эффект от Южного колебания. Это также способствует усилению меридионального переноса и усилению циркуляции Брюера-Добсона, что, в свою

очередь, способствует увеличению температуры на 1 градус и содержания озона на 2%. Также это может способствовать усилению потока волновой активности и ослаблению планетарных волн Россби, но этот эффект значительно слабее, чем эффект Южного колебания. Всё это проявляется в Арктике, где, как известно, происходит «Арктическое усиление». В Антарктике эти эффекты практически не проявляются, и там СПВ и озоновые дыры значительно устойчивее, чем в Арктике – температура понижается на 1 градус, а содержание озона – на 2-5%.

Также показано, что повышение температуры воздуха в тропосфере связано, прежде всего, с повышением ТПО, тогда как уровень CO_2 играет меньшую роль в этом процессе. Это связано с тем, что зависимость температуры воздуха от концентрации CO_2 носит более сложный характер: изменения ТПО могут быть обусловлены нагревом воздуха из-за CO_2 , а ТПО, в свою очередь, усиливает этот нагрев. В стратосфере, наоборот, изменения ТПО играют меньшую роль по сравнению с уровнем CO_2 . В стратосфере при сценариях без учёта CO_2 температура воздуха меняется на 0.3-0.5 °С как в сторону похолодания, так и в сторону потепления. При сценарии с учётом CO_2 наблюдается похолодание стратосферы на 1-1.5 °С. Что касается озонового слоя, изменения ТПО также играют меньшую роль по сравнению с уровнем CO_2 . В стратосфере при сценариях без учёта CO_2 концентрация озона снижается на 0.06 ppm. При сценарии с учётом CO_2 концентрация озона мало меняется.

Основные публикации по теме работы. По теме работы было написано 7 научных работ, в том числе 7 публикаций в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов исследований:

1. Яковлев А.Р., Смышляев С.П. Численное моделирование глобального воздействия океана и явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья на структуру и состав атмосферы // Учёные записки РГГМУ, Выпуск № 49, 2017, с. 58-72.

2. Яковлев А.Р., Смышляев С.П. Влияние Южной осцилляции на динамику стратосферы и озоновый слой Арктики // Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана, Выпуск №55 (1), 2019, с. 85-97.

3. Jakovlev A.R., Smyshlyaev S.P. Simulation of influence of ocean and El-Nino – Southern oscillation phenomenon on the structure and composition of the atmosphere // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES), CITES-2019, 386 (2019) 012021.

4. Яковлев А.Р., Смышляев С.П. Численное моделирование воздействия Мирового океана на температуру и содержание озона в нижней и средней атмосфере // Метеорология и Гидрология, Выпуск №9, 2019, с. 25-37.

5. Smyshlyaev S.P., Galin V.Y., Blakitnaya P.A., Jakovlev A.R. Numerical Modeling of the Natural and Manmade Factors Influencing Past and Current Changes in Polar, Mid-Latitude and Tropical Ozone // Atmosphere 2020, 11(1), 76, <https://doi.org/10.3390/atmos11010076>

6. С.П. Смышляев, П.А. Блакитная, М.А. Моцаков, А.Р. Яковлев, М.В. Черепова. Моделирование изменчивости газового состава атмосферы в РГГМУ // Гидрометеорология и экология, Выпуск №60 (3), 2020, с. 219-240.

7. Jakovlev A.R., Smyshlyaev S.P., Galin V.Y. Interannual Variability and Trends in Sea Surface Temperature, Lower and Middle Atmosphere Temperature at Different Latitudes for 1980–2019 // Atmosphere 2021, 12, 454. <https://doi.org/10.3390/atmos12040454>

Публикации в других изданиях:

8. Яковлев А.Р. Численное моделирование воздействия явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья на температуру воздуха и содержание озона. / Яковлев А.Р., Смышляев С.П. // XIII конференция Международной Школы молодых учёных «Физика окружающей среды» - Томск, 2018.

9. Яковлев А.Р. Моделирование влияния океана и явления Эль-Ниньо – Южной осцилляции на структуру и состав атмосферы. / Яковлев А.Р., Смышляев С.П. // Международная молодёжная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES-2019 – Москва, 2019.

10. Яковлев А.Р. Влияние Южного колебания на состав и структуру тропосферы и стратосферы. / Яковлев А.Р., Смышляев С.П. // Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» - Санкт-Петербург, 2019.

11. Яковлев А.Р. Влияние Южного колебания на арктические процессы: сравнение результатов спутниковых измерений, ре-анализа и численного моделирования. / Яковлев А.Р., Смышляев С.П. // Семнадцатая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)» - Москва, 2019.

12. Яковлев А.Р. Численное моделирование влияния глобальных периодических колебаний на состав и структуру арктической стратосферы. / Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Ермакова Т.С., Яковлев А.Р., Галин В.Я. // Конференция «М.А. Петросянец и отечественная метеорология» - Москва, 2019.

13. Яковлев А.Р. Влияние Эль-Ниньо – Южной осцилляции на Арктическую стратосферу. / Яковлев А.Р., Смышляев С.П. // Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» - Санкт-Петербург, 2021.

Список использованных источников

Варгин П.Н., Володин Е.М. Анализ воспроизведения динамических процессов в стратосфере климатической моделью ИВМ РАН // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, том 52, № 1, 2016, с. 3-18.

Варгин П.Н., Коленникова М.А., Кострыкин С.В., Володин Е.М. Влияние аномалии температуры поверхности экваториальной и северной частей Тихого океана на стратосферу над Арктикой по расчетам климатической модели ИВМ РАН // Метеорология и Гидрология, Выпуск №1, 2021, с. 5-16.

Володин Е.М., Грицун А.С. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020, том 56, № 3, с. 255–266.

Галин В. Я., Смышляев С. П., Володин Е. М. Совместная химико-климатическая модель атмосферы. // Изв. РАН, Физ. Атм. и Океана. 2007. Том 43. №. 4. С. 399-412.

Зубов В.А., Розанов Е.В., Розанова И.В. и др. Моделирование глобальных изменений озона и атмосферной динамики в XXI веке с помощью химико-климатической модели SOKOL // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011, том 47, № 3, с. 330–342.

Коваль А.В. Расчёт остаточной меридиональной циркуляции по данным модели средней и верхней атмосферы // Учёные записки РГГМУ, №55, 2019, с. 25-32.

Лаппо С.С., Гулев С.К., Рождественский А.Е. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан-атмосфера и энергоактивные области Мирового океана. Л.: Гидрометиздат, 1990.

Andrews, D. G., Holton, J. R., and Leovy, C. B. (1987). Middle atmosphere dynamics. New York: Acad. Press. 489 p.

Brewer, A. W., 1949: Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapor distribution in the stratosphere. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 75, 351-363.

Dunkerton, T. (1978), On the mean meridional mass motions of the stratosphere and mesosphere, J. Atmos. Sci., 35, 2325–2333, doi:10.1175/1520-0469(1978)0352.0.CO;2.

Dobson, G. M. B., 1956: Origin and distribution of the polyatomic molecules in the atmosphere. Proc. R. Soc. London, Ser. A 236, 187-193.

Newman Paul A., Nash Eric R., Rosenfield Joan E. What controls the temperature of the Arctic stratosphere during the spring? // Journal of geophysical research, vol. 106, NO. D17, pages 19,999-20,010, September 16, 2001.

Plumb R. Alan On the Three-Dimensional Propagation of Stationary Waves // Journal of the Atmospheric Sciences, 1 February 1985, VOL. 42, NO. 3, pp. 217-229.

Solomon S, Dahe Q, Manning M, et al. (eds) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2007, Cambridge Univ Press: New York, 2007; pp. 996.

Taylor K.E., Williamson D., Zwiers F. The sea surface temperature and sea-ice concentration boundary conditions for AMIP II simulations // Program for climate model diagnosis and intercomparison, University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, September 2000.