

На правах рукописи



Бокучава Дарья Дмитриевна

**Особенности и механизмы потепления первой половины XX века
в Арктике.**

1.6.18 — Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт географии Российской академии наук».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
академик РАН,
Семёнов Владимир Анатольевич

Официальные оппоненты: **Дианский Николай Ардальянович**,
доктор физико-математических наук, главный
научный сотрудник, физический факультет,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова

Башмачников Игорь Львович,
кандидат географических наук,
доцент, Институт наук о Земле, Федеральное
государственное бюджетное учреждение
высшего образования Санкт-Петербургский
Государственный Университет

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки **Федеральный
Исследовательский Центр Морской
гидрофизический институт Российской
Академии Наук**

Защита состоится « » _____ 2023 г. в _____ часов на заседании диссертационного
совета 24.1.049.03 на базе ФГБУН «Институт географии Российской академии
наук» по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН
по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29 и на сайте Института:
<http://igras.ru/defences>

Автореферат разослан « _____ » _____ 2023 г.

Отзывы на автореферат (на бумажных носителях в двух экземплярах,
заверенные подписью и печатью и в электронном виде в формате PDF) просим
направлять по адресу 119017, г. Москва, Старомонетный пер, д. 29, ученому
секретарю Диссертационного совета 24.1.049.03, Титковой Т.Б. e-mail:
d00204604@igras.ru

Учёный секретарь Диссертационного Совета
Кандидат географических наук

Т.Б. Титкова

Общая характеристика работы

Актуальность работы

На протяжении XX века было зафиксировано два события интенсивного роста глобальной приземной температуры воздуха (ПТВ) – потепление первой половины века с 1920-х гг. по 1940-е гг., и современное потепление, с середины 1970-х гг. по настоящее время, разделенных периодом понижения температуры в 1950–1970-х годах.

До конца XX столетия потепление первой половины века не уступало по величине современному потеплению. В работе (Jones et al., 1999) отмечается, что положительные аномалии ПТВ в XX веке наблюдались в течение двух 20-летних периодов. Рост ПТВ составил $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 1925–1944 гг. и $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 1978–1997 гг. Долгопериодная динамика температурных аномалий в XX в. позволяет говорить о “раннем” периоде потепления как об отдельно стоящем событии, которое было сопоставимо по величине с современным потеплением, однако произошло в то время, когда рост выбросов парниковых газов в атмосфере был в 4–5 раз меньше, чем в последние десятилетия. (Delworth and Knutson, 2000; Johannesen et al., 2004; Thompson et al., 2015).

Потепление первой половины XX века достигло своего максимума в период 1940–1945 гг., в связи с чем в научном сообществе для его обозначения используется термин – Потепление середины XX века (ПСДВ).

Особенностью обоих событий потепления являются ярко выраженные положительные аномалии ПТВ в Северном полушарии (СП), особенно сильно проявляющиеся в арктических широтах в зимний сезон (Векрюаев et al., 2010; Yamanouchi, 2011; Бокучава и Семенов, 2018). Темпы Арктического потепления более чем вдвое превышали средние глобальные изменения как во время ПСДВ, так и в течение современного потепления. Недавние реконструкции ледового покрова (Матвеева и Семенов, 2021) указывают на значительную отрицательную аномалию площади арктического морского льда в период раннего потепления, связанную с усилением притока атлантической воды в Арктику.

Аномальные погодные явления во время ПСДВ наблюдались также за пределами Арктики, и не только в зимний, но и в летний сезон. Катастрофические пыльные бури и волны жары в 1930-х годах в Северной Америке, экстремально холодные зимы и летние засухи в 1940-х гг. в Европе, изменения в интенсивности Индийских муссонов и засухи в Австралии в середине XX века – могли быть связаны с ПСДВ (Hegerl et al., 2018; Porova et al., 2022).

Причины и механизмы формирования ПСДВ и его усиления в высоких широтах СП все еще остаются предметом дискуссий. Результаты численных экспериментов с климатическими моделями свидетельствуют о том, что важную роль в формировании аномалий климата играют внутренняя естественная изменчивость климата (Delworth and Knutson, 2005), обратные связи в климатической системе (Chen et al., 2018), внешние естественные факторы (Suo et al., 2013), внешние антропогенные факторы, в том числе

сульфатные и сажевые аэрозоли (Shindell and Fulavegi, 2009) и парниковые газы (Meehl et al., 2004). В качестве основной причины климатических аномалий исследователи указывают внутреннюю естественную изменчивость климатической системы «океан-морской лед-атмосфера» на различных масштабах (Bengtsson et al., 2004; Семенов, 2015), включая долгопериодную изменчивость (Алексеев, 2014). Примером такой изменчивости может быть Атлантическая мультидекадная осцилляция (Schlesinger and Ramankutty, 1994), в последние 100 лет согласованная с изменениями температурных аномалий в СП и в Арктике (Семенов и др., 2010).

Результаты многих исследований указывают на то, что описанное событие было вызвано комбинированным эффектом долгопериодных колебаний режимов изменчивости атмосферы и океана в Северной Атлантике и Северной части Тихого океана с заметным вкладом внешнего радиационного воздействия, связанного со снижением вулканической активности, изменениями солнечной радиации и увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере из-за антропогенных выбросов (Bokuchava and Semenov, 2020; 2021; Hegerl et al., 2018). Кроме того, изменения климата в высоких широтах СП было усилено рядом положительных обратных связей (Бокучава и Семенов, 2022; Семенов, 2015).

Оценка вклада внутренней изменчивости и внешних природных и антропогенных факторов в изменения климата в Арктике в первой половине XX века является фундаментальной задачей климатологии, решение которой способствует пониманию исторической и современной динамики климата. Анализ изменений ПТВ в высоких широтах СП в XX веке позволяет выявить возможные механизмы естественной и внешней изменчивости климата и положительных обратных связей в арктической климатической системе, способствующих усилению климатических изменений.

Целью диссертационной работы является исследование механизмов формирования долгопериодной положительной температурной аномалии в Арктике в первой половине XX века и оценка вклада внутренней естественной изменчивости в аномалии ПТВ.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

Провести анализ пространственно-временной структуры изменчивости приземной температуры и давления на уровне моря в арктических широтах, с использованием данных наблюдений и реанализов, охватывающих период с начала XX века.

Определить наиболее достоверные и качественные массивы данных реанализов для анализа климатических характеристик периода ПСДВ.

Выполнить аналитический обзор возможных механизмов потепления XX века с оценкой их достоверности с учетом современных исследований динамики климата.

Исследовать структуру изменчивости ведущих мод атмосферной циркуляции и температуры поверхности океана во внетропических широтах СП.

Получить количественные оценки вклада основных режимов естественной изменчивости атмосферы и океана в Арктике в целом и в ее отдельных регионах по данным наблюдений и реанализов.

Объект исследования – долгопериодные изменения приземной температуры воздуха в Арктическом регионе в XX веке.

Предмет исследования – региональные особенности, тенденции и возможные причины колебаний приземной температуры воздуха в период потепления первой половины XX века.

Положения выносимые на защиту

1. Согласно результатам анализа пространственно-временной структуры изменчивости приземной температуры воздуха в XX веке, ПСДВ в высоких широтах СП в наибольшей степени проявилось в зимний сезон, было сильнее выражено в восточной Арктике, а также сравнимо с потеплением в современный период по темпам роста температуры.

2. Выявлены существенные различия, в том числе качественного характера, тенденций изменений температуры и давления в первой половине XX века между массивами данных наблюдений и тремя существующими реанализами XX века, что не позволяет рассматривать реанализы XX века как полноценную замену отсутствующим наблюдениям. Изменения приземной температуры воздуха и давления на уровне моря в высоких широтах СП на протяжении XX века были наиболее реалистично воспроизведены реанализами CERA20C и ERA20C, в то время как реанализ NOAA20C воспроизводит аномалии температуры и давления значительно хуже в течение столетия.

3. Согласно аналитическому обзору современных исследований, основной вклад в ПСДВ в Арктике внесли факторы внутренней изменчивости климата (Атлантическая мультидекадная осцилляция, Тихоокеанская декадная осцилляция, Северо-Атлантическое колебание и Тихоокеанско-северо-Американское колебание). Также на формирование ПСДВ оказали влияние факторы внешнего воздействия на климат – солнечная и вулканическая активность, антропогенные аэрозоли и парниковые газы, но их вклад не являлся существенным.

4. Ведущие моды естественной изменчивости атмосферы и океана (Северо-Атлантическое колебание и Тихоокеанско-северо-Американское колебание, Атлантическая мультидекадная осцилляция, Тихоокеанская декадная осцилляция) объясняют более 70% многолетней изменчивости ПТВ зимой в Арктике в XX веке, после вычета линейного векового тренда. Преобладающий вклад вносит внутренняя мультидекадная изменчивость температуры поверхности океана в Северной Атлантике.

Научная новизна

Впервые систематизированы и подробно проанализированы возможные механизмы формирования ПСДВ в Арктических широтах.

Впервые получены количественные оценки достоверности качества сеточных массивов данных (наблюдений и реанализов), применимых для

анализа приземной температуры воздуха и давления в период ПСДВ во внетропических широтах СП.

Впервые выполнен комплексный статистический анализ вклада основных мод естественной изменчивости циркуляции атмосферы и температуры поверхности океана в изменения ПТВ в XX веке в Арктике, в том числе для отдельных ее регионов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Понимание механизмов формирования ПСДВ и усиления его амплитуды в высоких арктических широтах является фундаментальной задачей исследования динамики климатической системы. В силу остающейся неопределенности факторов, оказывающих влияние на формирование ПСДВ, анализ «раннего» периода потепления и сравнение его основных характеристик с современным потеплением важны для исследования климатических процессов, происходящих в последние десятилетия, а также для моделирования как региональных, так и глобальных будущих изменений климата.

В диссертационной работе получены новые результаты и уточнены уже имеющиеся знания о событии ПСДВ. Сделан обширный новый аналитический обзор с учетом последних исследований возможных механизмов формирования ПСДВ в Арктике. Кроме этого, выполнен комплексный анализ качества воспроизведения климатических характеристик в наиболее современных массивах данных, охватывающих период с начала XX века и даны количественные оценки вклада ведущих мод естественной изменчивости атмосферы и океана в изменения ПТВ в Арктике в целом и отдельно в ее регионах, что может быть использовано для совершенствования климатических прогнозов.

Достоверность полученных результатов определяется объективным сопоставлением современных массивов данных об изменениях характеристик атмосферы и океана: сеточных архивов, основанных на данных эмпирических наблюдений на метеорологических станциях, а также реанализов и результатов моделирования будущих изменений климата. Все количественные оценки получены с применением обоснованных статистических методов и сопровождаются оценками точности. Также достоверность результатов работы подтверждается согласованностью с результатами современных исследований механизмов изменений климата в первой половине XX века. Текст диссертации полностью написан автором за исключением случаев, где указаны цитируемые источники. Оригинальные результаты опубликованы в ведущих для данной специальности журналах, а также представлены на конференциях, в том числе международных.

Апробация работы

Результаты диссертационного исследования были представлены на отечественных и зарубежных конференциях и семинарах: Международная школа-конференция молодых ученых «Климат и эколого-географические проблемы Российской Арктики» (Апатиты, 2016); Неделя Арктического

научного саммита «Динамика Арктики в условиях глобальных изменений» (Arctic Science Summit Week «A Dynamic Arctic in Global Change») (Прага, 2017); 22-я Международная школа-конференция молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Майкоп, 2018 г.); Тематическая конференция международного географического союза, посвященная 100-летию Института географии РАН «Практическая география и вызовы XXI века» (Москва, 2018г.); Ассамблея Европейского геофизического союза (European Geosciences Union General Assembly) (Вена, 2018); XIII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу (Томск 2019г.); Международная научно-техническая конференция «Системы контроля окружающей среды» (Севастополь, 2017); Международные Симпозиумы «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск 2018г., Москва 2020г.).

Личный вклад автора

Все научные результаты представляемой диссертационной работы получены автором лично или в соавторстве с д.ф.-м.н. В.А. Семеновым. В ходе выполнения диссертационной работы автор участвовал в формулировке цели и постановке задач, обсуждении и интерпретации полученных результатов, формулировке выводов, подготовке публикаций в рецензируемых научных изданиях. Автором самостоятельно проводились обработка и анализ данных наблюдений, реанализов и климатических моделей с использованием статистических методов. Автору принадлежит ведущая роль в написании научных статей по заявленной тематике и в представлении научных докладов.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность и искреннюю благодарность своему научному руководителю, академику РАН, доктору физико-математических наук Семенову Владимиру Анатольевичу за всестороннюю поддержку в период подготовки диссертации, а также всем сотрудникам лаборатории климатологии Института географии РАН за внимание и интерес, проявленные к выполненной работе. Автор выражает особую благодарность к.г.н. Поповой В.В. и д.ф.-м.н. Семенову С.М. за полезную критику и комментарии к тексту диссертационной работы. Автор выражает признательность д.ф.-м.н. Елисееву А.В. и д.г.н. Черенковой Е.А. за советы и поддержку при подготовке диссертационной работы. Автор также признательна преподавательскому составу кафедры метеорологии и климатологии Географического факультета МГУ за конструктивное обсуждение результатов работы. Автор искренне благодарна всем родным и близким, в особенности своему дедушке Байкову Валерию Владимировичу, без поддержки которых написание данной работы было бы невозможно.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 261 наименований работ отечественных и зарубежных авторов, 12 приложений, и содержит 171 страницу, включая 36 иллюстраций и 4 таблицы в основном тексте, а также 13 иллюстраций в приложениях.

Содержание работы

Во введении описывается событие потепления первой половины XX века в Арктике, обоснована актуальность работы, ее научная новизна и значимость анализа климатических изменений исследуемого периода, сформулированы цели и задачи исследования, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 дается подробная характеристика ПСДВ, исследованы долгопериодные изменения глобальной приземной температуры воздуха, а также температуры и ледовитости в Арктике в XX–начале XXI-го вв., проведено сравнение пространственно-временных особенностей потепления середины XX века во внетропической зоне СП с современным потеплением.

В разделе 1.1 приведен исторический обзор исследований ПСДВ и причин его возникновения. Проанализированы многолетняя изменчивость глобальной ПТВ в СП и ее тенденции в XX–начале XXI-го вв. (**рис. 1А**). Изучены региональные различия в характере пространственного распределения аномалий ПТВ в Арктических широтах в первой половине XX столетия, выявленные другими исследователями. **В разделе 1.2** исследованы пространственно-временные особенности потепления первой половины XX века во внетропической зоне СП, проиллюстрирована динамика изменений аномалий ПТВ в различных широтных зонах, а также в Арктическом регионе в течение XX–начале XXI веков (**рис. 1Б**). Установлено, что потепление в Арктике было неоднородным, показаны региональные различия ПСДВ в четырех арктических секторах. Перечислены основные гипотезы, объясняющие событие ПСДВ и усиление его проявления в высоких широтах СП. **В разделе 1.3** описан эффект Арктического усиления, его особенности и связь с различными положительными радиационными и динамическими / термодинамическими обратными связями, а также с различными режимами внутренней изменчивости климата. **В разделе 1.4** приводятся оценки вариаций среднегодовой площади арктических морских льдов в течение XX–начала XXI веков.

В Главе 1 на основе анализа данных наиболее современных массивов климатических характеристик делается вывод о том, что ПСДВ в Арктике сравнимо с современным периодом по темпам роста температуры. Показано, что событие ПСДВ проявлялось в СП сильнее, чем в Южном полушарии (ЮП), а в Арктическом регионе – в несколько раз сильнее, чем в СП. По результатам анализа литературных источников сделан вывод, что точные причины ПСДВ до сих пор не определены. Понимание причин формирования ПСДВ и последующего похолодания является ключом к определению относительного вклада внутренней естественной изменчивости на фоне отклика на внешние, в том числе антропогенные воздействия, в глобальные изменения климата на многолетнем временном масштабе.

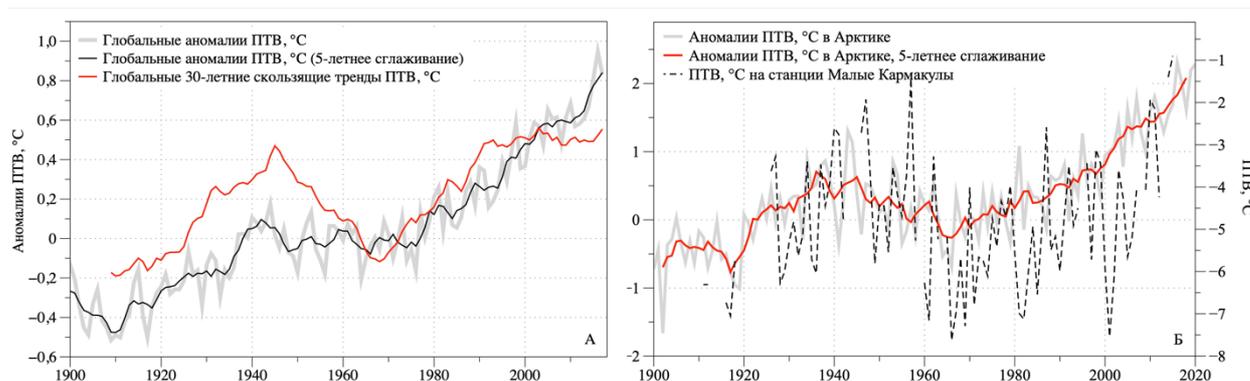


Рисунок 1. А – 30-летние скользящие тренды глобальных среднегодовых аномалий ПТВ ($^{\circ}\text{C} / 30$ лет, базовый период 1961–1990) согласно массиву данных BERKLEY (Rohde et al., 2013). Год соответствует концу 30-летнего скользящего окна. Б – среднегодовая ПТВ, $^{\circ}\text{C}$ на метеостанции «Малые Кармакулы» ($72^{\circ} 22'24''$ с.ш., $52^{\circ} 43'00''$ в.д.) (черная пунктирная кривая); среднегодовые аномалии ПТВ, $^{\circ}\text{C}$, с 5-летним скользящим сглаживанием (красная линия) и без сглаживания (серая линия) для Арктического региона ($60\text{--}90^{\circ}$ с.ш.), согласно массиву данных HadCRUT5 (Morice et al., 2021).

В **Главе 2** представлен анализ особенностей изменений ПТВ и давления на уровне моря (ДУМ) в течение XX–начале XXI-го вв. с использованием сеточных массивов данных наблюдений (HadCRUT5, GISTEMP NASA, BERKLEY EARTH) и реанализов, охватывающих исследуемый период ПСДВ (ECMWF – ERA20C, CERA20C и NOAA-CIRES-DOE – NOAA20C).

Описание используемых массивов данных и методов анализа приведены в **разделе 2.1** и **2.2** соответственно. Привлечение данных различных источников обусловлено тем, что исследование причин потепления первой половины XX века затруднено недостаточным количеством и качеством климатических данных, особенно в полярных широтах (Bekryaev et al., 2010). В **разделе 2.3** произведено сравнение пространственного и временного распределения аномалий среднегодовых трендов ПТВ, аномалий среднегодовых и зимних трендов ПТВ и ДУМ, сезонных различий по данным наблюдений и реанализов. Проанализировано пространственное распределение трендов температуры и оценка их статистической значимости по перечисленным массивам данных для различных климатических периодов с начала XX века.

На **рисунке 2** проиллюстрированы многолетние изменения ПТВ в Арктике для различных массивов данных наблюдений в конце XIX–начале XXI вв. (**рис. 2А**) и реанализов в XX–начале XXI вв. (**рис. 2Б**). Показано, что изменения ПТВ в период ПСДВ по данным реанализов имеет существенные различия с эмпирическими массивами данных в первой половине XX века.

Изменения среднегодовых аномалий температуры для Арктического региона наиболее реалистично воспроизводит реанализ CERA20C на протяжении всего XX века, в то время как период ПСДВ в реанализе NOAA20C выражен слабо (**рис. 2Б**).

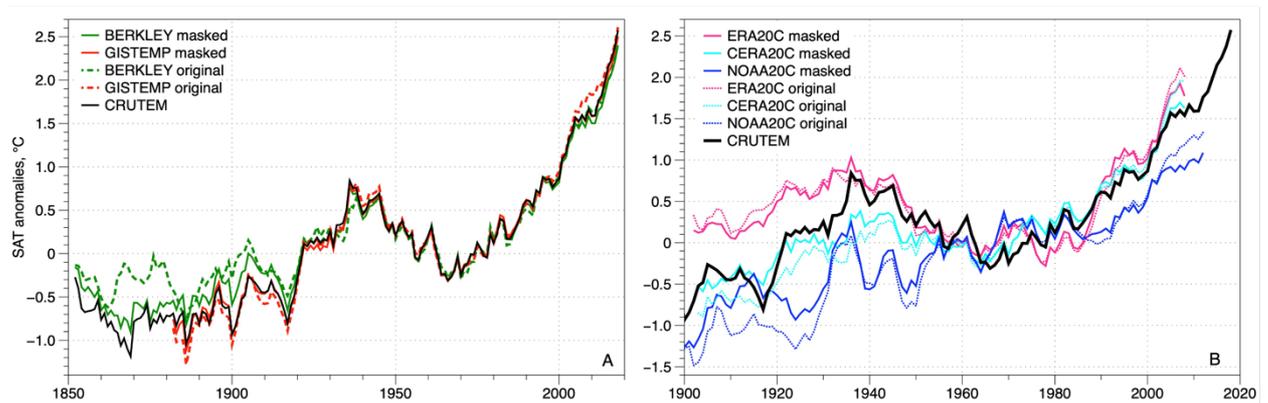


Рисунок 2. Среднегодовые аномалии ПТВ в Арктике ($60\text{--}90^\circ$ с.ш.) по данным массивов: А – по данным наблюдений CRUTEM5 (черная линия), GISTEMP (красная линия); BERKLEY (зеленая линия) – данные с оригинальным покрытием, и в соответствии с отсутствующими значениями в массиве CRUTEM5 (прерывистые линии); Б – по данным реанализов ERA20C (розовая линия), CERA 20C (голубая линия), NOAA 20C (синяя линия) – данные с оригинальным покрытием, а также в соответствии с отсутствующими значениями в массиве CRUTEM5 (прерывистые линии); 5-летнее скользящее среднее.

Выполненный в **разделе 2.3** анализ распределения зонально усредненных аномалий ПТВ за период 1900–2010 гг., также показал их существенные отличия по данным различных реанализов для Арктического региона. В **разделе 2.4** проанализированы сезонные особенности изменений аномалий ПТВ в Арктике. Успешность воспроизведения климатических аномалий температуры в высоких широтах СП в реанализах существенно зависит от сезона, что не позволяет выделить какой-либо продукт как однозначно наиболее успешный. Обнаружено, что в целом, для средне-сезонных климатических аномалий первой половины XX века, CERA20C показал лучший результат для всех сезонов кроме осени, где это реанализ уступил ERA20C по согласованности с данными наблюдений. Сделан вывод о том, что пространственное распределение трендов аномалий ПТВ в период ПСДВ по данным наблюдений наиболее согласовано с их распределением согласно данным реанализа ERA20C.

Пространственное распределение трендов ПТВ и давления во внетропических широтах СП для трех климатических 30-летних периодов в XX веке представлены в **разделе 2.5**. Оценка статистической значимости температурных трендов, представленная на **рисунке 3**, показала, что для всех массивов данных реанализов значимые тренды во внетропических широтах СП охватывали наибольшую площадь как в период современного потепления, так и в период ПСДВ. Период похолодания в 1946–1975 гг. характеризуется наименьшей площадью покрытия значимыми трендами изменений ПТВ, а реанализ NOAA20C показывает положительные статистически значимые тенденции почти по всему Арктическому региону в указанный период.

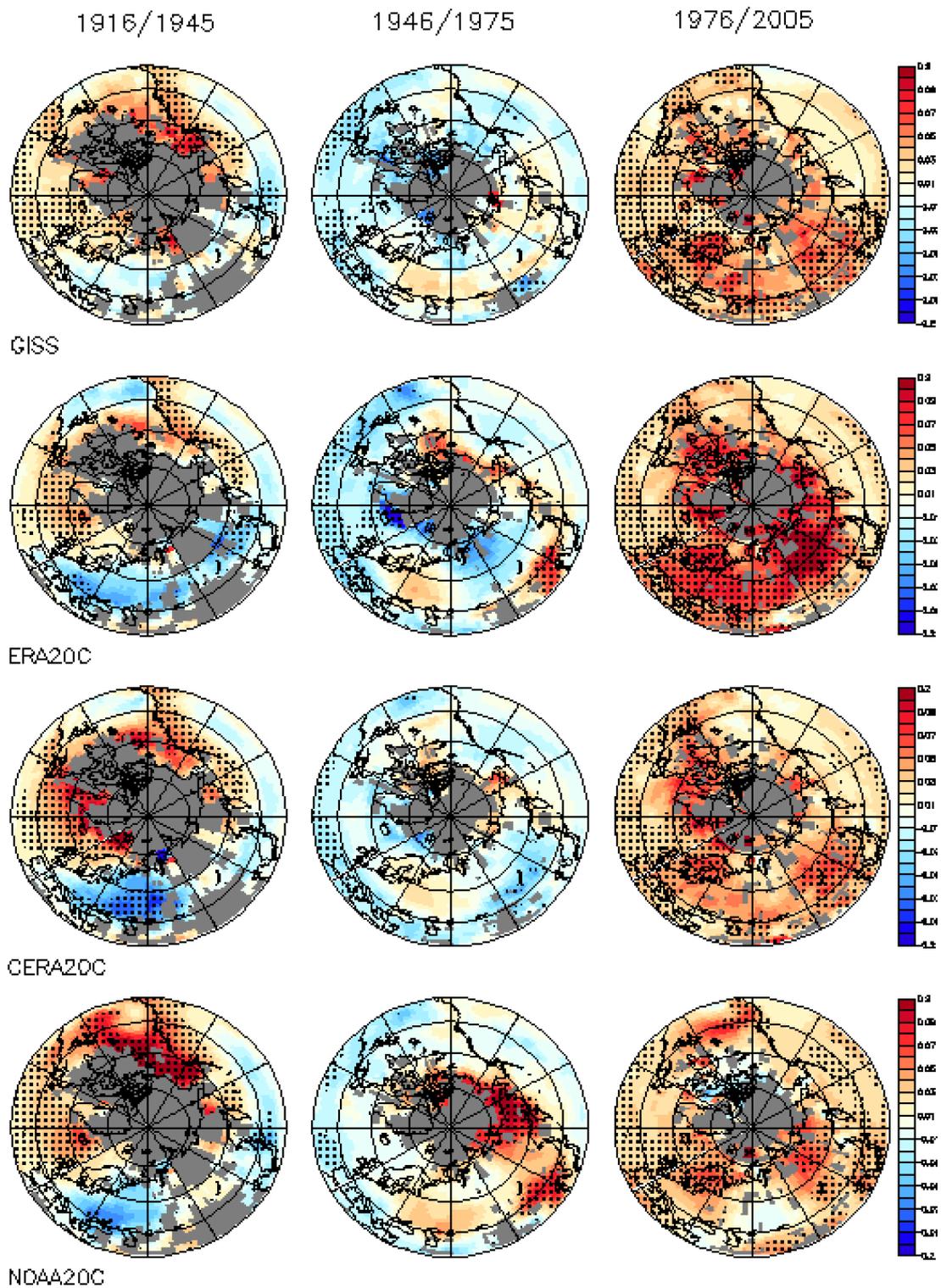


Рисунок 3. Тренды среднегодовой ПТВ ($^{\circ}\text{C}/30$ лет) во внетропических широтах СП ($30\text{--}90^{\circ}$ с.ш.) по данным наблюдений GISTEMP (первый ряд) и реанализов ERA20C (второй ряд), CERA20C (третий ряд), NOAA20C (четвертый ряд), для трех 30-летних климатических периодов: 1916–1945 гг. (левая колонка), 1946–1975 гг. (средняя колонка) и 1976–2005 гг. Регионы со статистически значимыми коэффициентами трендов (уровень значимости 1%) отмечены точками. Данные реанализов приведены к отсутствующим значениям в данных GISTEMP.

Результаты анализа корреляции аномалий ПТВ и ДУМ для разных широтных зон СП между данными наблюдений и реанализов в XX–начале XXI вв., представленные в **разделе 2.6** показывают, что наименьшие значения пространственной корреляции между полями аномалий ПТВ и ДУМ наблюдаются для арктического региона (60–90°с.ш.) в первые десятилетия XX века и составляют < 0.2 , а высокие значения коэффициентов корреляции (0.8–0.9) между полями как ПТВ, так и ДУМ, наблюдаются, начиная с 1950-х гг. (**рис. 4 А,Б**)

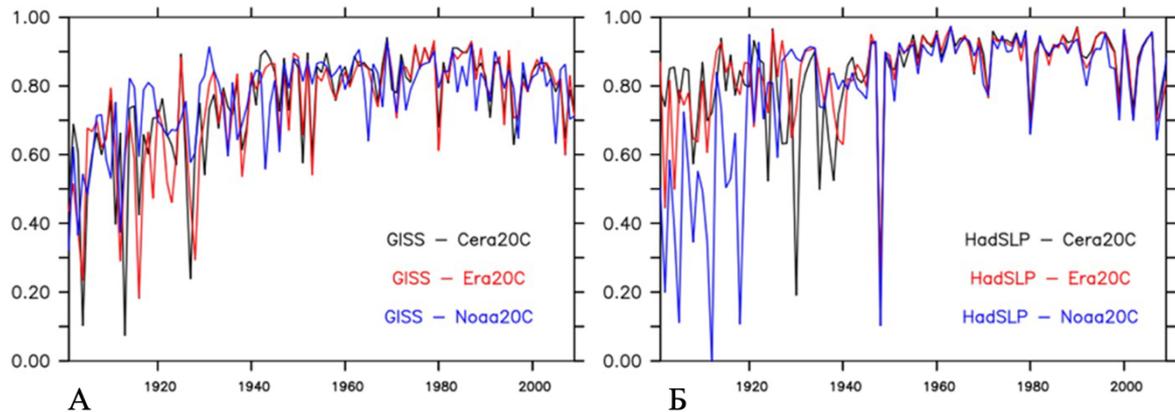


Рисунок 4. Пространственная корреляция полей аномалий ПТВ (А) и ДУМ (Б) между данными наблюдений GISTEMP и HadSLP2 и реанализами ERA20C, CERA20C, NOAA20C в зимний сезон (декабрь–февраль) для Арктических широт (60–90°с.ш.)

В **разделе 2.7** с помощью метода эмпирических ортогональных функций (ЭОФ-анализа) исследованы особенности структуры атмосферной циркуляции во внетропических широтах СП в зимний сезон для периода 1900–2010 гг. (**рис. 5**). Анализ показал, что пространственная согласованность между реанализами и данными наблюдений для второй и третьей ведущих мод изменчивости аномалий ДУМ значительно ниже во время ПСДВ (1911–1950 гг.) по сравнению с первой ЭОФ-модой. При этом реанализ NOAA20C показывает наиболее сильные расхождения с данными наблюдений в первой половине века. Существенные отличия выявлены и для реанализов ERA20C и CERA20C.

В конце **Главы 2** сделаны выводы о том, что при анализе изменений ПТВ и ДУМ в период ПСДВ с использованием данных реанализа следует учитывать выявленные расхождения и проводить валидацию данных реанализов с использованием доступных региональных данных наблюдений. Помимо этого установлено, что эволюция и пространственно-временные закономерности аномалий ПТВ и ДУМ во внетропических широтах СП на протяжении XX века были более реалистично воспроизведены реанализами ECMWF (наиболее успешно в случае CERA20C). В то время, как NOAA20C воспроизводит аномалии температуры и давления значительно хуже в течение столетия.

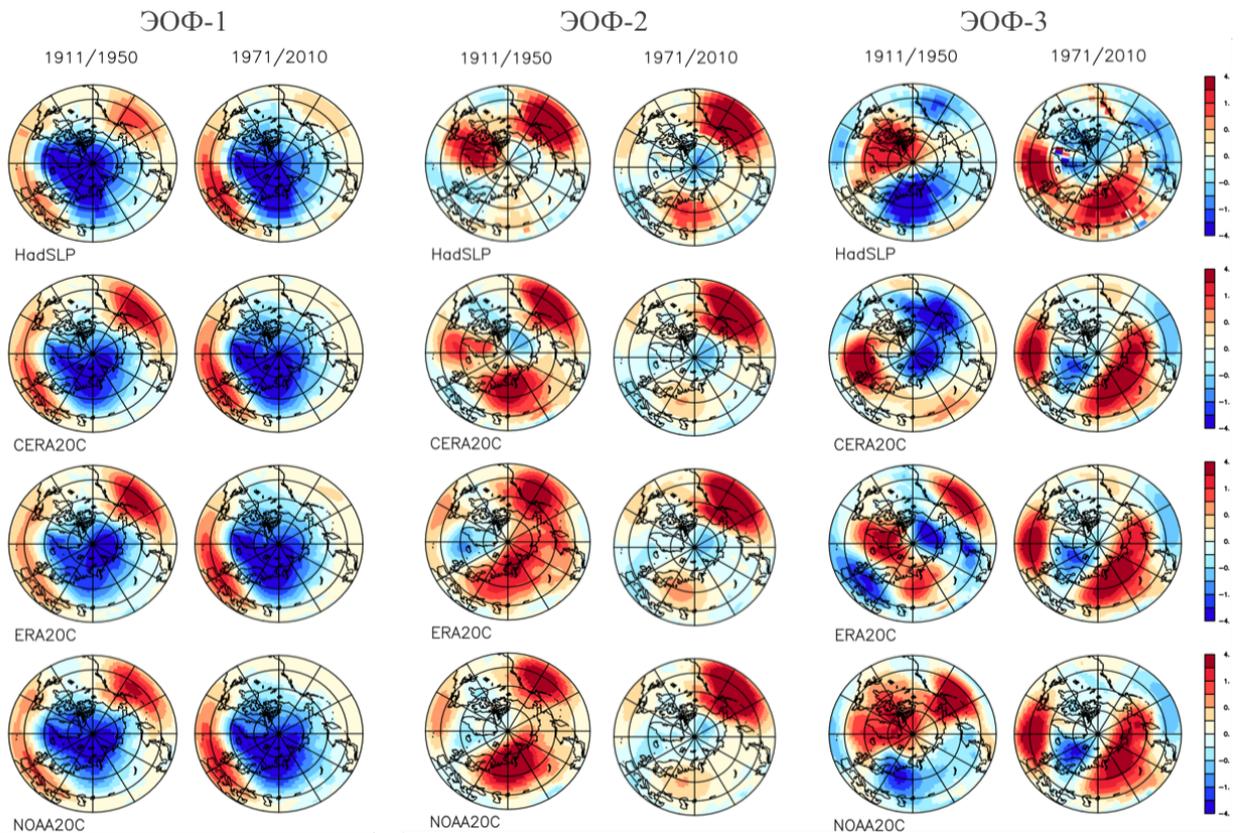


Рисунок 5. Пространственная структура трех ведущих мод (ЭОФ 1–3) аномалий ДУМ для внетропических широт СП (30–90°с.ш.) в зимний сезон (декабрь–февраль) для двух климатических периодов, 1911–1950 гг. и 1971–2010 гг.

В **Главе 3** представлен аналитический обзор исследований на тему события потепления первой половины XX века в Арктике, обсуждаются возможные механизмы формирования ПСДВ за счет внутренней и внешней изменчивости климата и внешних воздействий, в том числе антропогенных. Дается подробное описание каждого механизма, приводящего к климатическим изменениям в регионе. Установлено, что до сих пор не выделено теории, однозначно объясняющей ПСДВ и природу его максимального проявления в высоких широтах СП. Климатические модели указывают на важную роль внутренней естественной изменчивости климата (Delworth, Knutson, 2005), обратных связей в климатической системе (Chen et al., 2018; Bengtsson et al., 2004), внешних естественных факторов (Suo et al., 2013; Nozawa et al., 2005), внешних антропогенных факторов, в том числе сульфатных и сажевых аэрозолей (Booth et al., 2012; Shindell and Fulavegi, 2009) и парниковых газов (Meehl et al., 2004) в формировании этой климатической аномалии.

Проведенный анализ данных ансамбля моделей климата CMIP поколений 3, 5 и 6 показывает, что амплитуда ПСДВ в Арктике значительно занижается в средних по ансамблю аномалиях температуры для моделей всех поколений, в отличие от периода современного потепления (**рис. 6А**). Это может указывать на важную роль внутренней изменчивости климата в том

числе и на междекадных временных масштабах (Johannessen et al., 2004; Semenov et al., 2010; Семенов, 2015). В то же время некоторые из реализаций способны достаточно хорошо воспроизвести динамику изменений температуры в Арктике в XX веке (**рис. 6Б**), что подразумевает важную роль случайной внутренней динамики климата в формировании ПСДВ.

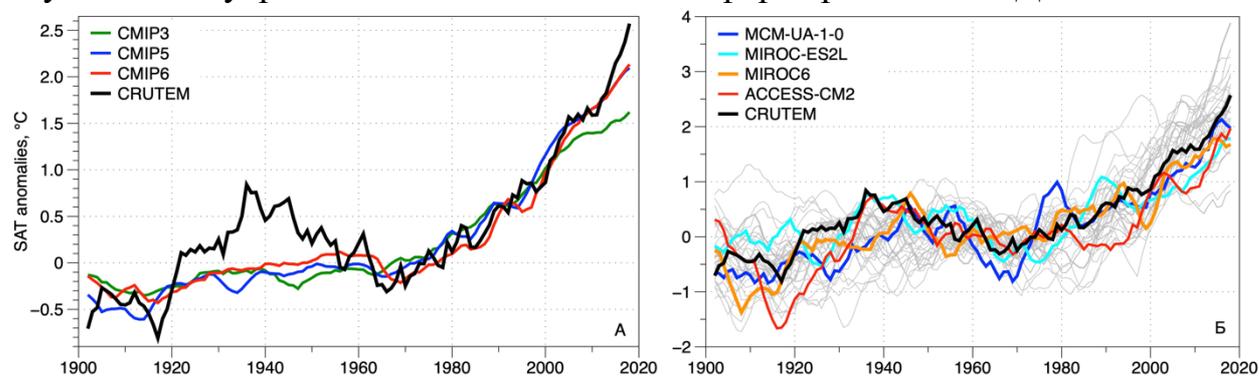


Рисунок 6. Среднегодовые аномалии ПТВ в Арктике ($60\text{--}90^\circ$ с.ш.): А – среднее значение по ансамблям моделей: CMIP3 (зеленая линия); CMIP5 (синяя линия); CMIP6 (красная линия), CRUTEM5 (черная линия); Б – отдельные реализации из ансамблевых расчётов моделей ансамбля CMIP6 (серые линии) с выделенными цветом реализациями: MCM-UA-1-0 (синяя линия); MIROC-ES2L (голубая линия); MIROC6 (оранжевая линия); ACCESS-CM2 (красная линия), которые демонстрируют долгопериодные изменения ПТВ, схожие с данными наблюдений CRUTEM5 (черная линия). Все данные усреднены в соответствии с пропущенными данными в архиве CRUTEM5, 5-летнее скользящее среднее.

В разделе 3.1 обсуждаются механизмы, связанные с внутренней изменчивостью системы океан-атмосфера. Приведено описание ведущих мод естественной изменчивости атмосферы и океана, имеющих наибольшее воздействие на климат внетропических широт СП. Результаты анализа внутренней изменчивости температуры поверхности океана (ТПО) указывают на то, что она является одним из наиболее вероятных механизмов, который объясняет значительную часть ПСДВ во внетропических широтах СП. При этом долгопериодной изменчивости Северной Атлантики, характеризуемой Атлантической мультидекадной осцилляцией (АМО), отводится ведущая роль в формировании ПСДВ. Вместе с тем, как показывают недавние исследования, Тихоокеанская декадная осцилляция (ТДО) может играть не менее важную роль в поступлении тепла в высокие широты СП в первой половине XX века, чем АМО (Wegmann et al., 2017).

А некоторые модельные эксперименты выделяют ТДО как основной фактор формирования ПСДВ (Svendsen et al., 2018), хотя в настоящее время отсутствуют точные количественные оценки вклада изменений климата в Атлантическом и Тихоокеанском секторах в ПСДВ. Отмечается, что ТДО также сильно взаимосвязано с феноменом Эль Ниньо-Южное Колебание (ЭНЮК; Yu, Zwiers, 2007), которое является основным источником

предсказуемости ТДО и играет ключевую роль в его формировании (Nidheesh et al., 2017). Временная изменчивость перечисленных мод естественной изменчивости температуры поверхности океана в течение XX–начала XXI вв. представлена на **рисунке 7**. Внутренняя динамика атмосферы может также оказывать влияние на ПТВ в Арктике в первой половине XX века, что позволяет предположить вклад как атлантического (Северо-Атлантическое колебание – САК), так и тихоокеанского (Тихоокеанско-северо-Американское колебание – ТСАК) секторов в перенос теплых морских воздушных масс в Арктику (Wegmann и др., 2017).

Во многих работах (Delworth, Knutson, 2005; Shiogama et al., 2006; Yamanouchi, 2011; Hegerl et al., 2018) показано, что внутренняя изменчивость как единственный фактор не способна объяснить всю амплитуду колебаний ПТВ в первой половине XX века, и должна дополняться естественным и антропогенным внешним воздействием и/или положительными обратными связями.

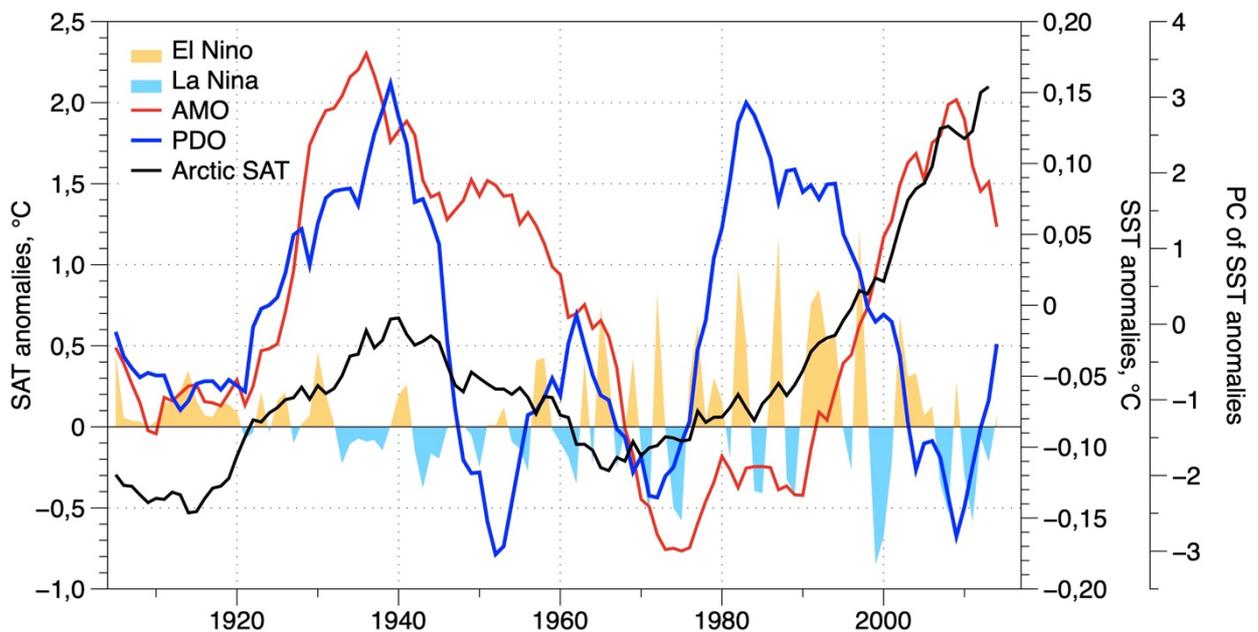


Рисунок 7. Океанический индекс Ниньо – фаза Эль-Ниньо (желтая кривая), Ла-Нинья (голубая кривая); АМО (красная кривая); ТДО (синяя кривая) по данным наблюдений HadISST4; аномалии среднегодовой ПТВ (°C) в Арктике (60–90° с.ш.) за период 1905–2018 гг. по данным наблюдений HadCRUT5 (черная кривая); 5-летнее скользящее среднее.

В **разделе 3.2** рассматривается роль обратных связей в Арктической климатической системе, способствующих усиленным вариациям климата в регионе. Изменения температуры в Арктике могут быть, в частности, первоначально вызваны колебаниями региональной динамики атмосферы и океана, а затем значительно усилены положительными обратными связями в климатической системе Арктики (Bengtsson et al., 2004). Механизмы, связанные с естественным внешним воздействием на глобальные и региональные климатические изменения, такие как солнечная радиация и

вулканическая активность, проанализированы в **разделе 3.3**. В целом, по результатам исследований на основе анализа эмпирических данных, можно сделать вывод об относительно незначительной роли солнечной активности в изменчивости ПТВ в период ПСДВ. Статистические модели, основанные на наиболее достоверных данных XX столетия оценивают вклад солнечной активности в изменения температуры в XX веке как относительно небольшой по сравнению с другими факторами, согласно современным оценкам, как не превышающий 0.15 °C (Leand and Rind, 2008). Пауза в интенсивной вулканической активности в 1920–1960гг. также могла внести вклад в формирование события раннего потепления.

Результаты экспериментов с климатическими моделями показывают, что даже совместного воздействия внешних естественных и антропогенных факторов недостаточно для полного объяснения события ПСДВ целиком (Nozawa et al., 2005; Suo et al., 2013).

В **разделе 3.4** обсуждаются факторы внешнего антропогенного воздействия на климатическую систему: антропогенные газы (CO₂, CH₄, N₂O) и антропогенные аэрозоли, в частности черный углерод, имеющий существенное значение для Арктического региона. Вклад антропогенного аэрозольного воздействия в ПСДВ – концепция, которая в последнее время широко обсуждается (Booth et al., 2013; Zhang et al., 2015). Благодаря различным физическим механизмам, включая прямые и косвенные радиационные эффекты, аэрозоли могут частично компенсировать или, наоборот, усиливать положительное радиационное воздействие, вызванное ростом CO₂. Изменения концентрации аэрозолей, возможно, могли воздействовать на эволюцию ПТВ в Арктике за последнее столетие, но количественные оценки вклада данного воздействия в ПСДВ остаются наиболее неопределенными. Исследования, проведенные по стационарным данным в Арктическом регионе, указывают на возможный вклад в ПСДВ черного углерода, концентрации которого в атмосфере были относительно высокими в первой половине XX века (McConnel et al., 2007).

Изменения температуры в современный период обусловлены в первую очередь антропогенным увеличением парниковых газов, но роль этого фактора в период ПСДВ не может быть доминирующей, т.к. интенсивный рост концентраций парниковых газов начался уже после 1940-х гг. Однако, согласно проанализированным модельным экспериментам, антропогенное воздействие может вносить заметный вклад наряду с внешними природными факторами и внутренней изменчивостью климата.

Таким образом, согласно проведенному аналитическому обзору, в конце **Главы 3** делается вывод о том, что ПСДВ в северных внетропических широтах может быть связано с внутренней изменчивостью климата как основным фактором, усиленной положительными обратными связями в Арктике, в сочетании с относительно небольшим внешним природным и антропогенным воздействием.

В **Главе 4** анализируется пространственно-временная структура изменчивости климатической системы в XX веке в Арктике. Выполнен

аналитический обзор, проведен множественный регрессионный анализ для оценки воздействия внутренней естественной изменчивости атмосферы и океана на многолетние изменения зимней ПТВ в Арктике и отдельно в ее регионах в течение XX века как по данным наблюдений, так и по данным реанализов. Приведены оценки вклада атмосферно-океанических индексов в колебания ПТВ в Арктических широтах ($60\text{--}90^\circ$ с.ш.) в различных долготных секторах.

В разделе 4.1 даются определения и характеристики ведущих мод внутренней изменчивости атмосферы и океана во внетропических широтах СП. Ведущими модами атмосферных дальних связей во внетропических широтах СП являются индексы атмосферной циркуляции САК и ТСАК. Обе моды имеют наибольшую амплитуду в зимние месяцы (декабрь–март).

Океанический индекс АМО характеризует долгопериодные колебания аномалий ТПО в Северной Атлантике с периодом около 65–80 лет (Schlesinger and Ramankutti, 1994; Delworth and Mann 2000). Индекс ТДО отражает вариации аномалий ТПО в северной части Тихого океана от 20° до 90° с.ш. (Mantua et al., 1997). Изменения индексов АМО и ТДО по данным HadISST4 за период 1900–2018 гг. представлены на рисунке 7.

Перечисленные моды атмосферной и океанической внутренней изменчивости взаимосвязаны, что затрудняет количественную оценку вклада каждой составляющей. Например, на межгодовых временных масштабах аномалии атмосферной циркуляции над северной частью Тихого океана тесно связаны с изменениями ТПО в тропической части Тихого океана, в свою очередь связанными с явлением ЭНЮК (Trenberth et al., 1998). События Эль-Ниньо/Ла-Нинья, в свою очередь, могут воздействовать на индекс САК (Deser et al., 2009), а колебания САК могут быть обусловлены многолетней изменчивостью АМО (Zhang et al., 2019). В работе (Johannessen et al., 2016) обнаружено, что изменчивость ПТВ в Арктике в значительной степени связана с АМО. С другой стороны, получены неоднозначные оценки связи АМО с удаленными от Северной Атлантики регионами. Например, в исследовании (Ruprich-Robert et al., 2017) показано, что вариации АМО вызывают отклик в Тихоокеанском регионе, который выражается в колебаниях ТДО и ТСАК, а также воздействуют на увеличение частоты возникновения событий Эль-Ниньо или Ла-Нинья по данным модельных экспериментов CMIP5. Отклик ТДО, в свою очередь, тесно связан с отрицательной фазой ТСАК, а отклик ТСАК на АМО в основном обусловлен атмосферными дальними связями между тропической Атлантикой и тропическим Тихим океаном.

В разделе 4.2 дана оценка потенциального вклада основных мод естественной изменчивости атмосферы и океана в изменения температуры в Арктике в зимний период (декабрь–март) и отдельно в ее регионах. С использованием множественного регрессионного анализа оценен вклад основных индексов естественной изменчивости, а именно САК, ТСАК, АМО и ТДО в многолетние колебания детрендированной ПТВ в Арктическом регионе в XX–начале XXI вв. по массивам данных наблюдений HadCRUT5, GISTEMP и BERKLEY, а также реанализов ERA20C, CERA20C и NOAA20C

(рис. 8). Данная регрессионная модель основана на предположении, что используемые предикторы независимы друг от друга и не подвержены воздействию других факторов. Такое предположение можно считать идеализированным, т.к. существуют исследования, указывающие на то, что перечисленные режимы могут быть взаимосвязаны.

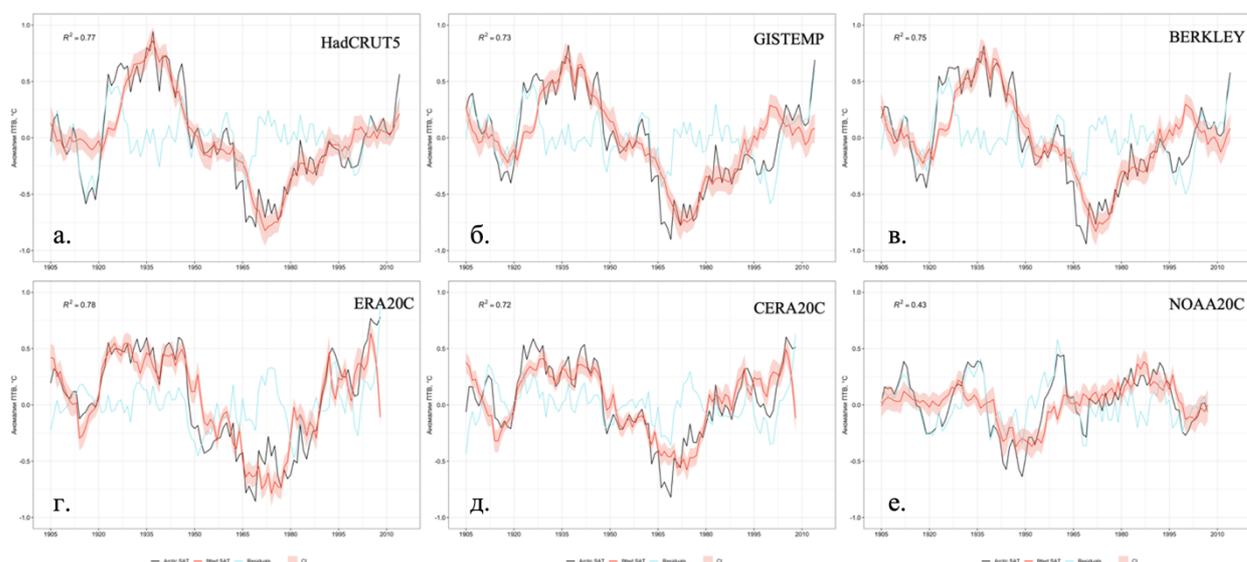


Рисунок 8. Многолетние изменения зимней (декабрь–март) ПТВ ($^{\circ}\text{C}$) в Арктике ($60\text{--}90^{\circ}$ с.ш.) за период 1905–2015 гг. для данных наблюдений и 1905–2007 гг. для данных реанализов, рассчитанные с применением множественной регрессии ПТВ на индексы естественной изменчивости атмосферы и океана: САК, ТСАК, АМО и ТДО по данным наблюдений и реанализов: (а) – HadCRUT5, (б) – GISTEMP, (в) – BERKLEY, (г) – ERA20C, (д) – CERA20C, (е) – NOAA20C; черная линия – аномалии ПТВ для зимнего сезона в Арктике; красная линия – регрессионная модель; голубая линия – ошибка модели; розовая линия – 90% доверительный интервал; 7-летнее скользящее среднее, все временные ряды детрендированы.

Результаты проведенного анализа согласуются с концепцией о том, что изменения арктических ПТВ в течение XX века в зимний сезон тесно взаимосвязаны с воздействием крупномасштабных изменений ТПО на аналогичных временных масштабах. Регрессионная модель с использованием как атмосферных, так и океанических мод естественной изменчивости объясняет от 72 до 78% изменчивости зимней детрендированной ПТВ в Арктике за период 1905–2015 гг. для данных наблюдений и 1905–2007 гг. для данных реанализов, кроме реанализа NOAA20C (рис. 8), по данным которого суммарный вклад индексов составляет всего 43%. Кроме этого, при включении в модель океанических индексов наблюдается лучшее соответствие модельных аномалий ПТВ данным наблюдений для периода 1965–1980гг., чем при использовании только атмосферных индексов. Таким образом, подтверждается предположение о существенном вкладе океанической изменчивости в колебания ПТВ в Арктическом регионе в

указанный период, при этом Северо-Атлантический регион имеет центральное значение.

Обнаружено, что вклад предикторов в изменчивость ПТВ в Арктике в регрессионной модели существенно различается при использовании различных массивов данных (рис. 9). По данным HadCRUT5 на индексы САК и АМО приходится по 30% вклада на каждый, а на индексы ТСАК и ТДО менее 10%. Для остальных данных наблюдений GISTEMP, BERKLEY и реанализов ERA20C, CERA20C – вклад АМО составляет больше 40–55%, при заметном снижении доли вклада индекса САК до 9–11%. Вклад атмосферного индекса ТСАК для реанализов ECMWF также почти в два раза больше, чем для остальных массивов данных – 16–18%, в то время как доля вклада САК для всех массивов данных реанализов составляет менее 5%. Регрессионные модели, построенные по данным реанализов ERA20C и CERA20C, также оценивают вклад АМО в 55% и 38% соответственно, в то время как реанализ NOAA20C всего 7%. Интересно отметить, что для NOAA20C вклад индекса ТДО составляет 20%, в то время как для остальных массивов данных он составляет менее 10%. Вклад внешних факторов в случае NOAA20C больше, чем для всех остальных массивов данных, и составляет около 10% (рис. 9).

На основе количественных оценок доли изменчивости индекса АМО в изменении ПТВ в Арктике (30–55% по различным массивам данных) сделан вывод, что внутренняя изменчивость климата в Северной Атлантике является одним из наиболее вероятных механизмов формирования ПСДВ.

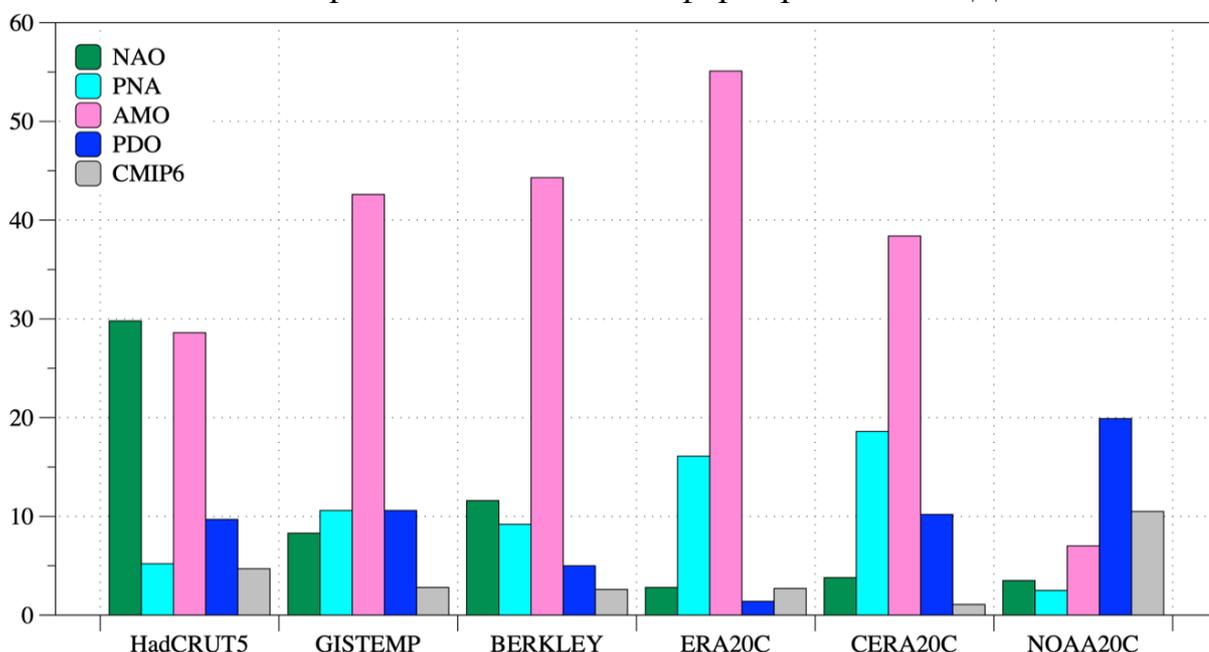


Рисунок 9. Вклад (%) индексов естественной изменчивости атмосферы и океана САК, ТСАК, АМО, ТДО и средней по ансамблю CMIP6 эволюции температуры в многолетние изменения ПТВ ($^{\circ}\text{C}$) в Арктике ($60\text{--}90^{\circ}$ с.ш.) для различных массивов данных наблюдений HadCRUT5, GISTEMP, BERKLEY и реанализов ERA20C, CERA20C и NOAA20C по результатам регрессионной модели; в течение периода 1905–2015 гг. для данных наблюдений и 1905–2007 гг. для данных реанализов.

В разделе 4.2 проведен множественный регрессионный анализ для четырех секторов в Арктике с целью оценки вклада атмосферно-океанических мод в изменчивость ПТВ в различных арктических регионах по данным наблюдений HadCRUT5 для периода 1905–2015 гг., результаты представлены на рисунке 10.

Регрессионная модель для региональной ПТВ в Арктике, использующая в качестве предикторов атмосферно-океанические индексы, показывает наилучший результат для Северо-Атлантического сектора с вкладом внутренней изменчивости в детрендированные ряды аномалий ПТВ 73%. В Азиатском и Тихоокеанском секторах аналогичные оценки составляют 50% и 56% соответственно. Наименьший вклад внутренней изменчивости атмосферы и океана в изменения ПТВ (21%) наблюдается в Европейском секторе.

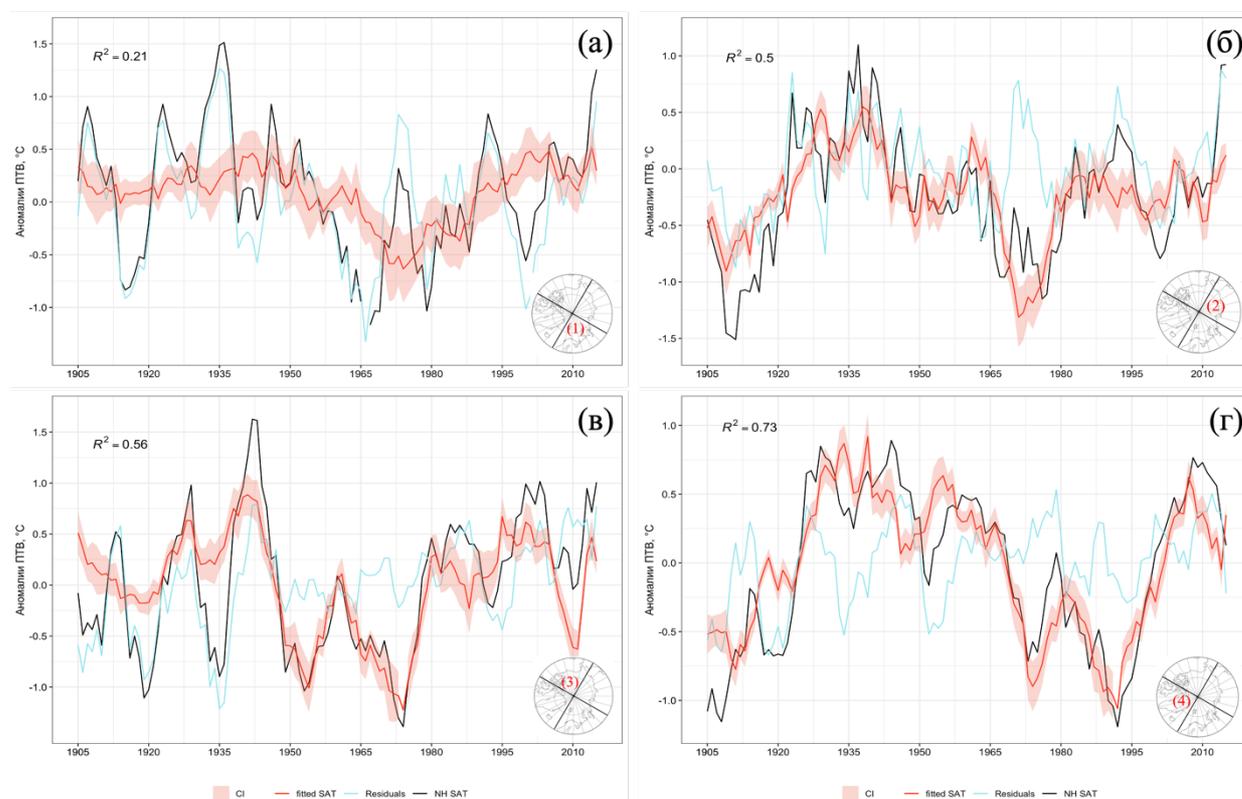


Рисунок 10. Многолетние изменения зимней (декабрь–март) ПТВ ($^{\circ}\text{C}$) за период 1905–2015 гг. в четырех Арктических секторах: (а) – Европейский (0° – 90° в.д.), (б) – Азиатский (91° – 180° в.д.), (в) – Тихоокеанский (180° – 90° з.д.), (г) – Северо-Атлантический (90° – 0° з.д.) по данным наблюдений HadCRUT5 и рассчитанные с применением множественной регрессии ПТВ на индексы естественной изменчивости атмосферы и океана: САК, ТСАК, АМО, ТДО; черная линия – аномалии ПТВ для зимнего сезона в СП; красная линия – регрессионная модель; голубая линия – ошибка модели; розовая линия – 90% доверительный интервал; 7-летнее скользящее среднее, все временные ряды детрендированы.

Обнаружено, что вклад каждой из мод естественной изменчивости в колебания ПТВ в отдельных Арктических секторах в XX веке был неравномерным. Наибольший вклад САК наблюдается в Северо-Атлантическом (44%) секторе. В остальных секторах его вклад составляет менее 7%. Влияние индекса АМО на ПТВ наблюдалось во всех четырех секторах с наибольшим вкладом 27% в Северо-Атлантическом секторе, и от 17 до 19% для остальных секторов. Вклад индекса ТДО, ожидаемо, был наиболее существенным в Тихоокеанском и Азиатском секторах – 31% и 18%, соответственно. За счет моды атмосферной изменчивости ТСАК формировалось 13% изменений ПТВ в Азиатском секторе Арктики.

В разделе 4.3 приведены результаты оценки вклада рассматриваемых мод естественной изменчивости атмосферы и океана в изменения ПТВ зимой в долготных зонах Арктики (60° – 90° с.ш.) с шагом 5° градусов с помощью метода множественной линейной регрессии. На рисунке 11 представлен долготный ход вклада каждого индекса в отдельности в изменчивость арктической ПТВ в XX–начале XXI-го века. Наибольший вклад индексов САК и АМО, не превысивший 30%, наблюдался в Северо-Атлантическом регионе. Заметное влияние индекса ТДО на ПТВ отмечается в Тихоокеанском и Азиатском секторах, его вклад не превышал 20%. Наибольшая неопределенность связана с оценкой вклада индекса ТСАК, максимальный вклад которого (20%) отмечается в отдаленных регионах от очага расположения – в Азиатском секторе.

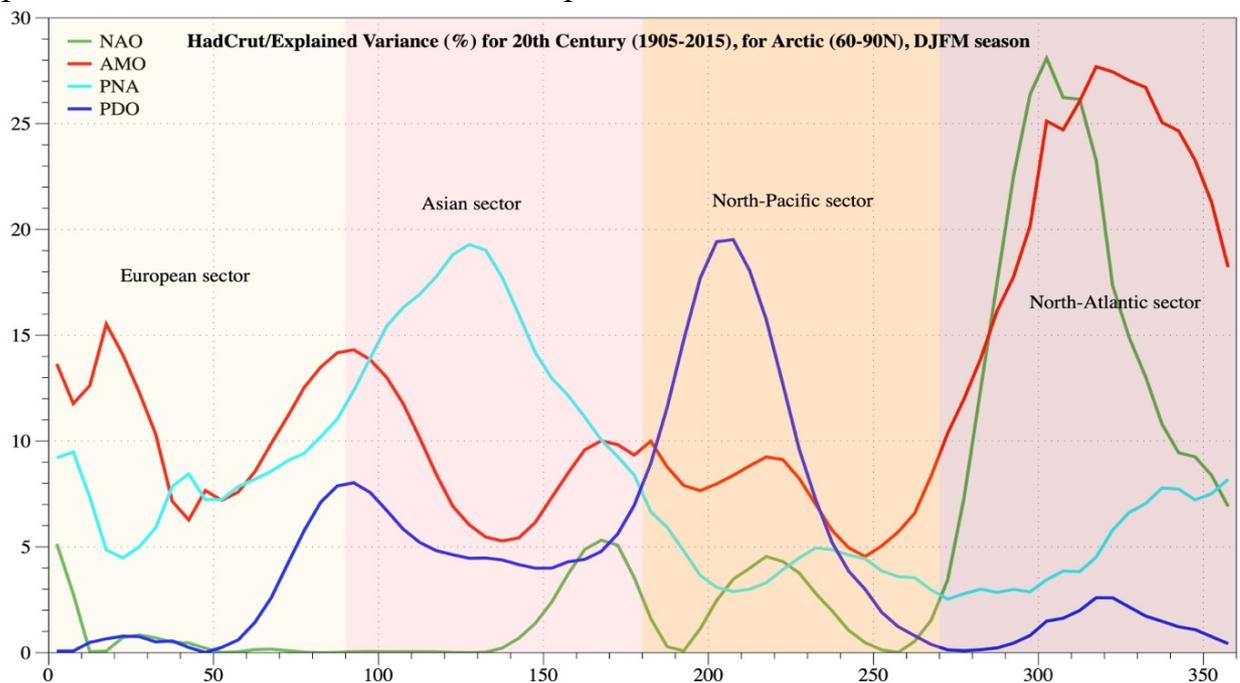


Рисунок 11. Вклад (%) индексов естественной изменчивости САК, ТСАК, АМО, ТДО в многолетние изменения зимней (декабрь–март) ПТВ ($^{\circ}\text{C}$) за период 1905–2015 гг. по долготным зонам Арктики (60 – 90° с.ш.) с шагом 5° градусов по данным наблюдений HadCRUT5, рассчитанные с применением множественной регрессии; зеленая линия – индекс САК; голубая линия – индекс ТСАК; красная линия – индекс АМО; синяя линия – индекс ТДО.

На основе результатов статистического анализа в **Главе 4** можно сделать вывод, что моды естественной изменчивости объясняют более 70% изменчивости ПТВ в Арктике в XX веке, с преобладающим вкладом АМО до 55% по отдельным массивам данных, при этом наибольший вклад указанных мод (более 70%) наблюдается в Северо-Атлантическом секторе исследуемого региона.

В Заключении сформулированы основные **выводы работы**:

1. Анализ пространственного распределения ПТВ в различных широтных зонах показал, что событие ПСДВ в масштабе полушария проявлялось в СП сильнее, чем с ЮП, а в Арктическом регионе в несколько раз сильнее, чем в СП. ПСДВ в Арктике имело неравномерное распределение аномалий ПТВ и по-разному выражено в различных арктических регионах. Например, некоторые станционные данные наблюдений слабо отражают событие ПСДВ, что говорит о возможном вкладе региональных факторов, воздействующих на колебания ПТВ и зависящих от мод внутренней изменчивости атмосферы и океана в различных регионах внетропических широт СП.

2. Несогласованность между наблюдаемой и моделируемой ПТВ в Арктике указывает на важную роль внутренней климатической изменчивости. Климатические модели способны воспроизводить значительные внутренние долгопериодные колебания, которые соответствуют по продолжительности и амплитуде наблюдаемым. Показано, что некоторые из отдельных реализаций моделей способны достаточно хорошо воспроизводить динамику изменений температуры в Арктике в XX веке, что подразумевает важную роль внутренней естественной долгопериодной изменчивости климата в формировании ПСДВ.

3. Проведен аналитический обзор исследований на тему потепления первой половины XX века в Арктике, систематизированы возможные механизмы формирования ПСДВ за счет внутренней изменчивости климата и внешних воздействий, в том числе антропогенных. Приведенные в этом обзоре результаты исследований указывают на то, что естественная внутренняя изменчивость климата может объяснить значительную часть изменений арктической температуры во время ПСДВ. Изменения ПТВ связаны с естественными колебаниями ведущих мод крупномасштабной изменчивости циркуляции атмосферы и температуры поверхности океана во внетропических широтах СП. Многие исследования указывают на Атлантическую мультидекадную осцилляцию как на главный фактор внутренней изменчивости для формирования ПСДВ ввиду синфазных долгопериодных вариаций индекса Атлантической мультидекадной осцилляцией и ПТВ в СП, особенно в Арктических широтах. В последние годы ряд исследований также выделяет естественную изменчивость в Северном Тихом океане как важный фактор в формировании ПСДВ. Тем не менее, данные модельных экспериментов свидетельствуют о том, что внутренняя естественная изменчивость не может полностью объяснить событие ПСДВ.

4. Выполнено сравнение данных ПТВ во внетропических широтах СП для трех реанализов, охватывающих весь XX век – ERA20C, CERA20C и NOAA20C с эмпирическими сеточными архивами данных HadCRUT5, GISTEMP и BERKLEY. Анализ эволюции аномалий ПТВ в XX–начале XXI-го для разных широтных зон показал, что наибольшие различия между данными наблюдений и реанализами наблюдаются в период потепления первой половины XX века (1916–1945 гг.) и последующего похолодания (1946–1975 гг.), наиболее сильно выраженного в высоких широтах СП в зимний сезон.

5. Установлено, что способность реанализов реалистично воспроизводить климатические аномалии в течение XX века зависит от конкретной климатической характеристики, а также от региона, периода времени и сезона, что затрудняет выбор реанализа, наиболее успешно воспроизводящего региональный климат. Показано, что динамика и закономерности аномалий ПТВ и ДУМ во внетропических широтах СП на протяжении XX века были более реалистично воспроизведены реанализами ECMWF, наиболее успешно в случае реанализа CERA20C, в то время как реанализ NOAA20C воспроизводит аномалии температуры и давления значительно хуже в течение столетия. Сравнение различных реанализов XX века с данными наблюдений и между собой выявило существенные различия в тенденциях изменений температуры, часто качественного характера, в первой половине XX века. Полученные результаты не позволяют рассматривать данные реанализов как полноценную замену отсутствующим наблюдениям.

6. Проведена оценка вклада мод естественной изменчивости циркуляции атмосферы и температуры поверхности океана в изменчивость зимних ПТВ в Арктике. Результаты статистического анализа показали, что индексы ведущих мод естественной изменчивости объясняют более 70% изменчивости ПТВ в Арктике в XX веке, после вычета линейного векового тренда, с преобладающим вкладом Атлантической мультидекадной осцилляции. Модель множественной линейной регрессии показывает, что вклад Атлантической мультидекадной осцилляции в ПСДВ, если рассматривать весь период столетия, может быть на порядок больше, чем вклад Тихоокеанской декадной осцилляции. Существенный вклад вносят также Тихоокеанско-северо-Американское колебание и Северо-Атлантическое колебание.

7. Оценка вклада мод естественной изменчивости атмосферы и океана в изменчивость зимних ПТВ в четырех арктических секторах показала, что вклад мод изменчивости атмосферы и океана значительно различается в зависимости от региона. Полученные количественные оценки наибольшего вклада изменчивости индекса Атлантической мультидекадной осцилляции в изменения ПТВ в зимний сезон в Арктике согласуются с тем, что изменчивость ПТВ определяются главным образом изменчивостью ТПО на аналогичных временных масштабах, при этом Северо-Атлантический регион имеет наиболее важное значение.

Список опубликованных работ по теме диссертации

По результатам диссертационной работы опубликовано 10 работ в рецензируемых научных изданиях, в т.ч. 6 в журналах, рекомендованных ВАК, входящих в базы данных SCOPUS, Web of Science или Russian Science Citation Index (RSCI), и 4 – в рецензируемых тезисах докладов, индексируемых в Web of Science.

Статьи в журналах из списка ВАК

1. **Бокучава Д. Д., Семенов В. А.** Анализ аномалий приземной температуры воздуха в Северном полушарии в течение XX века по данным наблюдений и реанализов // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2018. – Т. 1. – С. 28-51.
2. **Бокучава Д. Д., Семенов В. А.** Роль естественных колебаний и факторов внешнего воздействия на климат в потеплении середины XX века в Северном полушарии // *Лёд и Снег*. – 2022. – Т. 62. – № 3. – С. 455-474.
3. **Попова В.В., Бокучава Д.Д., Матвеева Т.А.** Экстремальная засуха на Восточно-Европейской равнине в период потепления середины XX столетия: климатические характеристики и аналоги в условиях современного климата // *Аридные экосистемы*. – 2023. – Т. 29. – № 2 (95). – С. 3-11.

В изданиях, включенных в базу Scopus и Web of Science

4. **Vokuchava D.D., Semenov V.A.** Factors of natural climate variability contributing to the Early 20th Century Warming in the Arctic // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2020. – Т. 606. – № 1. – С. 012008.
5. **Vokuchava D. D., Semenov V. A.** Mechanisms of the early 20th century warming in the Arctic // *Earth-Science Reviews*. – 2021. – Т. 222. – С. 103820.
6. **Popova V.V., Matveeva T.A., Vokuchava D.D.** The Early 20th Century Warming in the East-European Plain Climate: Extreme Drought in 1920–1940, Atmospheric Circulation Anomalies and Links with the Sea Ice Variability // *Environmental Sciences Proceedings*. – 2022. – Т. 19. – № 1. – С. 57.

Статьи в сборниках материалов конференций

7. **Vokuchava D. D., Semenov V. A.** Surface air temperature and pressure anomalies in the Northern Hemisphere during the 20th century: observations and reanalyses // *24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. – SPIE, 2018. – Т. 10833. – С. 1719-1724.
8. **Vokuchava D. D., Semenov V. A., Popova V. V.** Features of the winter atmospheric circulation structure in the Northern Hemisphere from observations and 20th century reanalyses data // *25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. – SPIE, 2019. – Т. 11208. – С. 1735-1743.
9. **Popova V.V., Vokuchava D.D.** Changes of the atmospheric circulation patterns over Northern Hemisphere extratropical zone since the mid of XX century // *25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. – SPIE, 2019. – Т. 11208. – С. 1744-1749.
10. **Popova V. V., Vokuchava D.D., Matveeva T. A.** The humidification anomalies in the large-scale river basins on the East European Plain in the period of Early 20

Century Warming: circulation factors and analogues in the modern climate // 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – SPIE, 2022. – T. 12341. – C. 1394-1399.

Подписано в печать: ____ . ____ . ____
Объем: 1,0 п.л.
Тираж: 100 экз.
Отпечатано в типографии. _____