

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
АТМОСФЕРЫ ИМ. А.М. ОБУХОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Парфенова Мария Руслановна

**Связь протяженности
снежного покрова и морских льдов по спутниковым
данным и модельным расчетам в 20–21 веках
и региональных и глобальных температурных изменений**

Специальность 1.6.18 —
«Науки об атмосфере и климате»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук.

Научный руководитель: **Мохов Игорь Иванович**
доктор физико-математических наук, профессор,
академик РАН

Официальные оппоненты: **Гельфан Александр Наумович**
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН
заведующий отделом Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института водных проблем Российской академии наук

Костяной Андрей Геннадьевич
доктор физико-математических наук, профессор
главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение “Арктический и антарктический научно-исследовательский институт”

Защита состоится 19 сентября 2023 года г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.096.XX (24.1.130.01) в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФА им. А.М. Обухова РАН и на официальном сайте Института: <http://ifaran.ru/science/dissertations.html>.

Автореферат разослан " " августа 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.096.XX (24.1.130.01),
кандидат физико-математических наук

А.В. Чернокульский

Общая характеристика работы

Со снежно-ледовым покровом связаны сильнейшие изменения альbedo земной поверхности и климата на интервалах времени от сезонов до миллионов лет. С изменениями снежного покрова связаны наиболее значимые изменения свойств земной поверхности. Взаимным влиянием изменений протяженности снежно-ледового покрова и температурного режима определяется положительная климатическая обратная связь, увеличивающая чувствительность температурного режима к природным и антропогенным воздействиям. Согласно данным палеорекоonstrukций на фоне общего глобального похолодания в течение последних десятков миллионов лет, около 2 млн. лет назад начали значительно проявляться глобальные ледниковые циклы. Проявление в последующую эпоху (так называемый плейстоцен) ледниковых циклов связано с усилившимся влиянием положительной обратной связи «альbedo поверхности – температура» на чувствительность глобального климата к изменениям параметров орбиты Земли вокруг Солнца. Увеличению климатических вариаций, связанных с изменением параметров орбиты Земли вокруг Солнца, способствовало усиление глобальной роли снежно-ледового покрова при достаточно сильном охлаждении Земли к началу плейстоцена. Снежно-ледовый покров оказывает существенное влияние на формирование современных региональных и глобальных климатических режимов. Изменения климата в последние десятилетия существенно связаны с изменениями характеристик снежного покрова и морских льдов. Уменьшение альbedo поверхности в связи с уменьшением площади снежного покрова и морских льдов при повышении приповерхностной температуры способствует увеличению поглощения поверхностью солнечной радиации с усилением положительной обратной связи. Оценке современных и возможных в будущем изменений снежного покрова и морских льдов на разных масштабах посвящено много экспериментальных, диагностических и модельных исследований [Foster et al., 1983; Мохов, 1984; Groisman et al., 1994; Захаров, 1996; Кренке и др., 2001; Катцов и др., 2007; Alekseev et al., 2007; Алексеев и др., 2009; Яковлев, 2009; Brown et al., 2009; Шмакин, 2010; Bulygina et al., 2011; Frei et al., 2012; Иванов и др., 2013; Павлова и др., 2013; Попова и др., 2013; Bindoff et al., 2013; Groisman et al., 2013; Гельфан, Морейдо, 2014; Костяной и др., 2014; Estilow et al., 2015; Mankin et al., 2015; Alekseev et al., 2016; Ivanov et al., 2019; Алексеев и др., 2017; Mudryk et al., 2017; Иванов и др., 2018; Алексеев и др., 2019; Alekseev et al., 2019; Connolly et al., 2019; Ivanov et al., 2019; Thackeray et al., 2019; Мохов, 2020; Mudryk et al., 2020; Santolaria-Otin et al., 2020; Семенов, Матвеева, 2020; Мохов и др., 2021; Семенов, 2021; Мохов и др., 2022; Парфенова и др., 2022; Парфенова и др., 2023; Ivanov, 2023]. С режимами снежного покрова связана возможность формирования бимодальных распределений для аномалий приповерхностной температуры в переходные сезоны [Мохов, Семенов, 1997]. В регионах континентальной криолитозоны основные характеристики термического режима многолетнемерзлых грунтов, включая температуру и глубину сезонного протаивания, а также гидрологического режима в значительной степени зависят от высоты и продолжительности залегания снежного покрова [Аржанов

и др., 2008; Надежина и др, 2008]. Диапазон внутригодовых вариаций площади снежного покрова в Северном полушарии существенно превышает вариации протяженности морских льдов, при этом основной вклад вносят вариации именно снежного покрова в Евразии [Мохов и др., 2021; Мохов и др., 2022]. В связи с этим для адекватной оценки тенденций современных климатических изменений необходим анализ глобальных и региональных особенностей взаимосвязи снежного покрова с температурным режимом [Connolly et al., 2019; Mudryk et al., 2020].

Актуальность работы обусловлена сильным влиянием связи протяженности снежного покрова и морских льдов с температурными изменениями на чувствительность климатической системы. Особое значение имеют прогностические оценки изменений продолжительности навигационного периода на Северном морском пути. При определении параметров связи снежного покрова с температурным режимом, от которой существенно зависит чувствительность земной климатической системы, в том числе к антропогенным воздействиям, необходимо оценивать значимость вклада ключевых мод естественной климатической межгодовой и междесятилетней изменчивости на фоне долгопериодных тенденций. Их вклад в региональные тренды приповерхностной температуры может проявляться не только на масштабах до двух-трех десятилетий, но и на интервалах времени до полувека и более. Это необходимо учитывать при прогностических оценках региональных изменений климата с соответствующим тестированием климатических моделей. Для адекватных модельных оценок возможных изменений климата в связи с антропогенными воздействиями требуется, чтобы модели адекватно описывали естественную климатическую изменчивость и ее вклад в региональные климатические изменения на разных временных горизонтах.

Целью данной работы является оценка современных региональных и сезонных особенностей изменчивости протяженности снежно-ледового покрова в Северном и Южном полушариях при температурных изменениях за последние десятилетия с использованием статистических методов и данных спутниковых наблюдений и реанализа, а также оценка возможных изменений характеристик протяженности снежно-ледового покрова при климатических изменениях в 21 веке с использованием данных спутниковых наблюдений и результатов ансамблевых модельных расчетов.

В связи с отмеченной целью ставились следующие **задачи**:

1. Исследовать глобальные и региональные особенности межсезонной, межгодовой и междесятилетней изменчивости протяженности снежного покрова и морских льдов в Северном полушарии и морских льдов в Южном полушарии по данным спутниковых наблюдений для последних десятилетий в связи с температурными изменениями.
2. Проанализировать особенности связи изменений протяженности морских льдов с крупномасштабными модами естественной климатической изменчивости по данным для последних десятилетий.

3. Оценить степень воспроизведения современными климатическими моделями особенности изменчивости протяжённости снежного покрова в Евразии.
4. Оценить степень воспроизведения современными климатическими моделями продолжительности навигационного периода для разных частей Северного морского пути.
5. Оценить изменения протяженности снежного покрова на основе ансамблевых модельных расчетов с использованием байесова осреднения.
6. Оценить изменения продолжительности навигационного периода для разных частей Северного морского пути в 21 веке на основе ансамблевых модельных расчетов с использованием байесова осреднения.

Для решения поставленных задач были использованы следующие **основные данные, методы и подходы:**

1. Изменения протяжённости снежного покрова по среднемесячным спутниковым данным CDR (Climate Data Records) NOAA и морского льда по среднемесячным спутниковым данным NSIDC в годовом ходе, межгодовой и междесятилетней изменчивости анализировались с использованием фазовых портретов.
2. Для оценки связи протяженности снежного покрова и морских льдов с температурным режимом (в том числе по среднемесячным данным реанализа ERA5 и данным GISS) использовались корреляционный и кросс-вейвлетный методы анализа.
3. Результаты расчетов с ансамблями глобальных климатических моделей CMIP5 и CMIP6 при различных сценариях для 20 и 21 веков с использованием байесова осреднения

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа региональных и полушарных особенностей изменчивости протяженности снежного покрова на континентах и арктических и антарктических морских льдов и процессов их формирования в связи с температурными изменениями по спутниковым данным и данным реанализа, включая объяснение причин разнонаправленности трендов изменений протяженности арктических и антарктических морских льдов в последние десятилетия.
2. Оценки качества воспроизведения современными климатическими моделями региональных особенностей характеристик изменчивости протяженности морских льдов в арктических морях и снежного покрова в Евразии.
3. Новые прогностические оценки изменений продолжительности навигационного периода для разных частей Северного морского пути в 21 веке на основе результатов расчетов с климатическими моделями ансамбля CMIP6 с использованием байесова осреднения.
4. Количественные оценки изменений протяженности снежного покрова Евразии в 21 веке на основе ансамблевых модельных расчетов, в том числе с использованием байесова осреднения.

Научная новизна

1. Получены новые оценки связи протяженности снежного покрова и морских льдов в Северном и Южном полушариях с полушарными и региональными изменениями приповерхностной температуры с выявлением процессов формирования особенностей режимов снежного покрова и морских льдов по данным для последних десятилетий.
2. На основе полученных оценок связи с региональными и полушарными температурными изменениями с учетом ключевых мод климатической изменчивости дано объяснение причин разнонаправленности трендов изменений арктических и антарктических морских льдов в последние десятилетия – одной из ключевых современных климатических проблем.
3. Впервые получены прогностические оценки продолжительности периода навигации для разных частей Северного морского пути с применением байесова осреднения результатов ансамблевого моделирования.
4. Впервые получены прогностические оценки протяженности снежного покрова Евразии с применением байесова осреднения результатов расчетов с современными климатическими моделями ансамбля СМIP6.

Научная и практическая значимость

Для адекватной оценки современных тенденций климатических изменений и получения надежных модельных оценок возможных изменений необходим разносторонний анализ глобальных и региональных особенностей связи снежно-ледового покрова с температурным режимом как на основе данных наблюдений, так и на основании модельных расчетов на различных временных интервалах. На основе проведенного анализа дано объяснение одной из ключевых современных климатических проблем – проявления разнонаправленных трендов изменений протяженности арктических и антарктических морских льдов в последние десятилетия. Полученные результаты имеют не только научную, но и практическую значимость, в частности, прогностические оценки продолжительности навигационного периода для разных частей Северного морского пути.

Степень достоверности полученных результатов связана с использованием разных методов оценки связи снежно-ледового покрова с температурными изменениями и различных данных, в том числе данных наблюдений и реанализа, а также ансамблевых модельных расчетов с использованием байесова подхода. Степень достоверности оценивалась с использованием современных методов оценки значимости результатов в сопоставлении результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Результаты работы докладывались автором на российских и международных научных конференциях, совещаниях, школах, семинарах, в их числе: семинар отдела исследований климатических процессов ИФА им. А.М. Обухова РАН, (2023); Всероссийская конференция «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» (2020 г., 2022 г.); EGU General Assembly (2020 г., 2021 г., 2022 г.); Всероссийская конференция «Собственное излучение, структура и динамика средней и верхней атмосферы», (2021 г.); Всероссийские школы-конференции

молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы.» (САТЭП-2020, САТЭП-2018); 14th International Conference on Atmospheric Physics, Climate and Environment, Zhangjiajie, China (2019 г.); QUARCCS Workshop, Alfred Wegener Institute, Bremerhaven, Germany (2019 г.); AGU 100 Fall Meeting 2019, San-Francisco, USA (2019 г.); Всероссийская конференция "Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования" (2019 г.); Scientific Workshop "Towards a New Arctic Climate System" (QUARCCS / CATS) (2019 г.), Санкт-Петербург; XXV Международный симпозиум Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы, Новосибирск (2019 г.).

Личный вклад автора. Основные научные результаты в диссертационной работе были получены и представлены на семинарах и конференциях лично автором.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 16 работах, в том числе 6 – в журналах, рецензируемых базами данных Web of Science, Scopus и ВАК.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, академику РАН, д.ф.-м.н., профессору Мохову Игорю Ивановичу за его помощь и вклад в научную работу автора. Также автор благодарна своим коллегам и соавторам Аржанову М. М. и Елисееву А. В. за плодотворное сотрудничество и поддержку. Автор признательна всему коллективу лаборатории теории климата, в особенности А.В. Тимажеву, М.Г. Акперову, за техническую помощь и поддержку во время выполнения данной работы.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём работы составляет 111 страниц, работа содержит 17 таблиц и 38 рисунков. Список литературы содержит 134 наименования.

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы с формулировкой целей и задач, научной новизны и практической значимости.

В главе 1 получены количественные оценки связи изменчивости снежного покрова с изменениями приповерхностной температуры в Северном полушарии в целом и отдельно для Евразии и Северной Америки с использованием спутниковых данных и данных реанализа для периода 1979-2020 гг. Отмечены особенности в годовом ходе, в том числе в сезоны формирования и таяния снежного покрова, и в межгодовой и междесятилетней изменчивости.

С использованием корреляционного и кросс-вейвлетного анализа на фоне значимой антикорреляции протяженности снежного покрова с приповерхностной температурой в Евразии, Северной Америке и для СП в целом в годовом ходе отмечены проявления их положительной корреляции в межгодовой изменчивости, в частности, в период формирования снежного покрова в осенние месяцы.

Для последних лет (в пределах последних двух десятилетий) отрицательная корреляция площади снежного покрова и приповерхностной температуры Евразии и Северной Америки для большинства месяцев получена более сильной, чем для

последних четырех десятилетий в целом. При этом в летние месяцы соответствующая корреляция для последних лет оценена более слабой со в целом меньшими значениями (по абсолютной величине) параметров чувствительности площади снежного покрова к изменению температуры. Для других месяцев отмечено общее увеличение значений (по абсолютной величине) параметров чувствительности площади снежного покрова к изменению температуры, особенно для Евразии.

Отмечены особенности режимов с проявлением положительной корреляции протяженности снежного покрова с приповерхностной температурой и их изменения в течение последних десятилетий.

Результаты кросс-вейвлетного анализа свидетельствуют о слабой когерентности межгодовых вариаций площади снежного покрова в Евразии и Северной Америке. Это связано с соответствующей слабой когерентностью межгодовых вариаций приповерхностной температуры для Евразии и Северной Америки в целом (рис. 1).

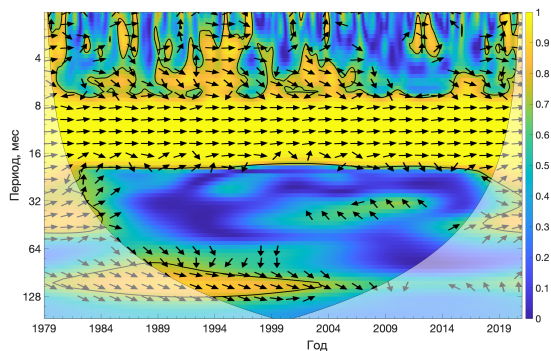
Для Евразии для последних десятилетий отмечено расширение временного диапазона значимой когерентности межгодовых вариаций площади снежного покрова с вариациями приповерхностной температуры (рис. 2).

Для более детального анализа отмеченных особенностей положительной корреляции площади снежного покрова с температурой проведен анализ изменений протяженности снежного покрова в Евразии SEA с приповерхностной температурой меньше 0°C в октябре для периода 1980-2019 гг. Условие роста протяженности снежного покрова S при росте приповерхностной температуры T можно свести к условию

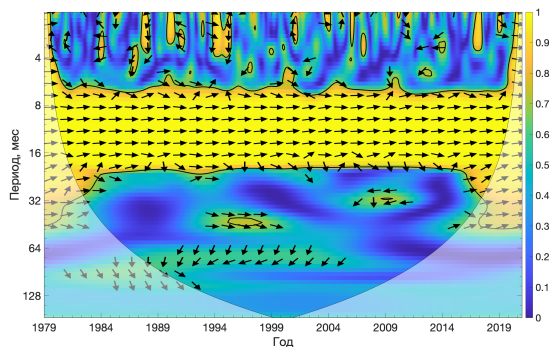
$$f_{Pr}^{-1}d(f_{Pr})/dT > -f_T^{-1}d(f_T)/dT,$$

где f_T - доля площади с температурой у поверхности ниже 0°C , f_{Pr} - доля площади поверхности с температурой ниже 0°C с ненулевыми осадками ($Pr > 0$). Увеличение снежного покрова в осенние месяцы при потеплении можно также связать с уменьшением площади морских льдов в Северном Ледовитом океане и увеличением переноса водяного пара в атмосфере с выпадением снега над континентами. При этом для октябррей характерна большая не только пространственная, но и межгодовая изменчивость, а также переход к отрицательным значениям приповерхностной температуры. Особенности изменений снежно-ледового покрова могут быть связаны не только с долгопериодными тенденциями изменений климата и модами междесятилетней и внутридесятилетней климатической изменчивости, по-разному проявляющимися в разных регионах, но и с особенностями анализируемых данных, степенью их однородности, в том числе данных CDR на основе спутниковых наблюдений.

Особенности изменений снежно-ледового покрова могут быть связаны не только с долгопериодными тенденциями изменений климата и модами междесятилетней и внутридесятилетней климатической изменчивости, по-разному проявляющимися в разных регионах, но и с особенностями анализируемых данных, степенью их однородности, в том числе данных CDR на основе спутниковых наблюдений.



а)



б)

Рис. 1 — Локальная когерентность вариаций площади снежного покрова (а) и вариаций приповерхностной температуры (б) в Евразии и Северной Америке для периода 1979-2020 гг. Выделены области со значимой когерентностью (на уровне 95%), стрелки характеризуют фазовый сдвиг (стрелка вправо – синфазность, влево – противофазность), отмечены также области краевых эффектов.

В главе 2 представлены результаты анализа, которые свидетельствуют о существенности естественных вариаций климата с периодами до нескольких десятилетий (связанных, в частности, с явлениями Эль-Ниньо и Антарктическим колебанием) для антарктических и субантарктических широт с формирующимися морскими льдами. Отмеченные температурные особенности с общим понижением температуры поверхности в субантарктических широтах в последние десятилетия на фоне глобального и полушарного потепления проясняют проблему разнонаправленных тенденций межгодовых вариаций протяженности

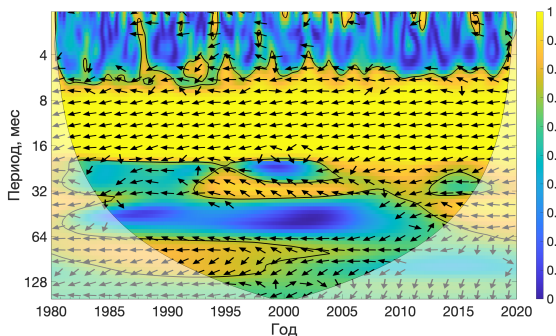


Рис. 2 — Локальная когерентность площади снежного покрова с вариациями приповерхностной температуры для Евразии в целом по среднемесячным данным для периода 1980-2019 гг. Выделены области со значимой когерентностью (на уровне 95%), стрелки характеризуют фазовый сдвиг (стрелка вправо – синфазность, влево – противофазность), отмечены также области краевых эффектов.

морских льдов в Арктике (рис. 3) и Антарктике по спутниковым данным, доступным только с конца 1970-х гг.

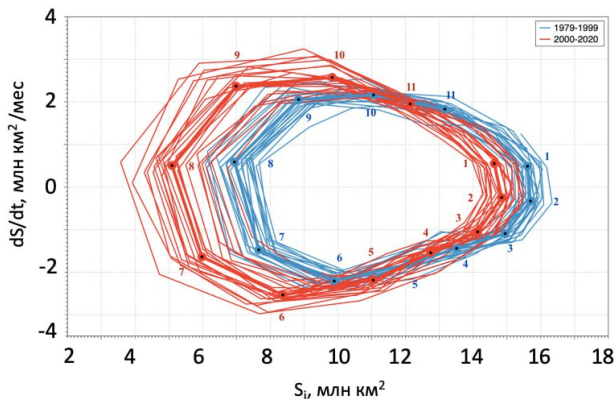


Рис. 3 — Фазовые портреты для протяженности морских льдов в Северном полушарии по среднемесячным данным для двух подпериодов: 1979-1999 гг. (синий цвет) и 2000-2020 гг. (красный цвет). Приведены также соответствующие осредненные фазовые портреты для 20-летних периодов 1980-1999 гг. и 2000-2019 гг.

Результаты кросс-вейвлетного анализа свидетельствуют, что в течение последних двух десятилетий проявляется все более значимая отрицательная корреляция долгопериодных вариаций общей протяженности антарктических морских льдов с температурным режимом в соответствии с прогностическими модельными оценками. При этом параметр, характеризующий чувствительность

среднегодовой протяженности антарктических морских льдов к изменению полушарной приповерхностной температуры, для последних двух десятилетий даже больше, чем для среднегодовой протяженности арктических льдов.

Получены новые оценки параметра чувствительности общей протяженности снежного покрова и морских льдов S_{SI} в Северном полушарии к изменению приповерхностной температуры СП T_{NH} , равные -4.1 млн $\text{км}^2/\text{K}$ для всего анализирувавшегося периода 1979-2020 гг. по среднемесячным данным и -4.3 млн $\text{км}^2/\text{K}$ – для периода 2005-2020 гг. Максимальные по абсолютной величине оценки параметров чувствительности dS_{SI}/dT_{NH} [млн $\text{км}^2/\text{K}$] для периода 1979-2020 гг. достигали для начала лета -6.6 млн $\text{км}^2/\text{K}$, а для периода 2005-2020 гг. – -5.0 млн $\text{км}^2/\text{K}$.

Соответствующие оценки dS_{SI}/dT_{NH} по среднегодовым данным существенно меньше по абсолютной величине: -2.0 ± 0.3 млн. $\text{км}^2/\text{K}$ для периода 1979-2020 гг. и -1.2 ± 0.7 млн. $\text{км}^2/\text{K}$ для периода 2005-2020 гг.

Наряду с устойчиво проявляющейся значимой отрицательной корреляцией общей протяженности снежного покрова и морских льдов с вариациями полушарной приповерхностной температуры в годовом ходе при кросс-вейвлетном анализе отмечена статистически значимая отрицательная корреляция для наиболее долгопериодных, междесятилетних, вариаций. В последние годы проявляется значимая антикорреляция соответствующих межгодовых вариаций, в частности для вариаций с периодичностью около 5 лет, характерной для явлений Эль-Ниньо (рис. 4).

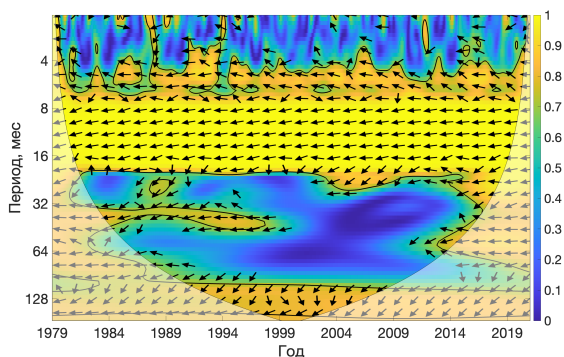


Рис. 4 — Локальная когерентность площади снежного покрова и морских льдов с вариациями приповерхностной температуры для Северного полушария в целом по среднемесячным данным для периода 1979-2020 гг. Выделены области со значимой когерентностью (на уровне 95%), стрелки характеризуют фазовый сдвиг (стрелка вправо – синфазность, влево – противофазность), отмечены также области краевых эффектов.

В главе 3 проведено сравнение модельных оценок изменений протяженности снежного покрова с данными спутниковых наблюдений. В целом, по

модельным расчетам адекватно воспроизводятся наблюдаемые вариации протяженности снежного покрова S в Евразии, при этом по расчетам с отдельными моделями вариации S могут недооцениваться.

Отмечено, что средние для ансамбля моделей оценки параметра чувствительности dS/dT могут быть существенно меньше по абсолютной величине, чем полученные на основе данных спутниковых наблюдений и для отдельных моделей, в частности для переходных сезонов весной и осенью. Уменьшение по абсолютной величине полученных оценок параметра чувствительности в XXI веке связано с общим уменьшением протяженности снежного покрова Евразии при потеплении. При этом диапазон межмодельных различий S в холодное полугодие с ноября по апрель (более 6 млн км² в зимние месяцы) превышает диапазон межгодовых вариаций S по спутниковым данным для периода 2000-2019 гг. Согласно ансамблевым модельным расчетам, скорость сокращения протяженности снежного покрова в Евразии во второй половине XXI века уменьшается по сравнению с первой половиной XXI века во все сезоны. Максимальные значения скорости сокращения протяженности снежного покрова в Евразии характерны для переходных сезонов – осени и весны.

Отмеченные особенности изменений протяженности снежного покрова в связи с температурными изменениями свидетельствуют о необходимости обоснования использования средних ансамблевых модельных оценок скорости изменений площади снежного покрова Евразии. Для более надежных оценок, в частности количественных оценок взаимосвязи площади снежного покрова и температурного режима, необходим учет индивидуальных особенностей моделей с использованием, например, байесова осреднения.

С использованием байесова осреднения получены ансамблевые модельные оценки протяженности снежного покрова для 21 века с учетом качества воспроизведения моделями протяженности снежного покрова по спутниковым данным для периода 2000-2019 гг (рис. 5). При этом учитывалось качество воспроизведения среднего значения (характеризуемого байесовым весом W_1), междесятилетних изменений (характеризуемых линейным трендом, с байесовым весом W_2), межгодовой изменчивости (характеризуемой стандартным отклонением, с байесовым весом W_3), а также учитывался их общий вклад (характеризуемый байесовым весом $W_4 = W_1 \times W_2 \times W_3$).

Наибольшие межмодельные различия получены для летних и осенних месяцев для весов W_2 и W_3 . Для зимних и весенних месяцев распределение весов W_2 и W_3 более однородно по сравнению с W_1 и близко к значению $W_0 = 1/N$, где $N = 9$ - количество моделей в ансамбле. При этом оценки протяженности снежного покрова, рассчитанные с весами W_2 и W_3 для зимнего и осеннего сезонов близки к соответствующим ансамблевым средним с одинаковыми весами W_0 .

Согласно полученным прогностическим оценкам изменений протяженности снежного покрова в Евразии в 21 веке по расчетам с климатическими моделями ансамбля СМIP6 с использованием Байесова подхода наибольший межмодельный разброс связан с межгодовой изменчивостью, особенно в осенне-зимние сезоны.

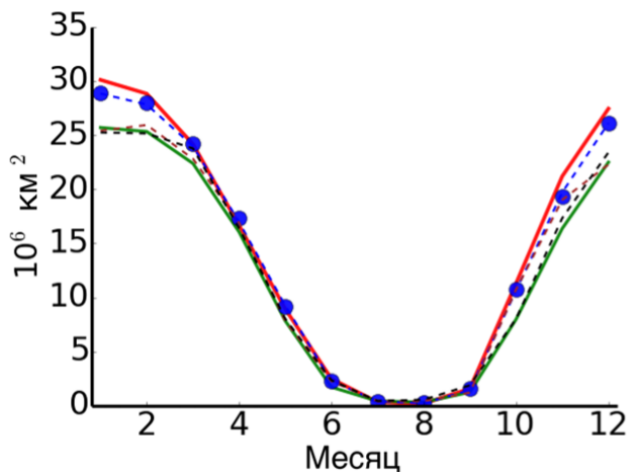
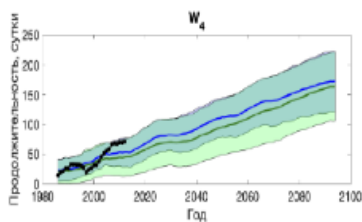


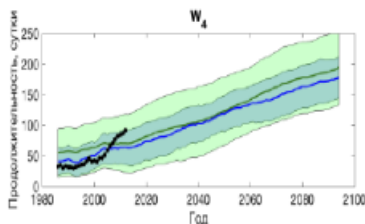
Рис. 5 — Средний годовой ход протяженности снежного покрова в Евразии для периода 2000-2019 гг. по ансамблевым модельным расчетам с Байесовскими весами (синие кружки) и с одинаковыми весами W_0 (зеленая кривая) в сопоставлении со спутниковыми данными (красная кривая). Пунктирными линиями показаны протяженности для многолетнего среднего (синяя кривая), тренда (коричневая кривая) и межгодовой изменчивости (черная кривая) протяженности снежного покрова.

С использованием Байесова осреднения получены также ансамблевые модельные оценки для продолжительности навигационного периода на разных участках Северного морского пути, в том числе для 21 века при сценарии RCP8.5 (рис.6). Согласно полученным результатам различия воспроизведения моделями продолжительности навигационного периода и ее изменений в западной части Северного морского пути (Баренцево и Карское моря) больше, чем в восточной (море Лаптевых и Восточно-Сибирское море).

Совместный учет качества моделирования не только средних значений и трендов, но и межгодовой изменчивости при Байесовом осреднении в сравнении со спутниковыми данными позволяет уменьшить межмодельное стандартное отклонение вдвое для западной части Северного морского пути и в полтора раза для восточной. При этом для Северного морского пути в целом по ансамблевым модельным расчетам среднее значение продолжительности навигационного периода оценено в диапазоне 3-4 месяцев для середины 21 века и около 6 месяцев к концу 21 века при сценарии RCP8.5.



а)



б)

Рис. 6 — Оценки изменений продолжительности навигационного периода на Северном морском пути для моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря (а) и для Баренцева и Карского морей (б) при разных вариантах определения байесовых весов W_j ($1 \leq j \leq 4$), а также при равновзвешенных (W_0) осреднениях по расчетам с климатическими моделями ансамбля СМIP5 при сценарии RCP 8.5 для 21 века.

В **закл^ючении** приведены основные результаты работы:

1. На фоне значимой антикорреляции протяженности снежного покрова с приповерхностной температурой в Евразии, Северной Америке и для СП в целом в годовом ходе отмечены и проанализированы условия проявления их положительной корреляции в межгодовой изменчивости, в частности в период формирования снежного покрова в осенние месяцы.
2. Получены новые оценки параметра чувствительности общей протяженности снежного покрова и морских льдов S_{SI} в СП к изменению приповерхностной температуры СП N_H равными -4.1 млн $\text{км}^2/\text{K}$ для всего анализировавшегося периода 1979-2020 гг. по среднемесячным данным, а для периода 2005-2020 гг. равными -4.3 млн $\text{км}^2/\text{K}$. Максимальные по абсолютной величине оценки параметров чувствительности dS_{SI}/dN_H для периода 1979-2020 гг. достигали для начала лета -6.6 млн. $\text{км}^2/\text{K}$, а для периода 2005-2020 гг. — -5.0 млн. $\text{км}^2/\text{K}$. Соответствующие оценки dS_{SI}/dN_H по среднегодовым данным существенно меньше по абсолютной величине: -2.0 млн. $\text{км}^2/\text{K}$ для периода 1979-2020 гг. и -1.2 млн. $\text{км}^2/\text{K}$ для периода 2005-2020 гг.
3. Результаты проведенного анализа свидетельствуют о существенности естественных вариаций климата с периодами до нескольких десятилетий

(связанных, в частности, с явлениями Эль-Ниньо и Антарктическим колебанием) для антарктических и субантарктических широт с морскими льдами. В последние десятилетия проявляется все более значимая отрицательная корреляция долгопериодных вариаций общей протяженности антарктических морских льдов с температурным режимом в соответствии с прогностическими модельными оценками. При этом параметр, характеризующий чувствительность среднегодовой протяженности антарктических морских льдов к изменению полушарной приповерхностной температуры, для последних двух десятилетий больше, чем для среднегодовой протяженности арктических льдов.

4. Сравнение с данными спутниковых наблюдений показало, что по ансамблевым расчетам с современными климатическими моделями с учетом байесова осреднения в целом адекватно воспроизводятся отмеченные в конце 20 и начале 21 веков вариации протяженности снежного покрова Евразии.
5. Согласно полученным оценкам с использованием расчетов с ансамблем климатических моделей СМIP6 и байесового осреднения скорость сокращения протяженности снежного покрова в Евразии во второй половине 21 века уменьшается по сравнению с первой половиной XXI века во все сезоны, в частности при сценарии антропогенных воздействий SSP2-4.5. Максимальные значения скорости сокращения протяженности снежного покрова в Евразии характерны для переходных сезонов – осени и весны.
6. Получены количественные оценки продолжительности навигационного периода для разных частей Северного морского пути, в том числе в Баренцевом и Карском морях, морях Лаптевых и Восточно-Сибирском, по ансамблевым модельным расчетам для 21 века с использованием Байесова подхода. При сценарии RCP 8.5 продолжительность навигационного периода для Северного морского пути в целом оценена равной 3–4 месяцам в середине 21 века и около 6 месяцев к концу века.

Публикации в рецензируемых

изданиях из списка ВАК по теме диссертации:

1. Мохов И.И., Парфенова М.Р. Связь протяженности Антарктических и Арктических морских льдов с температурными изменениями в 1979–2020 гг. // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 1. С. 86–92. DOI: 10.31857/S2686739721010151
2. Мохов И.И., Парфенова М.Р. Изменения протяженности снежного покрова в Евразии по спутниковым данным в связи с полушарными и региональными температурными изменениями // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 501. № 1. С. 78–85. DOI: 10.31857/S2686739721110104
3. Мохов И.И., Парфенова М.Р. Взаимосвязь площади снежного покрова в Северном полушарии по спутниковым данным с приповерхностной температурой // Метеорология и гидрология. 2022. № 2. С. 32-44. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-2-32-44
4. Мохов И.И., Парфенова М.Р. Связь площади снежного покрова и морских льдов с температурными изменениями в Северном полушарии по данным для последних десятилетий // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 4. С. 411-423. DOI: 10.31857/S0002351522040101
5. Парфенова М.Р., Елисеев А.В., Мохов И.И. Изменения периода навигации в Арктических морях на Северном морском пути в 21 веке: Байесовы оценки по расчетам с ансамблем климатических моделей // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 118-125.
6. Парфенова М.Р., Аржанов М.М., Мохов И.И. Изменения площади снежного покрова в Евразии в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей CMIP6 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 3. С. 299-308.

Прочие публикации:

1. Мохов И.И., Парфенова М.Р. Особенности изменчивости антарктических и арктических морских льдов в последние десятилетия на фоне глобальных и региональных климатических изменений // Вопросы географии. 2020. Сб. 150. С. 304-319.
2. Arzhanov M.M., Mokhov I.I., Parfenova M.R. Northern Hemisphere snow cover sensitivity to temperature changes in the CMIP6 model ensemble // Research Activities in Earth System Modelling. E. Astakhova (ed.). 2021. Rep. 51. S. 7. P. 03-04.
3. Eliseev A.V., Mokhov I.I., Parfenova M.R. Changes of navigation period at the North Sea Route in the 21st century from the CMIP5 ensemble simulations: Bayesian estimates // Research Activities in Earth System Modelling. E. Astakhova (ed.). 2021. Rep. 51. S. 7. P. 07-08.
4. Mokhov I.I., Parfenova M.R. Relationship between the Caspian Sea level and the Arctic sea ice extent // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. E. Astakhova (ed.). 2018. Rep. No 48. WCRP Rep. No 15/2018. S.2. P. 19-20.

5. Mokhov I.I., Parfenova M.R. Link of the Barents Sea ice extent with El-Nino phenomena // Research activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. E. Astakhova (ed.). 2018. Rep. No 48. WCRP Rep. No 15/2018. S.2. P. 17-19.
6. Mokhov I.I., Parfenova M.R. Link of the Arctic and Antarctic sea ice extent with El Nino phenomena // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. E. Astakhova (ed.). 2019. Rep. No 49. WCRP Rep. No. 12/2019. S.2. P. 11-12.
7. Mokhov I.I., Parfenova M.R. Changes of the sea ice and snow cover extent associated with temperature changes in the Northern and Southern Hemispheres in recent decades // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 1040. P. 012016. doi:10.1088/1755-1315/1040/1/012016
8. Parfenova M., Arzhanov M., Mokhov I.I. Seasonal features of snow cover extent variations in Eurasia in the annual cycle and their changes over the decades // Research Activities in Earth System Modelling. E. Astakhova (ed.). 2022. Rep. 52. WCRP Report No.4/2022. S. 2. P. 19-20.
9. Parfenova M.R., Mokhov I.I. Regional intraseasonal anomalies in transitional seasons in Northern Eurasia. Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. E. Astakhova (ed.). Rep. No 48. 2018. WCRP Rep. No. 15/2018. S. 2. P. 23-24.
10. Parfenova M.R., Mokhov I.I. Probability density functions for anomalies of surface air temperature in North Eurasian regions: bimodal (polymodal) features in transitional seasons, Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 112088I (18 December 2019); doi: 10.1117/12.2541743

Парфенова Мария Руслановна

Связь протяженности снежного покрова и морских льдов по спутниковым данным и модельным расчетам в 20–21 веках и региональных и глобальных температурных изменений

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____