

УТВЕРЖДАЮ

Директор  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Федерального исследовательского  
центра «Морской гидрофизический  
институт РАН»  
член-корреспондент РАН



Коновалов С.К.

« 27 » октября 2023 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Федерального исследовательского центра

«Морской гидрофизический институт РАН»

на диссертационную работу

**Бокучавы Дарьи Дмитриевны**

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

представленную на соискание ученой степени

кандидата географических наук

по специальности 1.6.18 – Науки об атмосфере и климате

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт географии Российской академии наук.

**Актуальность темы работы.** На протяжении XX века было зафиксировано два события интенсивного роста глобальной приземной температуры воздуха (ПТВ) – с 1920-х гг. по 1940-е гг., и с середины 1970-х гг. по настоящее время. 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 как ПСДВ, так и современного потепления являются ярко выраженные положительные аномалии ПТВ в арктических широтах в зимний сезон, причем темпы Арктического потепления в середине XX века

были сопоставимы по величине с современным потеплением, однако это произошло в то время, когда рост выбросов парниковых газов в атмосфере был в 4–5 раз меньше, чем в последние десятилетия. 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 Д.Д. Бокучавы исследуются региональные особенности, тенденции и возможные причины колебаний приземной температуры воздуха в период потепления первой половины XX века в Арктике, получены количественные оценки вклада режимов естественной изменчивости атмосферы и океана в изменения климата в Арктике и отдельно в ее регионах в XX веке, что является ключевым вопросом для понимания динамики климата в инструментальный период.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 261 наименования 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.

#### **Основные результаты, полученные в диссертации.**

*В первой главе* 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 северного полушария с современным потеплением. Проведен исторический обзор ранних исследований ПСДВ и причин его возникновения, сделан вывод, что точные причины ПСДВ до сих пор не определены. На основе анализа наиболее

современных массивов климатических данных делается вывод о том, что ПСДВ в Арктике сравнимо с современным периодом по темпам роста температуры.

Исследованы пространственно-временные особенности ПСДВ во внетропической зоне северного полушария, проиллюстрирована динамика изменений аномалий ПТВ в различных широтных зонах, а также в Арктическом регионе в течение XX – начале XXI веков. Показано, что событие ПСДВ проявлялось в северном полушарии сильнее, чем в южном полушарии, а в Арктическом регионе – в несколько раз сильнее, чем в северном полушарии. Описан эффект Арктического усиления, приведены оценки вариаций среднегодовой площади арктических морских льдов в течение XX – начале XXI веков. 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 северного полушария.

*Во второй главе* проведен анализ особенностей изменений приземной температуры воздуха и давления на уровне моря в течение XX – начале XXI-го вв. с использованием массивов данных наблюдений (HadCRUT5, GISTEMP NASA, BERKLEY EARTH) и реанализов, охватывающих исследуемый период ПСДВ (ECMWF – ERA20C, CERA20C и NOAA-CIRES-DOE – NOAA20C). Показано, что изменения ПТВ в период ПСДВ по данным реанализов имеет существенные различия с эмпирическими массивами данных в первой половине XX века, при этом успешность воспроизведения аномалий температуры в высоких широтах северного полушария в реанализах существенно зависит от сезона, что не позволяет выделить какой-либо продукт как однозначно наиболее успешный.

Произведено пространственное распределение трендов аномалий среднегодовой ПТВ и оценка их статистической значимости по перечисленным массивам данных для различных климатических периодов с

начала XX века, а также аномалий среднегодовых и зимних трендов температуры и давления по данным наблюдений и реанализов. Исследованы особенности структуры атмосферной циркуляции во внетропических широтах северного полушария в зимний сезон для периода 1900–2010 гг. Пространственная согласованность между реанализами и данными наблюдений для второй и третьей ведущих мод изменчивости аномалий давления на уровне моря 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.

В целом, установлено, что эволюция и пространственно-временные закономерности аномалий температуры и давления во внетропических широтах северного полушария 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.

*В третьей главе* проведен 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. Проведенный обзор исследований с использованием климатических моделей указывает на важную роль внутренней естественной изменчивости климата, внешних естественных и антропогенных факторов, в том числе сульфатных и сажевых аэрозолей и парниковых газов 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 приземной температуры, что может указывать на важную роль внутренней изменчивости климата. В то же время некоторые из отдельных реализаций способны достаточно хорошо воспроизвести динамику изменений температуры в Арктике в XX веке, что

подразумевает важную роль случайной внутренней динамики климата в формировании ПСДВ.

Анализируются механизмы, связанные с внутренней изменчивостью системы океан-атмосфера, приводится описание ведущих мод естественной изменчивости атмосферы и океана, имеющих наибольшее воздействие на климат внетропических широт северного полушария. Атлантической мультидекадной осцилляции отводится ведущая роль в формировании ПСДВ, в то время как недавние исследования показывают значимый вклад Тихоокеанской декадной осцилляции в поступлении тепла в высокие широты северного полушария в первой половине XX века. Согласно анализируемым исследованиям внутренняя динамика атмосферы может также оказывать влияние на ПТВ в Арктике в первой половине XX века, за счет вклада как атлантического, так и тихоокеанского регионов в перенос теплых морских воздушных масс в Арктику. Рассматривается роль обратных связей в Арктической климатической системе, способствующих усиленным вариациям климата в регионе. Проанализированы механизмы, связанные с естественным внешним воздействием на глобальные и региональные климатические изменения, такие как солнечная радиация и вулканическая активность. Также обсуждаются факторы внешнего антропогенного воздействия на климатическую систему: антропогенные газы ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) и антропогенные аэрозоли, в частности черный углерод, имеющий существенное значение для Арктического региона.

Согласно проведенному аналитическому обзору 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 четвертой главе* проанализирована пространственно-временная структура изменчивости климатической системы в XX веке в Арктике. Приведены оценки вклада атмосферно-океанических индексов в колебания



ПТВ в Арктических широтах ( $60-90^{\circ}$  с.ш.) в различных долготных секторах. С использованием множественного регрессионного анализа оценен вклад основных индексов естественной изменчивости, а именно САК, ТСАК, АМО и ТДО в многолетние колебания детрендрованной ПТВ в Арктическом регионе в XX – начале XXI вв. по массивам данных наблюдений HadCRUT5, GISTEMP и BERKLEY, а также реанализов ERA20C, CERA20C и NOAA20C. Регрессионная модель с использованием как атмосферных, так и океанических мод естественной изменчивости объясняет от 72 до 78% изменчивости зимней детрендрованной ПТВ в Арктике за период XX – начала XXI вв. по различным массивам данных. Обнаружено, что вклад предикторов в изменчивость ПТВ в Арктике в регрессионной модели существенно различается между собой при использовании различных массивов данных. 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.

Также проведен аналогичный анализ отдельно 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. Наилучший результат показан для Северо-Атлантического сектора с вкладом внутренней изменчивости 73% в детрендрованные ряды аномалий ПТВ, наименьший вклад внутренней изменчивости атмосферы и океана в изменения ПТВ (21%) наблюдается в Европейском секторе.

Приведены результаты оценки вклада рассматриваемых мод естественной изменчивости атмосферы и океана в изменения ПТВ зимой в долготных зонах Арктики ( $60^{\circ}-90^{\circ}$  с.ш.) с шагом  $5^{\circ}$  градусов с помощью метода множественной линейной регрессии. 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.

**Обоснованность и достоверность результатов.** 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.

**Научная и практическая значимость.** Понимание механизмов формирования ПСДВ и усиления его амплитуды в высоких арктических широтах позволяет выявить возможные механизмы естественной и внешней изменчивости климата и положительных обратных связей в арктической климатической системе, способствующих усилению климатических изменений. В диссертационной работе получены новые результаты и уточнены уже имеющиеся знания о событии ПСДВ. 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.

#### **Рекомендации по использованию результатов диссертации.**

В работе 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.

#### **Замечания по диссертации.**

1. В тексте используются многочисленные обозначения (СКО, ДУМ, НАО и т.д.), причем и в русской, и в английской транскрипции. Это значительно затрудняет чтение работы. Лучше бы привести все обозначения к единому виду и представить их в Списке сокращений и условных обозначений.

2. В главе 2 регулярно используются термины **значимое** потепление, статистически **значимые** тренды или **1% уровень** статистической **значимости**. При этом в тексте нигде нет описания, что при этом имеется в виду. Также в работе поставлена интересная и важная задача – найти отклики климатических аномалий температуры на известные климатические индексы. Но ничего не говорится об оценке доверительных интервалов с учетом числа степеней свободы и т.д.

3. На рисунке 1.7 (стр. 26) приведены четыре графика среднегодовых значений приповерхностной температуры воздуха и их осредненных аномалий для четырех секторов Арктического региона. Однако вертикальный масштаб (диапазон изменчивости температур) у каждого графика свой, что затрудняет их сравнение.

4. На рисунке 2.6 – Зимние тренды температуры и **давления** на уровне моря ( $^{\circ}\text{C} / 30$  лет) во внетропических широтах (стр. 58) – не указаны единицы измерения трендов давления.

5. Во всей диссертации используется 5-летнее скользящее сглаживание, а в данных рисунка 4.3 (стр. 123) почему-то 7-летнее.

6. Прекрасное впечатление оставляют разделы диссертации, где описано современное состояние исследований. Но при описании своих достижений ощущается переизбыток подробностей. Понятно, что различные базы данных и различные ре-анализы отличаются друг от друга. Но при их сравнительном



анализе желательно выделять основные черты, а второстепенные можно описать в приложении.

7. В 3-й и 4-й главах нигде нет конкретизации того, какие именно результаты получены диссертантом со ссылкой на свои публикации. Например, в начале раздела 4.2.3 (стр. 125) написано: «Основываясь на ... анализе ... был сделан **вывод**, что моды внутренней изменчивости климата играют важную роль в Арктическом усилении (Wettstein and Deser, 2014; Zhang, 2015; Ding et al., 2017, 2019; Cai et al., 2021) ...». Возникает вопрос кем он был сделан: диссертант получил результат, который подтверждает выводы зарубежных авторов, или это обзор чужих достижений? И таких неоднозначностей в тексте много.

**Заключение.** Указанные замечания не изменяют общую высокую оценку работы как квалификационной диссертационной работы по географическим наукам. Диссертация выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченное исследование по актуальной теме изменений климата в Арктике. В ней получены новые результаты, развивающие и углубляющие современные представления о воздействии внутренних механизмов климатической системы на изменчивость температуры в рассматриваемом регионе.

В диссертации имеются необходимые ссылки на авторов и источники заимствованных материалов, в том числе – на научные работы соискателя. Результаты работы в полной мере опубликованы в рецензируемых научных изданиях, удовлетворяющих требованиям ВАК Российской Федерации.

Автореферат диссертации в достаточной мере отражает ее содержание и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 с изменениями, утвержденными Постановлением Правительства Российской Федерации от 20.03.2021 г. №426. Диссертация полностью соответствует паспорту специальности 1.6.18 – «Науки об атмосфере и климате» и удовлетворяет всем требованиям действующего

«Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Бокучава Дарья Дмитриевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата географических наук.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и утвержден на совместном заседании Общеинститутского научного семинара и семинара Отдела взаимодействия атмосферы и океана Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН», протокол № 11 от 27 октября 2023 г.

Главный научный сотрудник и заведующий  
Отделом взаимодействия атмосферы и океана  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Федерального исследовательского центра  
«Морской гидрофизический институт РАН»  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Ефимов Владимир Васильевич

Научный сотрудник  
Лаборатории полярных исследований  
Отдела дистанционных методов исследований  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Федерального исследовательского центра  
«Морской гидрофизический институт РАН»  
кандидат физико-математических наук

Погребной Александр Евтихиевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт  
РАН» (ФГБУН ФИЦ МГИ)  
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
(8692)54-52-41, [secretary@mhi-ras.ru](mailto:secretary@mhi-ras.ru)

Подписи В.В. Ефимова и А.Е. Погребного заверяю:  
Ученый секретарь Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра  
«Морской гидрофизический институт РАН»  
кандидат физико-математических наук



Алексеев Дмитрий Владимирович

27 октября 2023 г.