

На правах рукописи



Семенов Владимир Анатольевич

Долгопериодные климатические колебания в Арктике и их
связь с глобальными изменениями климата

Специальность: 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва - 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской Академии наук
Институте физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Груза Георгий Вадимович

доктор физико-математических наук,
профессор
Гулев Сергей Константинович

доктор физико-математических наук
Дианский Николай Ардальянович

Ведущая организация: Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

Защита состоится « » _____ 2010 года в 11:00 на заседании диссертационного Совета Д 002.096.01 в Учреждении Российской академии наук Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН по адресу Москва, 119017, Пыжевский пер. д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан « » _____ 2010 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.096.01

кандидат географических наук

Краснокутская Л.Д.

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена исследованию долгопериодных климатических колебаний в высоких широтах Северного полушария (СП), связанных с естественной изменчивостью в земной климатической системе. На основе анализа эмпирических данных и численных экспериментов с климатическими моделями предложены физические механизмы формирования долгопериодных колебаний климата в Арктике, их связь с глобальными климатическими изменениями и влияние на характеристики климата континентов Северного полушария. Показано, что естественная климатическая изменчивость в Северной Атлантике и Арктике может приводить к глобальным изменениям климата, объясняющим более 50% потепления в СП в последние десятилетия. Выявлена важная роль взаимодействия атмосферы и океана в регионе Баренцева моря в усилении долгопериодных климатических колебаний благодаря положительной обратной связи между притоком океанического тепла и границей ледового покрова. Показано, что наличие такой обратной связи может приводить к нелинейному отклику на относительно слабое внешнее воздействие (изменение солнечной постоянной), приводящему к резким климатическим изменениям в высоких широтах СП.

Актуальность темы

Рост глобальной приповерхностной температуры, отмеченный по данным инструментальных наблюдений за последние 150 лет, значительно ускорился в последние десятилетия. Глобальное потепление с начала XX века составило 0.74°C , при этом с 1970 г. температура выросла более чем на 0.5°C . Подобная динамика климатических изменений характерна для многих регионов. Так, в Европе (включая европейскую часть России) среднегодовая приповерхностная температура воздуха (ПТВ) с начала XX века до начала 1970-х годов повысилась примерно на 0.4°C , в то время как только за три последних десятилетия XX века рост составил более 1.2°C . Наиболее сильное потепление отмечается в высоких широтах Северного полушария в зимний период. Потепление сопровождается уменьшением площади ледового покрова в Арктике, сократившегося с начала периода спутниковых наблюдений (1979 г.) более чем на 20% (для годового минимума распространения льда в сентябре). Таяние морского льда в последние годы также резко ускорилось, что вызвало интенсивную дискуссию о возможности достижения определенного

порогового значения, при достижении которого климатические изменения в Арктике станут необратимыми.

Причины ускорившихся климатических изменений однозначно не определены. Основной гипотезой, объясняющей динамику климата в индустриальный период, считается влияние увеличения содержания парниковых газов антропогенного происхождения в атмосфере. Климатические модели в экспериментах по моделированию климата 20-го столетия под влиянием внешних естественных (солнечная, вулканическая активность) и антропогенных факторов (антропогенные парниковые газы, аэрозоли) хорошо воспроизводят глобальные изменения приземной температуры воздуха в последние десятилетия, что свидетельствует в пользу гипотезы антропогенного потепления. В то же время отмечается ряд существенных расхождений между модельными результатами и данными наблюдений. Важной особенностью динамики климата в XX веке являлось значительное потепление в первой половине XX века, достигшее пика в 1940-х гг., с последующим похолоданием до начала 1970-х гг. Эта долгопериодная температурная аномалия прослеживается во всех широтах СП, причем амплитуда потепления середины XX века (ПСВ) увеличивается в высоких широтах СП и достигает максимального значения в Арктике (рис. 1). Модели в целом не воспроизводят потепление середины XX века, в ансамблевых экспериментах по воспроизведению климата с использованием антропогенных и естественных внешних воздействий. Это может свидетельствовать о том, что потепление середины XX века было связано не только с внешним воздействием на климат, но и с естественной внутренней климатической аномалией. Расхождение модельных результатов с данными наблюдений может также объясняться неверными оценками факторов внешнего воздействия на климат в период ПСВ, главным образом солнечной активности. Последние исследования, однако, свидетельствуют о том, что амплитуда этого воздействия и чувствительность к нему земного климата были скорее переоценены, чем недооценены.

Понимание механизмов формирования ПСВ и усиления его амплитуды в высоких широтах СП (так называемого «арктического усиления») является важнейшей задачей исследования динамики климата Земли и прогноза будущих климатических изменений.

Значительные квазипериодические долгопериодные (50-70 лет) колебания климата в Северной Атлантике (СА) выявлены по данным наблюдений и

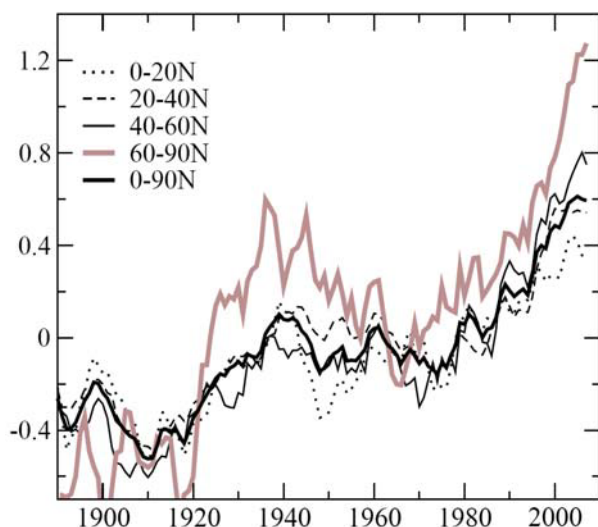


Рис. 1: Среднегодовые аномалии ПТВ (°C) в различных широтных зонах Северного полушария, 5-летнее скользящее осреднение. Данные HadCRUT3.

реконструкций и, как предполагается, связаны с автоколебаниями меридионального круговорота воды в СА, сопровождающегося изменениям океанического переноса тепла в северные широты. Некоторые климатические модели способны адекватно воспроизводить такие колебания. В последние несколько лет появились работы, указывающие на связь долгопериодной климатической изменчивости в СА с потеплением середины XX века и ее возможным вкладе в современное потепление. Такие предположения основываются на синфазности долгопериодной климатической изменчивости в СА и колебаний глобальной (или среднеполушарной) ПТВ. В последние десятилетия, начиная с 1970-х гг. долгопериодное колебание в СА переходит в положительную фазу с ростом температуры поверхности океана (ТПО) в СА, что позволяет предположить наличие значительного вклада естественной климатической изменчивости в глобальном потеплении последних десятилетий. Убедительного подтверждения такой гипотезы до сих пор не представлено. Применение статистических методов анализа к относительно непродолжительным данным наблюдений (порядка 100 лет) не позволяет однозначно разделить антропогенную и естественную климатическую изменчивость на междекадных временных масштабах. Результаты ансамблевых экспериментов с климатическими моделями демонстрируют почти идеальное воспроизведение (при осреднении по ансамблю моделей) глобального потепления последних десятилетий при наличии антропогенных и естественных факторов внешнего воздействия на климат, что не оставляет места для вклада внутренней климатической изменчивости.

Одной из важных проблем является отсутствие достоверных оценок вклада региональных колебаний климата в СА (область Атлантического океана, в которой

проявляется сильный сигнал естественных долгопериодных колебаний, составляет менее 6% от площади СП) в глобальные климатические изменения. Принципиальным недостатком исследований, посвященных данному вопросу, является ограничение области воздействия естественного долгопериодного колебания регионом Северной Атлантики, где наблюдаются наиболее значительные изменения ТПО (35°-60° с.ш.). Между тем, долгопериодное колебание также проявляется в высоких широтах СП, сопровождаясь значительными изменениями площади ледового покрова в Арктике и температуры воздуха. Учет этих факторов чрезвычайно важен для оценки вклада естественных долгопериодных колебаний меридионального переноса тепла в Северной Атлантике в глобальные изменения климата.

В настоящее время задача количественной оценки вклада естественных климатических колебаний в глобальное потепление становится чрезвычайно актуальной, так как климатические модели предсказывают дальнейшее ускорение потепления с катастрофическими последствиями уже в ближайшие десятилетия. Выявление и обоснование значительного вклада естественной изменчивости в современные климатические изменения позволили бы скорректировать чувствительность моделей к факторам внешнего воздействия и существенно улучшить климатические прогнозы. Согласно данным наблюдений, рост глобальной (как и осредненной по СП) температуры воздуха существенно замедлился в последнее десятилетие. Сохранение такой тенденции в ближайшие годы поставит много вопросов к современному пониманию динамики климатических изменений. Ввиду выше сказанного, необходимо строгое научное исследование, каков относительный вклад естественной изменчивости и антропогенного воздействия в современные изменения климата.

Помимо важных региональных последствий, таких как таяние льда и воздействие на климат северных континентов, изменения климата в Арктике могут не только являться следствием глобальных процессов, но, как будет показано в дальнейшем, также оказывать воздействие на глобальный климат, являясь важным звеном в формировании глобальных климатических аномалий, вызванных естественной изменчивостью в Земной климатической системе (ЗКС). Исследованию долгопериодных колебаний климата в Арктике, механизмам их формирования, влиянию на глобальный климат и региональные климатические аномалии посвящена данная работа.

Цели работы

1. Установление и физическое описание механизмов долгопериодной климатической изменчивости в высоких широтах СП, в частности потепления середины XX века.
2. Количественная оценка влияния процессов взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике и Арктике на глобальные изменения климата и формирование региональных климатических аномалий, включая экстремальные погодные режимы на территории России.

Задачи исследования

1. Анализ пространственной структуры изменчивости приповерхностной температуры в высоких широтах СП, используя данные наблюдений в XX веке, с целью выявления основных факторов, влияющих на формирование долгопериодных климатических аномалий.
2. Выявление возможных механизмов формирования естественной долгопериодной климатической изменчивости в Арктике на основе анализа данных численных экспериментов с глобальными климатическими моделями.
3. Исследование влияния естественных долгопериодных колебаний климата в Северной Атлантике на климатические изменения в Арктике и их совместного вклада в формирование глобальных климатических аномалий. Количественная оценка вклада естественной изменчивости в глобальное потепление последних десятилетий на основе численных экспериментов с совместной МОЦА и моделью верхнего деятельного слоя океана.
4. Моделирование механизма положительной обратной связи между океаническим притоком в Баренцево море и ледовым покровом, усиливающего долгопериодные колебания климата в Арктике и способного приводить к резким изменениям климата высоких широтах СП.
5. Исследование гипотезы о существовании значительной отрицательной аномалии площади ледового покрова в Арктике в середине XX века во время потепления середины XX века (сравнимой с современными изменениями) с помощью численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы (МОЦА).
6. Выявление механизма формирования экстремально холодных зим над континентами СП на фоне глобального потепления в годы сильных положительных

аномалий приповерхностной температуры в Арктике с использованием численных экспериментов с МОЦА на чувствительность климата высоких широт к изменениям концентрации ледового покрова в арктических морях.

Методы исследования

Основным методом исследования является моделирование климатической изменчивости с помощью совместных моделей климата, включающих модели общей циркуляции океана, атмосферы и морского льда. Анализировались контрольные эксперименты (то есть эксперименты без внешних воздействий) с глобальными климатическими моделями, хорошо воспроизводящие наблюдаемые долгопериодные климатические изменения в Арктике. Такие эксперименты позволяют использовать весь набор расчетных характеристик крупномасштабной океанической и атмосферной циркуляции и морского льда.

Автором работы был выполнен ряд оригинальных численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы при использовании заданных граничных условий на нижней границе атмосферы (температура поверхности океана и границы морского льда) в регионе Баренцева и Карского морей, а также ансамблевые эксперименты по моделированию климатических изменений за последние 130 лет, включая различные эксперименты на чувствительность атмосферной циркуляции к изменениям тех или иных граничных условий.

Впервые были проведены эксперименты с совместной МОЦА и термодинамической моделью деятельного верхнего слоя океана с использованием аномалий океанической конвергенции тепла (ОКТ) в Северной Атлантике и Арктике. При этом использовались как различные эмпирические оценки ОКТ, так и оценки, полученные по результатам экспериментов с совместными моделями общей циркуляции атмосферы, океана и морского льда. Такие эксперименты позволяют оценить влияние долгопериодных аномалий крупномасштабной океанической циркуляции, в частности в Северной Атлантике, на глобальный климат.

Для объяснения нелинейного отклика атмосферной циркуляции в зимний период на уменьшение концентрации льда в Баренцевом и Карском морях применялась модель бароклинного пограничного слоя атмосферы, позволяющая получить аналитическое решение для аномалии приземного давления вблизи локального источника тепла на нижней границе атмосферы, хорошо описывающее изменения, полученные в результате численных экспериментов с МОЦА.

Основные положения выносимые на защиту:

1. Результаты исследования пространственно-временной структуры изменчивости приповерхностной температуры воздуха в высоких широтах СП с выделением пространственной структуры, описывающей долгопериодные колебания климата в Арктике.
2. Механизм формирования долгопериодных (50-70 лет) аномалий климата в высоких широтах СП вследствие изменений океанического притока тепла (связанного с вариациями североатлантической меридиональной циркуляции) в Баренцево море, усиленных положительной обратной связью между притоком и границей ледового покрова. Этот механизм может объяснить, в частности, потепление середины XX века в Арктике.
3. Количественные оценки вклада естественных колебаний океанического переноса тепла в Северной Атлантике в глобальные изменения приповерхностной температуры воздуха, объясняющие около 50% потепления в Северном полушарии в последние три десятилетия.
4. Механизм резких климатических изменений в регионе Баренцева моря вследствие относительно слабого внешнего воздействия на климат (изменение солнечной постоянной) и обусловленных положительной обратной связью между океаническим притоком тепла и границей ледового покрова.
5. Механизм нелинейного отклика атмосферной циркуляции в зимний период на монотонное уменьшение концентрации морского льда в Баренцевом и Карском морях, связанный с взаимодействием конвекции над источником тепла, приводящей к образованию циклонической аномалии циркуляции и изменению горизонтальных градиентов температуры вокруг источника тепла, приводящих (вследствие изменения термического ветра) к антициклонической аномалии циркуляции.

Научная новизна

1. Впервые получены количественные оценки вклада естественной долгопериодной изменчивости в Северной Атлантике и Арктике в ускорившиеся изменения климата в последние десятилетия. Эти результаты получены с помощью оригинальных численных экспериментов с глобальной климатической моделью и свидетельствуют о том, что около 50% современного потепления с середины 1970-х гг. может быть связано с естественной климатической изменчивостью. Впервые показано, что потери

тепла с поверхности океана в высоких широтах СП являются важным фактором в формировании глобальных климатических аномалий.

2. На основе анализа эмпирических данных и результатов экспериментов с глобальными моделями общей циркуляции атмосферы, океана и морского льда (ГМОЦАО) предложен механизм формирования долгопериодных аномалий климата в Арктике, в частности, потепления середины XX века. Показано, что такие изменения климата могут быть связаны с вариациями океанического притока в Баренцево море и усиливаться благодаря эффекту положительной обратной связи между притоком и морским льдом. Наличие такой положительной обратной связи продемонстрировано в проведенных численных экспериментах с климатическими моделями.

3. Впервые с помощью ГМОЦАО показана возможность полного прекращения океанического притока в Баренцево море, приводящее к резким климатическим изменениям в высоких широтах СП. Обнаруженный эффект предоставляет новую концепцию для понимания резких скачков климата в прошлом. Механизм этого явления также связан с упоминавшейся ранее положительной обратной связью между океаническим притоком и льдом в Баренцевом море.

4. Предложен новый механизм формирования экстремально холодных погодных режимов над территорией континентов СП в зимний период, таких, например, как исключительно холодная зима 2005/2006 г. в Европе. Показано, что причиной таких похолоданий может быть ускорившееся таяние морского льда в Баренцевом и Карском морях. Выявлен и объяснен эффект нелинейного отклика атмосферной циркуляции в зимний период на уменьшение площади ледового покрова (и, соответственно, нагрева пограничного слоя атмосферы), приводящий к образованию антициклонической аномалии над источником тепла.

5. Впервые показано, что в современном архиве сеточных данных по концентрации ледового покрова в XX веке, используемом, в том числе, для оценок Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК - IPCC), существенно недооценивается отрицательная аномалия площади ледового покрова (ЛП) в Арктике в середине XX века в зимний период. Проведенные эксперименты с моделью общей циркуляции указывают на наличие такой аномалии ЛП в середине XX века, сравнимой с современными изменениями.

Научная и практическая значимость

1. Предложенный механизм формирования долгопериодных колебаний климата в Арктике под влиянием квазипериодических колебаний североатлантической меридиональной циркуляции (САМЦ) создает основу для улучшения климатического прогноза в арктическом регионе.
2. Учет аномальных потоков тепла из океана в атмосферу в Арктике, наряду с потоками в Северной Атлантике, позволил существенно скорректировать оценки влияния регионального Атлантического долгопериодного колебания (связанного с САМЦ) на климат. Разработана методика оценки воздействия аномалий океанического переноса тепла в СА на глобальный климат с помощью совместной модели МОЦА и термодинамической модели верхнего слоя океана. Эта методика может в дальнейшем применяться для оценок влияния различных мод крупномасштабной океанической циркуляции на глобальный климат. С помощью проведенных численных экспериментов показано, что вклад естественных колебаний океанического переноса тепла в СА в современное потепление в Северном полушарии может составлять около 50%, что соответственно уменьшает оценку роли антропогенного воздействия на климат.
3. Полученный результат важен как для улучшения качества климатических прогнозов на ближайшие десятилетия, так и для совершенствования моделей климата, которые, согласно полученным оценкам, могут существенно переоценивать чувствительность климата к увеличению содержания парниковых газов в атмосфере (и/или недооценивать чувствительность к изменениям содержания аэрозолей в атмосфере).
4. Важным результатом проведенных численных экспериментов на чувствительность климата к концентрации морского льда (КМЛ) в Баренцевом и Карском морях является возможность холодных аномалий на фоне ожидаемого потепления над прилегающими к Арктике континентами в ответ на резкое потепление в самой Арктике вследствие уменьшения ледового покрова в определенном диапазоне (от 80% до 40% КМЛ). Изменения подобного масштаба ожидаются при экстраполировании климатических трендов площади Арктического ледового покрова при продолжающемся глобальном потеплении. Это позволяет предположить, что вероятность холодных зим над обширными регионами северных

континентов может увеличиться в будущем, несмотря на глобальное потепление и потепление в Арктике.

5. Предложенный механизм формирования быстрых климатических изменений в высоких широтах СП открывает новые перспективы для понимания динамики климата в прошлом, в частности для объяснения быстрых флуктуаций, прослеживающихся в палеоклиматических реконструкциях в Северной Атлантике и Европе.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались автором:

на семинарах Отдела исследования климатических процессов и Лаборатории теории климата Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, семинаре Физического направления Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, семинарах Отдела океанической циркуляции и динамики климата Института морских наук им. Лейбница, семинарах Метеорологического института им. Макса Планка (г. Гамбург, Германия), рабочих совещаниях в Полярном институте им. Скота (Кембридж, Великобритания), Финском институте морских исследований (г. Хельсинки, Финляндия), Центре изучения биосферы из космоса (г. Тулуза, Франция), в Институте климатических исследований (г. Потсдам, Германия), в Геофизическом институте и Исследовательском центре им. Нансена (г. Берген, Норвегия);

на ежегодных ассамблеях Европейского геофизического общества (EGS/EGU, г. Ницца, Франция и г. Вена, Австрия), в том числе в качестве приглашенного докладчика, на Заключительной конференции по изучению арктической климатической системы в рамках программы ACSYS (г. Санкт-Петербург, 2003), на Открытой научной конференции, посвященной Международному полярному году (SCAR, г. Санкт-Петербург, 2008), на Всемирной конференции по изменению климата (г. Москва, 2003).

Публикации

По теме диссертации опубликовано более 40 работ, из них 23 в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах (Известия РАН, Физика атмосферы и океана, Доклады РАН, Метеорология и гидрология, Водные ресурсы, Geophysical Research

Letters, Journal of Geophysical Research, Journal of Climate, Climate Dynamics, Tellus, Climatic Change, Global and Planetary Change).

Личный вклад автора

Все основные результаты, представленные в работе, получены автором лично. В работах, относящихся к выносимым на защиту результатам и выполненным в соавторстве, основная идея исследования принадлежала автору.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы из 302 наименований. В ней содержится 268 страниц текста, 6 таблиц, 59 рисунков.

Содержание диссертации

Во **введении** обоснована актуальность работы, приводится обзор современного состояния исследований климатических изменений в высоких широтах Северного полушария и механизмов их взаимодействия с глобальными климатическими изменениями, формулируются цели работы, аргументируются методы исследования, а также приводится краткий обзор содержания диссертации.

В первой главе представлены результаты исследований пространственно-временной структуры изменчивости приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) в высоких широтах Северного полушария (СП) в XX веке и ее связь с крупномасштабной атмосферной циркуляцией. Выделена характерная пространственная структура температурных аномалий, связанная с долгопериодными колебаниями климата в Арктике. В **разделе 1.1** формулируются предмет и цели исследования. В **разделе 1.2** приводится описание данных и методов исследования, используемых в работе. Анализировался массив данных по ПТВ, составленный в Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ, Санкт-Петербург), включающий данные измерений над ледовым покровом и состоящий из среднемесячных значений ПТВ на сетке $5^\circ \times 10^\circ$ широты/долготы за период 1892-1999 гг. Пространственные моды изменчивости выделялись с помощью разложения на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ). Временная эволюция ЭОФ представлена соответствующими главными компонентами (ГК), вычисляемыми как геометрическое произведение соответствующей ЭОФ и исходного поля температурных аномалий.

В разделе 1.3 приводятся результаты ЭОФ анализа полей температурных аномалий во внетропических широтах СП за период 1892-1999 гг. Согласно критерию,

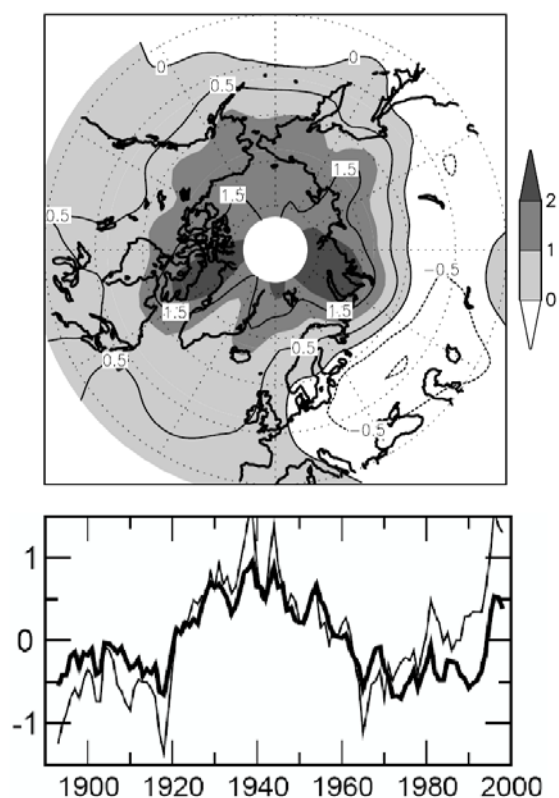


Рис. 2: ЭОФ3 (вверху) зимних (ноябрь-апрель) аномалий приповерхностной температуры к северу от 40° с.ш. за период 1892-1999 гг. и (внизу) соответствующая главная компонента (ГКЗ, жирная кривая) вместе с аномалиями среднеарктический (60° - 90° с.ш.) ПТВ (тонкая кривая).

основанному на логарифмической зависимости собственных значений «случайных» ЭОФ от их порядкового номера (отклонение от логарифмической зависимости указывает на значимость соответствующей моды изменчивости), первые 4 эмпирические ортогональные функции как для зимнего, так и для летнего периодов содержат статистически значимую информацию. Эти моды изменчивости также не зависят от временного периода. Вариации ПТВ в зимний период в арктическом регионе имеют в среднем в 2 раза большую амплитуду, чем в летний период. Выявлено, что первая ЭОФ (описывающая 21.2% изменчивости температуры) связана с Северо-атлантическим колебанием (САК).

Корреляция с САК составляет 0.51, а с

ведущей модой изменчивости приземного давления в СП, часто называемой Арктическим колебанием, 0.77. ЭОФ1 имеет характерную пространственную структуру с максимумом над Евразией и минимумом к западу от Гренландии. Вторая ЭОФ (12.3%) статистически значимо коррелирована (0.34) с Южным колебанием и имеет симметричную дипольную структуру, не внося существенного вклада в среднеарктические аномалии ПТВ. Индекс Южного Колебания, характеризуются отрицательным трендом, что означает усиление контраста асимметричных колебаний ПТВ над сушей западного и восточного полушарий, описываемого ЭОФ2.

Важным результатом является выделение третьей ЭОФ (11.7%), которая, как показал анализ, не связана с изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции в СП, имеет характерную пространственную структуру с максимумами в регионе Баренцева моря и залива Баффина и описывает долгопериодные температурные

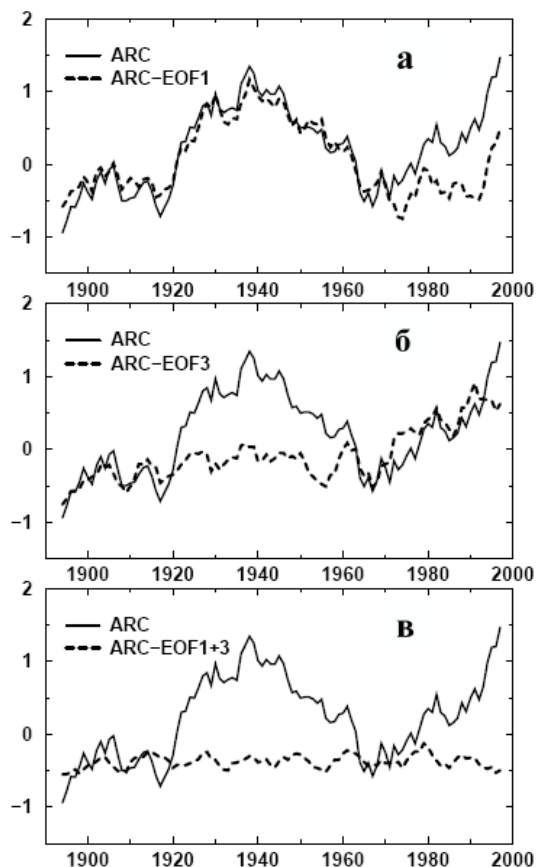


Рис. 3: Аномалии среднеарктической (60° - 90° с.ш.) приповерхностной температуры в зимний период (сплошная кривая), с вычетом (прерывистая кривая) изменчивости, относящейся к ЭОФ1 (а), ЭОФ3 (б) и вычетом суммарного вклада ЭОФ1+3 (в).

колебания в Арктике, в частности потепление середины XX века (рис. 2, корреляция между ГКЗ и среднеарктической температурой составляет 0.79). Структура этой ЭОФ позволяет предположить, что эта мода связана с вариациями морского ледового покрова (МЛП). Относительно короткий ряд достоверных данных по МЛП в зимние месяцы не позволяет идентифицировать долгопериодную аномалию, соответствующую потеплению в Арктике в середине XX века. Однако она прослеживается в региональных и реконструированных данных для Баренцева и Карского морей и, как показано в главе 2, на наличие такой аномалии указывают и результаты экспериментов с МОЦА.

В разделе 1.4 обсуждаются полученные результаты ЭОФ анализа и приведены основные выводы из анализа климатической изменчивости по данным наблюдений. Отмечается, что ЭОФ1, связанная с САК и ЭОФ3, описывающая долгопериодные колебания, практически полностью (94%) описывают изменения зимней ПТВ в Арктике в XX веке. Рис. 3 показывает вклад этих мод изменчивости в среднеарктические (осредненные по региону 60° - 90° с.ш.) аномалии ПТВ и хорошо иллюстрирует роль САК в изменениях арктического климата, часто считающимся главным фактором в формировании аномалий ПТВ в Арктике. Видно, что до 1970-х гг., САК практически не вносило вклада в среднезональные колебания ПТВ. В период 1970-1990 гг.

положительные тренд САК объясняет более половины арктического потепления. С 1990-х гг. мода, связанная с долгопериодным колебанием в Арктике опять вносит основной вклад в современное потепление. Такая динамика (временной ряд ГКЗ, см. рис. 2) хорошо коррелирует (0.45 для годовых значений и 0.84 при 9-летнем скользящем осреднении) с индексом Атлантического долгопериодного колебания (АДК), что говорит о тесной связи ЭОФ3 с АДК. Эта связь будет обсуждаться в последующих главах.

Тот факт, что две, предположительно связанные с естественными колебаниями, моды температурной изменчивости практически полностью описывают ход зимней ПТВ в Арктике в XX столетии, указывает на потенциальные трудности в выделении антропогенного воздействия на климатические изменения в этом регионе. Для летнего периода характерна в целом значительно меньшая связь изменчивости температуры с атмосферной циркуляцией. Первая ведущая мода изменчивости описывает положительный температурный тренд последних десятилетий, предположительно связанный с глобальным потеплением, в то время как вторая ведущая ЭОФ описывает долгопериодную осцилляцию.

Вторая глава посвящена анализу экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы с целью исследования роли колебаний площади арктического ледового покрова в формировании температурных аномалий в Арктике. Представлены результаты численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы (МОЦА) с использованием эмпирических данных по температуре поверхности

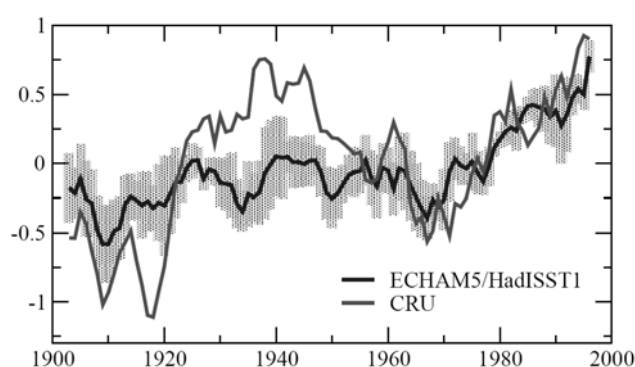


Рис. 4: Аномалии (5-летнее скользящее среднее) среднеарктической (60°-90° с.ш.) ПТВ в зимний период (серая кривая) по данным наблюдений (CRUT3) и результатам экспериментов с МОЦА (черная кривая – среднее по ансамблю модельных экспериментов). Штриховкой обозначены среднеквадратичные отклонения по ансамблю модельных экспериментов.

что модель хорошо воспроизводит потепление последних 30 лет XX века, но не

океана (ТПО) и границе морского льда (ГМЛ) в XX веке (анализ ТПО и ГМЛ Центра Гадлея, Великобритания, HadISST1.1) в качестве граничных условий на нижней границе атмосферы. Концентрации парниковых газов и аэрозолей были заданы в соответствии с данными наблюдений и эмпирическими оценками для XX века. Эксперименты показывают (рис. 4),

способна воспроизвести потепление середины XX века. Поскольку изменения ПТВ в Арктике в зимний период тесно связаны с аномалиями ГМЛ, предполагается, что причиной расхождения является отсутствие отрицательной аномалии ГМЛ в заданных граничных условиях в период потепления середины XX века. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что потепление середины XX века сопровождалось значительной отрицательной аномалией площади льда в Арктике, сравнимой с современными трендами, и также указывают на значительный вклад естественной изменчивости в современные климатические изменения.

В **разделе 2.1** обсуждаются современные данные по ледовому покрову в Арктике. Систематические наблюдения за ГМЛ начались в 1950-х годах. До этого периода данные были неполными, особенно для зимнего периода, когда теплообмен между океаном и атмосферой оказывает наиболее сильное влияние на формирование температурных аномалий. Отсутствие регулярных достоверных данных по ледовому покрову в первой половине XX века привело к существенному занижению амплитуды колебаний зимней ГМЛ в современных массивах данных по ГМЛ, распространяемых Центром Гадлея, Великобритания (HadISST1.1). Для исследования достоверности сеточных данных можно использовать эксперименты с МОЦА, в которых эти данные служат граничными условиями на поверхности океана. Описание модели и проведенных экспериментов приведены в **разделе 2.2**. Результаты представлены в **разделе 2.3**. Проведенные эксперименты показывают (рис. 4), что арктическое потепление середины XX века должно было сопровождаться значительной аномалией ГМЛ, сравнимой с современными изменениями. Об этом говорят и дополнительные эксперименты на чувствительность с использованием фиксированных значений ГМЛ при изменяющихся (эмпирических) значениях ТПО и наоборот, для периода достоверных данных с 1960 г. В **разделе 2.4** приведены основные выводы. Отмечено, что данные HadISST1.1 широко используются для проведения экспериментов по моделированию климата XX века и оценок изменений климата, в частности ледового покрова, использующихся в результатах МГЭИК. Это приводит к неверному представлению об эволюции площади арктического ледового покрова в XX веке, поскольку при отсутствии значительных изменений ГМЛ в XX века по данным HadISST1.1 до 1970-х гг., происходящее в последние 3 десятилетия быстрое таяние льда считается всецело следствием антропогенного воздействия на климат.

Полученные результаты подтверждают достоверность оценок эволюции ледового покрова в Арктике в XX веке, полученных в ААНИИ, которые указывают на значительное уменьшение площади морского льда в 1920-х гг., по темпам сравнимое с современными изменениями.

Третья глава посвящена исследованию причин арктического потепления середины XX века, ПСВ (рис. 1). Эта потепление является ключевым для понимания механизмов естественной долгопериодной климатической изменчивости в Арктике и, как будет показано в главе 5, их роли в глобальных изменениях климата. На основе анализа данных наблюдений и численных экспериментов с климатическими моделями предложен механизм формирования ПСВ вследствие увеличения притока

океанического тепла в Баренцево море. При этом подчеркивается важная роль положительной обратной связи между океаническим притоком и морским льдом, исследованной в экспериментах с МОЦА и обнаруженной в контрольном эксперименте с совместной моделью общей циркуляции атмосферы, океана и морского льда (МОЦАО).

В разделе 3.1 рассматривается феномен резкого потепления в Арктике в середине XX века. Это потепление является одной из сильнейших региональных климатических аномалий в XX веке. За период около 15 лет среднегодовая температура воздуха в Арктике увеличилась на 1.7 С. Аномально теплый режим продолжался более десятилетия. Такое потепление сравнимо с оценками климатических изменений, вызванных антропогенным воздействием на климат в последние десятилетия. Обсуждаются различные механизмы внешнего радиационного

воздействия, которые могли бы объяснить такую климатическую аномалию. На основании сопоставления пространственно-временных характеристик ПСВ с оценками факторов внешнего радиационного воздействия, а также результатов моделирования этих воздействий с помощью климатических моделей делается

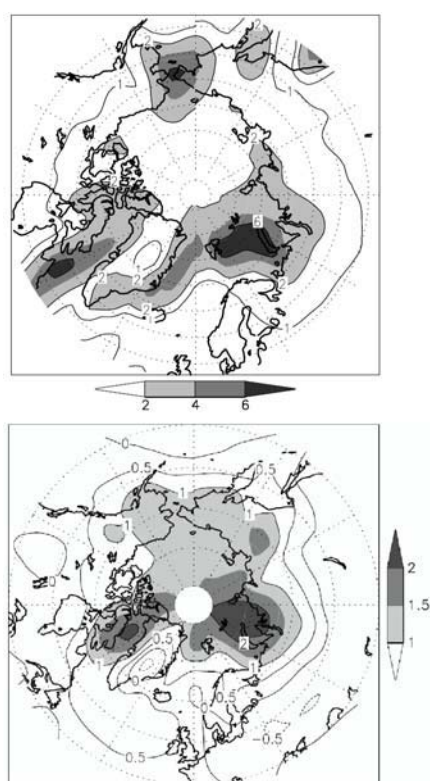


Рис. 5: Аномалии приповерхностной температуры в зимний период (ноябрь-апрель) по данным ААНИИ за период 1935-1944 гг. (внизу) и по результатам численных экспериментов с МОЦА с отрицательной аномалией ГМЛ в Арктике (вверху).

вывод о естественном характере изменений температуры в этот период как основном механизме, объясняющим ПСВ. В **разделе 3.2** с использованием сеточных данных ААНИИ исследуется пространственная структура ПСВ с характерными максимумами потепления в регионе Баренцева и Карского морей и в заливе Баффина (Атлантический сектор Арктики). Аномалия, соответствующая ПСВ, практически идентична структуре ЭОФ3 поля аномалий ПТВ в XX веке, полученной в главе 1. **Раздел 3.3** посвящен анализу численных экспериментов с МОЦА по моделированию влияния изменений ГМЛ на климат высоких широт СП. Результаты показали, что аномалии ГМЛ, соответствующие типичной декадной изменчивости ГМЛ в зимний период (с максимумами изменчивости в регионах Баренцева, Гренландского морей и залива Баффина), приводят в температурным аномалиям аналогичным тем, что характерны для потепления в середине XX века (рис. 5). Приводится анализ чувствительности арктической ПТВ к изменениям площади ледового покрова.

Важным результатом проведенных экспериментов является моделирование отклика

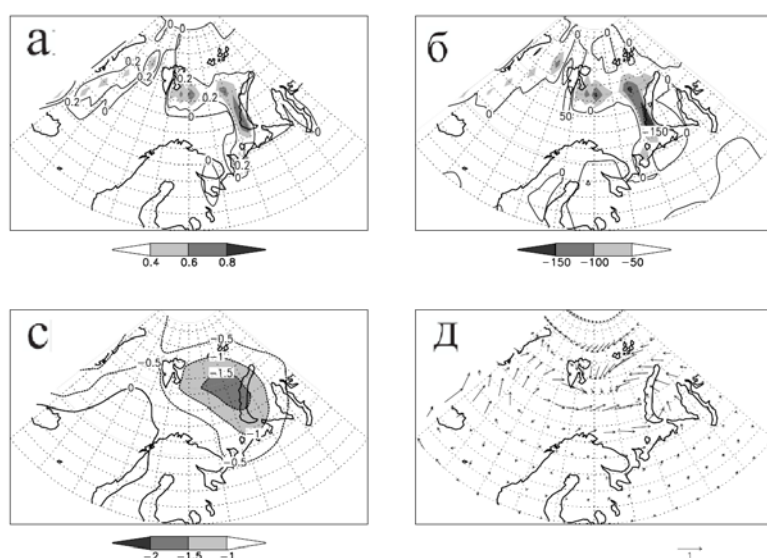


Рис. 6: Аномалии (за декабрь-февраль) концентрации морского льда (а, в долях единицы), турбулентных (латентного и явного) потоков тепла (б, в Вт/м²), давления воздуха на уровне моря (с, в гПа) и приземного ветра (д, в м/с).

циркуляции в нижней тропосфере, сопровождающейся усилением западных и юго-западных ветров (рис. 6д) в западной части Баренцева моря, что должно приводить к интенсификации океанического притока тепла в Баренцево море.

Для исследования роли обратных связей в объединенной системе атмосфера-морской лед-океан, в **разделе 3.4** анализируются результаты контрольного (без внешних

атмосферной циркуляции в регионе Баренцева моря в зимний период на аномалии ГМЛ. Показано, что аномалии ГМЛ (рис. 6а) приводят к увеличению турбулентных потоков тепла из океана в атмосферу (рис. 6б), что вызывает понижение давления воздуха (рис. 6с) и образование циклонической аномалии

воздействий) эксперимента с МОЦАО ЕСНАМ4/ОРУСЗ длительностью 300 лет. Пространственное горизонтальное разрешение модели составляет примерно $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ по широте и долготе. Модель хорошо воспроизводит среднюю среднегодовую площадь ледового покрова в Арктике (9.8 млн. км²) и его межгодовую изменчивость (0.22 млн. км²).

Важным результатом анализа является вывод о том, что изменения площади льда в Баренцевом море и, соответственно, температуры воздуха в зимний период прежде всего определяются океаническим притоком в море через его западную границу. Данный вывод следует из сопоставления вариаций среднегодового притока воды в Баренцево море (ПВБ) в поверхностном слое 125 м через меридиан 20° в.д. и площади ледового покрова (рис. 7) по модельным данным. В анализируемом в

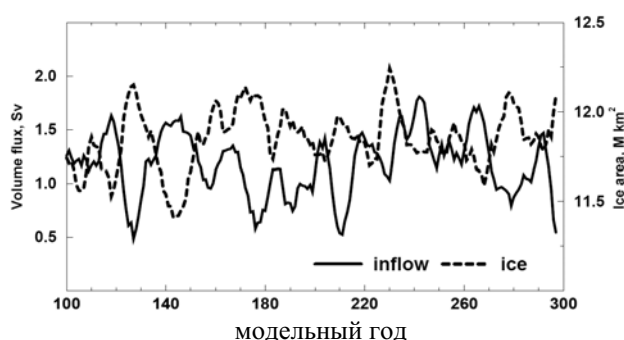


Рис. 7: Значения (5-летние скользящие средние) среднегодового притока воды (в верхнем 125 м слое) через западную границу Баренцева моря (в Свердрупях, сплошная кривая) и зимней (ноябрь-апрель) площади ледового покрова в Арктике (в 10^6 км², прерывистая кривая) в МОЦАО ЕСНАМ4/ОРУСЗ (шкала справа).

данном разделе контрольном эксперименте, изменения океанического притока в Баренцево море связаны с изменениями градиента давления воздуха над западной частью моря. Этот градиент, характеризуемый разностью давления между северным побережьем Норвегии и Шпицбергенем, пропорционален скорости геострофического ветра у поверхности моря, определяющего поверхностные течения. Как показано в разделе 3.3, изменения ледового покрова могут усиливаться из-за вызываемых ими аномалий атмосферной циркуляции. Далее, в главе 7, будет показано, что такая положительная обратная связь может привести к полному прекращению океанического притока воды в Баренцево море. На основе полученных в разделах 1.2-1.3 результатов, в **разделе 3.5** предлагается механизм, объясняющий потепление середины XX века в Арктике. Утверждается, что главной причиной арктического потепления могла являться положительная аномалия океанического притока тепла в Баренцево море в середине XX века, приведшая к уменьшению концентрации морского льда и потеплению (наиболее сильному в зимний период). Хотя такая долгопериодная аномалия площади ледового покрова в Арктике отсутствует в современных массивах данных (HadISST1.1), о ее

данном разделе контрольном эксперименте, изменения океанического притока в Баренцево море связаны с изменениями градиента давления воздуха над западной частью моря. Этот градиент, характеризуемый разностью давления между северным побережьем Норвегии и Шпицбергенем, пропорционален скорости геострофического ветра у поверхности моря, определяющего

существовании говорят как реконструкции по данным ААНИИ (В.Ф. Захаров), так и результаты моделирования, представленные в главе 2. Отмечается, что Североатлантическое колебание (САК), которое часто рассматривается как основной фактор в формировании аномалий арктического климата, в период 1920-1950 гг. не коррелирует с температурными аномалиями в Арктике. Подробнее нестационарность связи САК и арктического климата будет рассмотрена в главе 4. Аномалии океанического притока воды в Баренцево море могли быть вызваны как длительной флуктуацией региональной атмосферной циркуляции, усиленной положительной обратной связью между притоком и морским льдом, так и модуляцией притока долгопериодными колебаниями североатлантической меридиональной циркуляции (САМЦ). При этом положительная обратная связь также играет важную роль в увеличении амплитуды изменения притока. В **разделе 3.6** обсуждаются полученные в данной главе результаты. Отмечается, что значительные температурные изменения в Арктике могут также оказывать обратное воздействие на САМЦ путем, например, ослабления меридионального атмосферного переноса тепла и влаги в Северном полушарии. Эффект такого воздействия рассматривается в главе 5.

В **четвертой главе** анализируется роль океанического притока в Баренцево море в формировании долгопериодной климатической изменчивости в Арктике. С

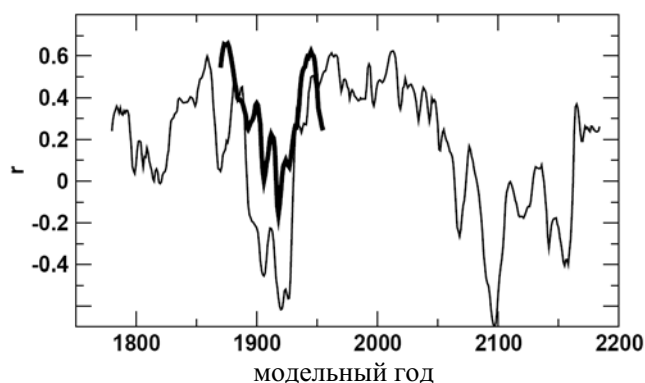


Рис. 8: Корреляция (в скользящем 50-летнем окне, исходные ряды сглажены 5-летним скользящим осреднением) между индексом САК и арктической ПТВ в зимний период по данным наблюдений (жирная линия) и модельным расчетам (тонкая линия). Модельные значения сдвинуты по времени. Корреляции превышающие 0.55 статистически значимы (90%).

помощью анализа эмпирических данных и данных продолжительного эксперимента с глобальной климатической моделью опровергается распространенная гипотеза об определяющем влиянии Североатлантического колебания (САК) на климатические тренды в Арктике, получившая распространение в связи с длительным (1965-1995 гг.)

положительным трендом САК, пришедшимся на период потепления в Арктике. Данные модельного эксперимента свидетельствуют об определяющей роли

вариаций океанического притока в Баренцево море в формировании долгопериодной изменчивости приповерхностной температуры воздуха в Арктике в зимний период. В анализировавшемся контрольном эксперименте долгопериодные колебания притока однозначно вызваны изменениями САМЦ. В этом эксперименте модель хорошо воспроизводит долгопериодные колебания климата в Арктике, что говорит в пользу определяющей роли САМЦ и в формировании наблюдаемых долгопериодных изменений климата.

В **разделе 4.1** кратко описаны мотивация и цель исследования причин формирования долгопериодных колебаний климата в Арктике, основанного на результатах, полученных в главах 1-3. **Раздел 4.2** посвящен описанию использовавшейся климатической модели ECHAM5/MPI-OM и контрольного эксперимента длительностью 500 лет. **Раздел 4.3** содержит результаты анализа численного эксперимента в сопоставлении с данными наблюдений. Показано, что модель очень хорошо воспроизводит как периодичность, так и амплитуду долгопериодных колебаний климата в Арктике. Исследуется связь этих колебаний с индексом Северо-атлантического колебания (САК), являющегося ведущей модой

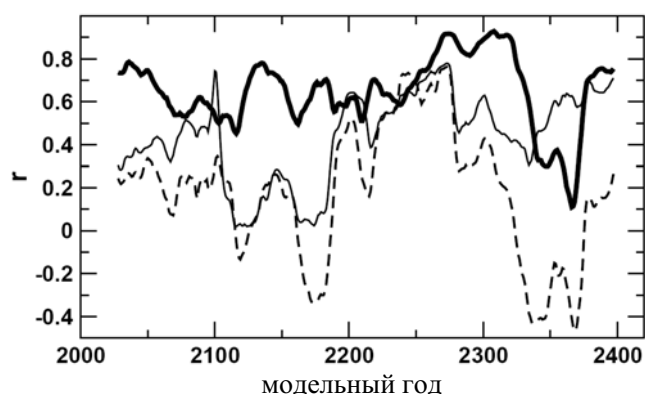


Рис. 9: Корреляция (в скользящем 80-летнем окне, исходные ряды сглажены 5-летним скользящим осреднением) между океаническим притоком и арктической ПТВ (жирная линия), между притоком и индексом САК (тонкая сплошная линия) и между индексом САК и арктической ПТВ (тонкая прерывистая линия). Корреляции превышающие 0.40 статистически значимы (90%).

изменчивости атмосферной циркуляции в высоких широтах СП, и, считающегося важнейшим, фактором формирования климатических аномалий в Арктике. Проведенный анализ показал, что связь между САК и колебаниями температуры воздуха в Арктике за период инструментальных наблюдений нестационарна. Периоды значимой положительной

корреляции САК с температурными изменениями могут перемежаться с периодами отсутствия статистически значимой линейной связи, включая и периоды с отрицательными значениями корреляции (рис. 8). Такая нестационарность хорошо воспроизводится климатической моделью. Для исследования причин температурных колебаний в Арктике проведен анализ корреляционных связей

между океаническим притоком в модели, САК и арктической ПТВ. Результаты говорят о высокой корреляции между притоком и ПТВ, устойчивой для всей продолжительности модельного эксперимента, в то время как связь между САК и притоком или САК и ПТВ значительно слабее и нестационарна (рис. 9). Таким образом, подтверждая результаты главы 3, этот численный эксперимент указывает на вариации океанического притока в Баренцево море как определяющий фактор в формировании изменений климата в Арктике. Сравнение с изменчивостью САМЦ показало, что именно САМЦ формирует долгопериодные изменения притока на долгопериодных временных масштабах (50-80 лет). В **разделе 4.4** приведены основные выводы проведенного исследования долгопериодной климатической изменчивости в Арктике по данным контрольного эксперимента с МОЦАО ЕСНАМ5/MPI-OM. Результаты анализа свидетельствуют об определяющей роли вариаций океанического притока воды в Баренцево море в формировании изменчивости ПТВ (с временным масштабом от нескольких лет и более) в Арктике в зимний период. Интенсивность океанического притока воды определяет величину площади ледового покрова, определяющей турбулентные потоки тепла с поверхности моря в атмосферу. Как показывают данные наблюдений и модельные эксперименты, основным фактором, определяющим межгодовую изменчивость океанического притока, являются изменения атмосферной циркуляции в регионе Норвежского и Баренцева морей. На более длительных временных масштабах (от десятилетия и более), значительную роль также играют изменения САМЦ, часто называемой североатлантической термохалинной циркуляцией (ТХЦ). Причем вклад ТХЦ становится определяющим для долгопериодных (вековых) колебаний. В данном модельном эксперименте корреляция между притоком в Баренцево море и индексом ТХЦ (максимум меридионального круговорота воды в северной Атлантике на 30° с.ш.) составляет 0.28 для среднегодовых значений и 0.60 при 30-летнем скользящем осреднении (при длительности рядов в 450 лет). Соответствующие значения для корреляций с градиентом давления воздуха составляют 0.42 и 0.29. Суммарно эти два фактора объясняют примерно половину долгопериодной изменчивости притока. Изменения ледовитости в Баренцевом море оказывают существенное влияние на региональную атмосферную циркуляцию, что, в свою очередь, может воздействовать на интенсивность Арктического антициклона и вынос льда из Арктики в Атлантику. Это говорит о возможности существования

обратной связи между региональными климатическими изменениями в Баренцевом море и североатлантической ТХЦ.

В **пятой главе** анализируется ряд экспериментов на чувствительность глобальной климатической системы к аномальным потокам тепла из океана в атмосферы, связанных с внутренней изменчивостью. Результаты анализа показали, что внутренняя долгопериодная климатическая изменчивость в Северной Атлантике и атлантическом секторе Арктики могла внести значительный вклад (около 50%) в повышение температуры Северного полушария с 1980-х гг. Главную роль при этом играли аномальные потоки тепла в Арктике, в регионе, покрывающем лишь несколько процентов поверхности Земного шара. Предполагается, что увеличение потерь тепла из океана в атмосферу в последние десятилетия, в частности в атлантическом секторе Арктики, связаны с усилением океанического переноса тепла в северном направлении, которое, в свою очередь, вызвано усилением (переходом в положительную фазу) атлантической меридиональной циркуляции. Результаты экспериментов указывают на важную роль естественной изменчивости в Северной Атлантике не только в формировании региональных, но и глобальных колебаний климата, а также объяснят механизм такого воздействия. Полученные результаты

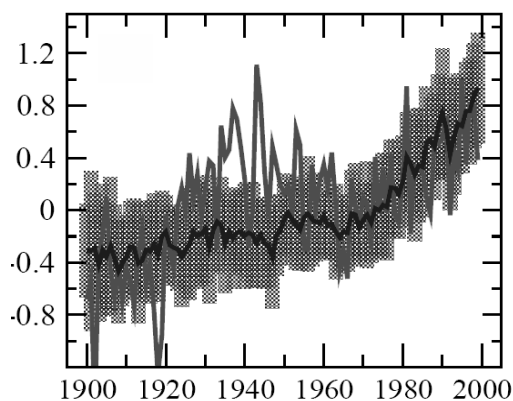


Рис. 10: Среднегодовые аномалии приповерхностной температуры (в °C) в Арктике по данным CRU (серая кривая) и результатам ансамблевых расчетов с моделями МГЭИК. Черная кривая – среднее по ансамблю моделей. Штриховка – среднее квадратичное отклонение по ансамблю моделей.

свидетельствуют о том, что увеличение темпов глобального потепления в последние 30 лет может быть связано не только с усилением антропогенного воздействия, но и с естественной долгопериодной флуктуацией климата. Это, в свою очередь, указывает на возможность переоценки чувствительности глобальных климатических моделей к увеличению концентрации парниковых газов в атмосфере.

В **разделе 5.1** обсуждается долгопериодная динамика климата в XX веке и результаты ансамблевых расчетов с климатическими моделями, участвовавшими в сравнениях под эгидой Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). В свете последних результатов климатического моделирования и анализа эмпирических

данных рассматривается проблема потепления середины XX века. Отмечается, что внешние (как естественные, так и антропогенные радиационные воздействия) на климат не могут объяснить это потепление, а также его зональную структуру. ПСВ в Арктике явно выделяется из диапазона ансамблевых расчетов, в то же время современное потепление последних десятилетий практически идеально воспроизводится моделями (рис. 10). В разделе представлен обзор опубликованных в последние годы работ, анализирующих долгопериодные колебания климата в Северной Атлантике, так называемое Атлантическое Долгопериодное Колебание (АДК). В нескольких работах статистический анализ выявляет сигнал, схожий с АДК как в глобальных аномалиях температуры, так и в удаленных (от атлантического сектора) регионах. Также обнаружено, что расхождения между результатами модельных экспериментов с учетом внешних воздействий и данными наблюдений связаны с АДК, однако причины этой связи до сих пор не ясны. Численные эксперименты с МОЦА, проводимые по общепринятой методике, с предписанными аномалиями ТПО в Северной Атлантике, соответствующими АДК, также не могут объяснить его влияния на глобальный климат. Таким образом, данная проблема требует новых подходов как в моделировании, так и в анализе данных наблюдений, которые используются в данной главе.

В разделе 5.2 рассматривается сигнал АДК в поле температуры поверхности океана и характеристиках морского ледового покрова. Показано, что изменения индекса

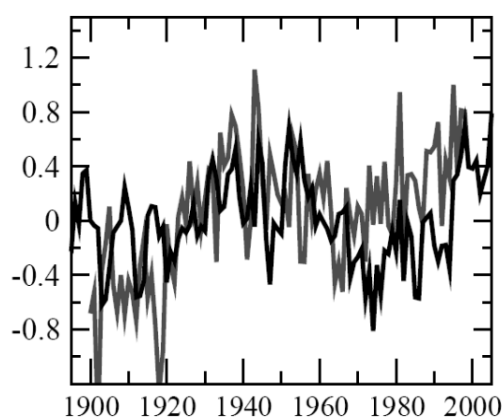


Рис. 11: Среднегодовые аномалии приповерхностной температуры (в °C) в Арктике по данным CRU (серая кривая) и индекс АДК (ТПО в Сев. Атлантике в секторе 40° с.ш.-60° с.ш., 50° в.д.-10° в.д.).

АДК (аномалий ТПО в северной части Атлантического океана) и арктической температуры в зимней период практически идентичны (рис. 11). Еще более сильное сходство отмечается между АДК и ЭОФ3, обсуждавшейся в главе 1. Это говорит о взаимосвязи долгопериодных температурных колебаний в Арктике и АДК. Подобная АДК аномалия арктического ледового покрова отмечена в региональных

данных и косвенным образом подтверждается результатами выполненных автором экспериментов с МОЦА (глава 2). Обсуждается особенность температурных изменений в СП – более высокие темпы потепления в высоких широтах в сравнении

с умеренными и тропическими широтами - получившая название «арктического усиления», физический механизм которого интенсивно обсуждается в настоящее время. Сам термин «усиление» предполагает, что изменения климата в Арктике вызваны внешними факторами и усилены определенными положительными обратными связями. Действительно, глобальные климатические модели воспроизводят «арктическое усиление» в экспериментах с антропогенным воздействием на климат. Однако, средние по ансамблю моделей изменения ПТВ (считающиеся лучшими в смысле устойчивости оценками отклика на внешнее воздействие) существенно недооценивают (на величину от 30% до 60%, в зависимости от выбранного периода) наблюдаемые разности в скорости потепления в высоких и низких широтах в последние десятилетия XX столетия. Причины «арктического усиления» достоверно не определены, но на основании анализа данных можно предположить, что оно связано с влиянием АДК на климат Арктики. Подтверждение этой гипотезы получено с помощью модельных экспериментов, результаты и анализ которых представлены в данной главе.

В разделе 5.3 исследуются аномалии турбулентного потока тепла из океана в атмосферу, связанные с АДК, для трех долгопериодных изменений: переход от

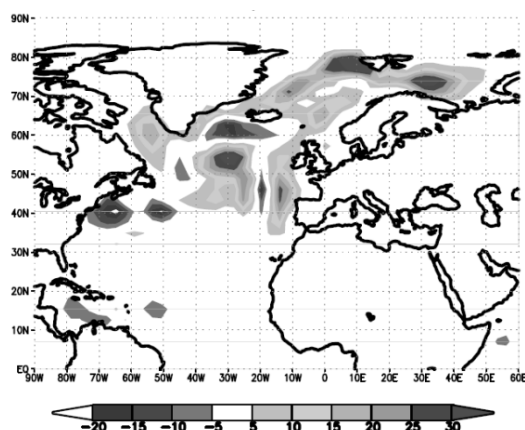


Рис. 12: Аномалии среднегодового турбулентного потока тепла (Вт/м^2) с поверхности океана, связанные с АДК в модели ЕСНАМ5/MPI-OM и использовавшиеся в экспериментах с совместной МОЦА и моделью верхнего однородного слоя океана.

холодной фазы в начале XX века к тепловому максимуму в 1940-х гг., последовавший переход к холодной фазе в 1970-х гг. и переход к современной продолжающейся теплой фазе. Оценки выполнены по данным реанализа Национального центра погодных прогнозов, США, (NCER) и результатам экспериментов с МОЦА, использующих эмпирические данные по ТПО и ГМЛ в XX веке. Выявлена структура таких аномалий с двумя характерными максимумами: в Северной Атлантике (связанного с

аномалиями ТПО) и Атлантическом секторе Арктики вблизи ГМЛ. Обсуждаются проблемы достоверной оценки потоков тепла в первой половине XX века, вызванные отсутствием данных по ГМЛ. Поскольку аномалии потоков тепла,

соответствующие различным фазам АДК в XX веке, могут содержать вклад внешнего воздействия на климат, проведен анализ результатов контрольных экспериментов с климатическими моделями. Были выбраны модели, результаты которых хорошо согласуются с данными наблюдений, и получены оценки аномалий потоков тепла, вызванных исключительно с влиянием АДК. Структура аномальных потоков схожа с эмпирическими оценками и соответствующее таким потокам изменение океанического переноса тепла (порядка 0.1 ПВт) лежит в диапазоне эмпирических оценок естественных колебаний переноса тепла (скорее в нижней части этого диапазона). Полученные оценки аномалий потоков турбулентного тепла с поверхности океана (рис. 12), связанных с АДК, были использованы в экспериментах с климатической моделью для оценки влияния АДК на глобальный климат. Следует отметить, что аномальные потоки тепла обнаруживаются в относительно небольшом регионе, занимающим менее 6% площади СП (Атлантический сектор, к северу от 40° с.ш.). Постановка модельных экспериментов рассматривается в **разделе 5.4**. Использовалась МОЦА Метеорологического института Макса Планка ECHAM5, дополненная термодинамической моделью верхнего перемешанного (50 м) слоя океана (МВПО). Суть экспериментов заключалась в том, что относительно слабая термическая инерция поверхностного перемешанного слоя океана (около 10 лет для глубины в 50 м) позволяет глобальному полю ТПО перейти в новое квазиравновесное состояние при продолжительном воздействии аномальных потоках тепла во время экстремальных фаз АДК продолжающихся 15-20 лет. Аномальные потоки тепла задавались в модели как аномалии океанической конвергенции тепла (ОКТ), представляющие в МПВО перенос тепла, связанный с 3-мерной динамикой океана. Аномальный поток тепла с поверхности океана задавался только в североатлантическом-арктическом секторе (40° с.ш.-90° с.ш., 70° з.д.-80° в.д.), охватывающем менее 6% площади Северного полушария. Для оценки вклада аномальных потоков, связанных с аномалиями ТПО и аномалиями ГМЛ, были проведены эксперименты с воздействием только в Атлантике (сектор 70° з.д.-80° в.д., 40° с.ш.-60° с.ш.) и только в Арктике (сектор 70° з.д.-80° в.д., 60° с.ш.-90° с.ш.). Эксперименты с аномальными потоками ОКТ сравнивались с контрольным экспериментом, соответствующим средним значениям ОКТ для современного климата. Продолжительность каждого модельного эксперимента составляла 100 лет, данные последних 80 лет каждого эксперимента использовались для анализа.

Результаты экспериментов представлены в **разделе 5.5**. Среднегодовое потепление вследствие аномального потока тепла в проведенном эксперименте составило 0.39°C для Северного полушария и 0.24°C при глобальном осреднении. Согласно данным наблюдений (анализ эмпирических данных Института космических исследований Годдарда, GISS), потепление в течение 1978-2007 гг. составило 0.68°C и 0.45°C соответственно. Картина температурных аномалий в модели (рис. 13в) выглядит очень похожей на наблюдаемый тренд за период 1978-2007 гг. (рис. 13г) с наиболее сильным потеплением в СА и Арктике и реалистичной широтной структурой в

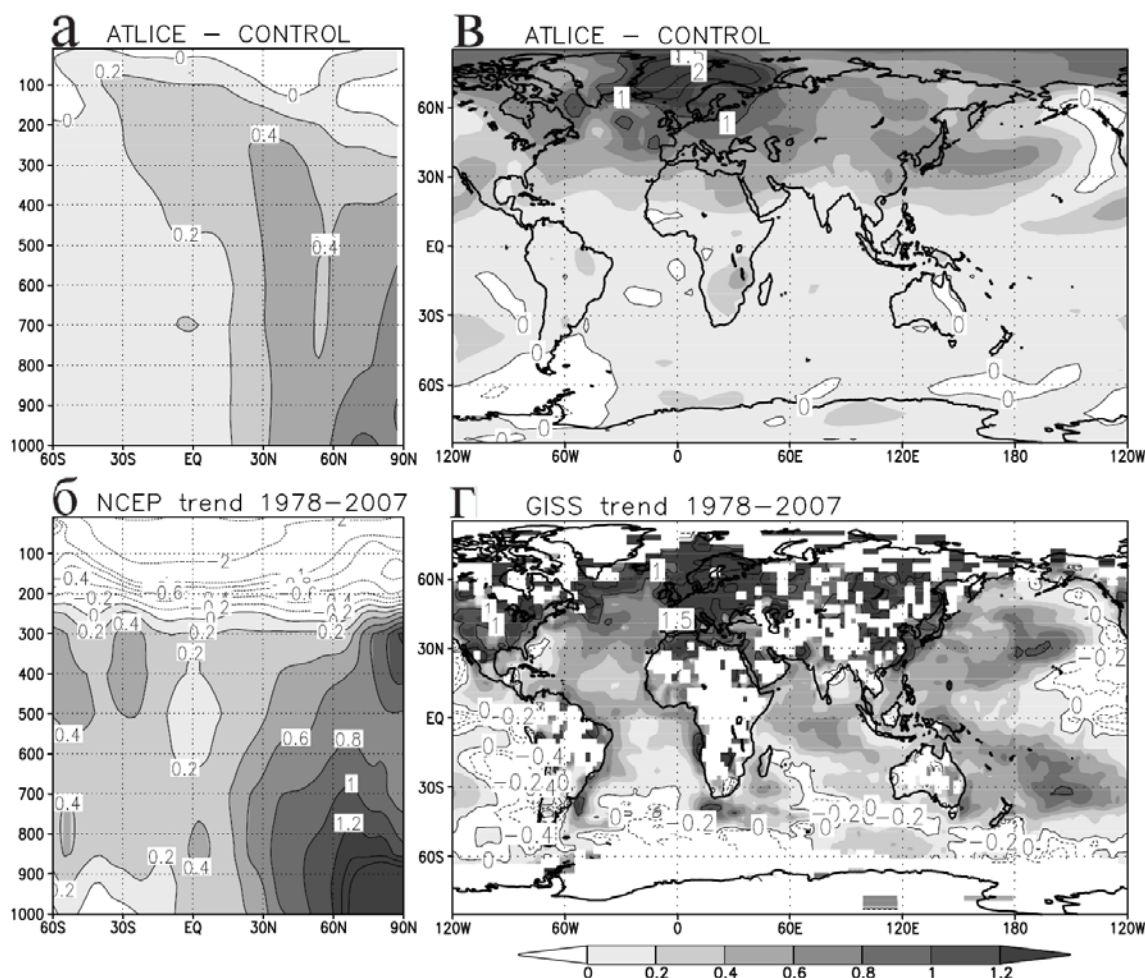


Рис. 13: Изменения (в $^{\circ}\text{C}$) среднезональной среднегодовой температуры воздуха как функция высоты (а) и приземной температуры воздуха (в) в эксперименте с аномальными потоками тепла в СА и Арктике (представляющие изменения при переходе от отрицательной к положительной фазе Атлантического долгопериодного колебания). Соответствующие эмпирические тренды за период 1978-2007 гг. (в $^{\circ}\text{C}/30$ лет) по данным реанализа NCEP (б) и данным GISS (г).

Атлантике. Следует отметить характерную черту распределения температурных аномалий – протяженную положительную аномалию, протянувшуюся от восточной Азии до центра Северного Тихого океана, присутствующую как в данных наблюдений, так и в модельной картине аномалий. Вертикальная структура

температурного отклика в СП (рис. 13б) была сопоставлена с линейным трендом по данным реанализа NCEP за период 1978-2007 гг. (рис. 13а). В соответствии с данными реанализа, модель воспроизводит значительное потепление всей тропосферы к северу от 30°с.ш., с наиболее сильным потеплением в Арктике. Таким образом, результаты проведенных модельных экспериментов говорят о том, что примерно половина потепления в тропосфере Северного полушария могла быть вызвана естественными колебаниями климата. В то же время модель не воспроизводит похолодание в стратосфере, являющееся отличительной чертой современного температурного тренда, а также характерной особенностью потепления вследствие увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере. Потепление в тропосфере в модели также слабее наблюдаемого и не распространяется на Тропики и Южное полушарие. Это указывает на важный вклад радиационного воздействия, связанного с увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере.

Индивидуальный вклад потоков тепла в Атлантике и в Арктике был оценен на основе результатов дополнительных экспериментов с использованием аномальных потоков тепла только в этих регионах. В глобальном и среднеполушарном (в СП) потеплении, вклад аномальных потоков тепла в Арктике примерно на 30% больше, чем в Атлантике. Именно потоки тепла в Арктическом регионе приводят к значительному потеплению в Северной Америке, Северной Европе и западной Сибири, в то время как потоки тепла в Атлантике вносят основной вклад в потепление над восточной Европой и восточной Сибирью. К югу от 55° с.ш. эффект от ПТТ в Атлантике и Арктики приблизительно одинаков.

В **разделе 5.6** обсуждаются полученные результаты и приводятся основные выводы главы. Представленные в данной главе эксперименты указывают на то, что примерно половину потепления в СП за последние 30 лет составили изменения, вызванные переходом к положительной фазе атлантической меридиональной циркуляции, совершающей долгопериодные естественные колебания (с периодом 60-70 лет), что является причиной ускорившегося глобального потепления. Эксперименты с моделями общей циркуляции океана, при использовании предписанного по данным наблюдений атмосферного воздействия, показывают, что САМЦ действительно усиливалась в последние десятилетия. Проведенные автором численные эксперименты, описанные в данной главе, показали, что аномалии потоков тепла из океана в атмосферу, связанные с САМЦ, действительно приводят к

значительным изменениям температуры в Северном полушарии в целом. При этом хорошо воспроизводится структура наблюдаемого потепления последних десятилетий. Следует отметить, что полученные результаты не ставят под сомнение вклад антропогенного роста парниковых газов в глобальное потепление XX века, характерные признаки которого не воспроизводятся в анализировавшихся модельных экспериментах. Если сделанные выводы о вкладе естественных колебаний САМЦ в потепление последних десятилетий верны, то это указывает на завышенную (соответственно примерно в два раза) чувствительность климатических моделей к увеличению парниковых газов в атмосфере. Также отмечается, что внутренняя изменчивость может быть важна в контексте «критических точек» (tipping points), чувствительных порогов в климатической системе, вблизи которых небольшие изменения температуры могут вызвать сильные изменения окружающей среды, приводящие, в свою очередь, к еще большим изменениям глобальной температуры. Таяние арктических льдов в последние годы значительно ускорилось. Ряд положительных обратных связей может привести к дальнейшему уменьшению ледового покрова и полному таянию летнего льда уже в течение следующих нескольких десятилетий, предполагая, что критический порог для площади ледового покрова может уже быть пройден. Возможно, что достижение этого порогового значения произошло вследствие значительной внутренней флуктуации, совпавшей по фазе с антропогенным потеплением. Это указывает на то, что естественная долгопериодная климатическая изменчивость может привести к экстремальным климатическим изменениям даже на фоне умеренного внешнего воздействия.

Совпадение положительной тенденции долгопериодного естественного колебания в последние десятилетия с растущим радиационным воздействием, связанным с увеличением парниковых газов в атмосфере, привело к ускорившемуся потеплению в Арктике с быстрым таянием морских льдов. В то же время, арктическое потепление сопровождалось рядом аномально холодных зим над континентами СП, в том числе на территории России.

Исследованию влияния аномалий ледового покрова на динамику атмосферной циркуляции и формирование экстремальных погодных режимов в зимний период посвящена **шестая глава**. В этой главе с использованием серии экспериментов с МОЦА воспроизведена нелинейная зависимость температурных (и циркуляционных) режимов над континентами СП от ледовитости Баренцева и Карского морей, которая может приводить к резким похолоданиям над

континентами в диапазоне современных изменений площади ледового покрова в Арктике и предложен физический механизм, объясняющий такой нелинейный отклик. В **разделе 6.1** рассматриваются несколько примеров аномально холодных зим над континентами СП, сопровождавшимися сильными положительными аномалиями температуры в Арктике с максимальными аномалиями в регионе Баренцева и Карского морей (БКМ). Такие события часто сопровождались значительными отрицательными аномалиями ледового покрова в БКМ. Приводится анализ предложенных ранее механизмов формирования крупномасштабных отрицательных аномалий ПТВ и предлагается новая гипотеза о связи аномалий ледовитости в БКМ и холодных зим над регионами континентов СП. Для исследования этой гипотезы была проведена серия численных экспериментов с МОЦА ЕСНАМ5 с предписанными аномалиями концентрации морского льда (КМЛ) в БКМ в диапазоне 100%-1% при идентичных прочих граничных условиях (шесть экспериментов, с КМЛ 100%, 80%, 60%, 40%, 20%, 1%). Описание модели и постановка экспериментов приведены в **разделе 6.2**.

Результаты экспериментов рассматриваются в **разделе 6.3**. Обнаружен нелинейный отклик ПТВ и зонального ветра в нижней тропосфере на изменения концентрации

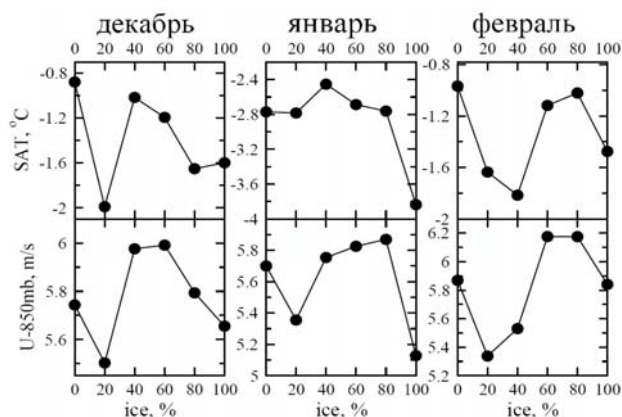


Рис. 14: Среднемесячная приповерхностная температура (в °C, верхний ряд) и зональный компонент ветра на уровне 850 гПа (в м/с, нижний ряд), осредненные для Европейского региона, по данным экспериментов с МОЦА ЕСНАМ5 как функция предписанных концентраций морского льда в Баренцевом и Карском морях для декабря, января и февраля.

источником тепла и антициклоническими аномальными вихрями в средних широтах. Нелинейный отклик особенно хорошо проявляется в феврале в Европейском регионе (10-30° в.д., 45-55° с.ш.) (рис. 14). Изменения температуры и зонального ветра тесно

морского льда в зимние месяцы.

Зонально-симметричная восточная аномалия зонального ветра в средних широтах, связанная с антициклонической аномалией полярного вихря является результатом уменьшения концентрации морского льда в Баренцевом и Карском морях с 80% до 40%. В случаях же уменьшения КМЛ с 100% до 80% и с 40% до 1%, реакцией атмосферной циркуляции является меридиональная структура с циклонической циркуляцией над

связаны между собой. Аномальная восточная адвекция объясняет понижение ПТВ в при уменьшении КМЛ от 60% до 40%. Значительно похолодание над континентами при уменьшении КМЛ, соответствующего практически свободной ото льда поверхности Баренцева и Карского морей, [40-20]%, что примерно совпадает с резким уменьшением КМЛ в этих морях в последние годы, дает основание предположить, что очень холодная зима 2005/2006 г. над Евразией (как и другие подобные события) могла быть вызвана аномальным нагревом атмосферы турбулентными потоками тепла с поверхности Баренцева и Карского морей вследствие сильной отрицательной аномалии КМЛ. Изменения атмосферной циркуляции, вызванные локальным источником тепла на нижней границе атмосферы, определяются сложным нелинейным взаимодействием между бароклинным и эквивалентно баротропным механизмами. Это конвекция над источником тепла, приводящая к образованию циклонической аномалии циркуляции в регионе Баренцева и Карского морей (баротропный отклик) и изменения горизонтальных градиентов температуры вблизи источника тепла, приводящие (благодаря изменению термического ветра) к антициклонической аномалии циркуляции (бароклинный отклик). Второй механизм, предположительно, преобладает в случае с уменьшением КМЛ с 80% до 40%.

В **разделе 6.4** предложена аналитическая модель формирования нелинейного отклика атмосферы на монотонно увеличивающийся нагрев на ее нижней границе для условий зимнего периода в регионе БКМ. Для описания вклада термического ветра использовалась модель Тэйлора-Экмана. Условие сохранения энергии на нижней границе бароклинного пограничного слоя (БПС) атмосферы позволяет связать изменение характеристик циркуляции в БПС с аномалиями потока явного тепла и получить оценку аномалии давления воздуха в регионе БКМ как функции интенсивности нагрева и угла отклонения ветра у поверхности от геострофического направления. Разработанная модель достаточно хорошо описывает нелинейный характер аномалий давления, полученный в модельных экспериментах.

Раздел 6.5 содержит обсуждение полученных результатов и основные выводы. Важным результатом анализа проведенных численных экспериментов является существенная роль распространения (концентрации) морского льда в Баренцевом и Карском морях, который является критическим параметром климатической системы, определяющим нелинейные и быстрые переходы между различными режимами атмосферной циркуляции в субполярных и полярных регионах Северного полушария.

Важным выводом является возможность похолодания, а не априори ожидаемого потепления, над прилегающими к Арктике континентами в ответ на резкое потепление в самой Арктике вследствие уменьшения ледового покрова в Баренцевом и Карском морях. Для формирования такого отклика атмосферы требуется изменение КМЛ в определенном диапазоне (в представленном случае, от 80% до 40% КМЛ). Изменения подобного масштаба ожидаются при экстраполировании климатических трендов площади Арктического ледового покрова при продолжающемся глобальном потеплении из-за увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере. Это дает основание предположить, что вероятность холодных зим может увеличиться в будущем несмотря на глобальное потепление и потепление в Арктике.

В **седьмой главе** предлагается новый механизм быстрых климатических изменений (происходящих на масштабах десятилетий), связанный с прекращением океанического притока в Баренцево море, ответственным за приток примерно половины относительно теплой и соленой атлантической воды, поступающей в Арктику. Это явление обусловлено наличием положительной обратной связи между притоком и морским льдом, подробно рассматривавшейся в главах 3-5 и являющейся одним из ключевых элементов в формировании долгопериодной климатической изменчивости в Арктике. Прекращение притока было выявлено в численных экспериментах с глобальной климатической моделью общей циркуляции атмосферы, океана и морского льда длительностью более 4 тысячи лет при воздействии периодически (1000 лет) меняющейся солнечной постоянной ($\pm 2 \text{ Вт/м}^2$). В **разделе 7.1** рассматривается динамика климата во время голоцена, сопровождавшаяся резкими климатическими изменениями в высоких широтах СП. В настоящее время, основным механизмом, объясняющим такие флуктуации, является реорганизация глубоководной океанической конвекции в Северных морях. В данной главе предложен новый механизм, в котором быстрые климатические изменения вызваны прекращением океанического притока в Баренцево море. Прекращение притока было обнаружено в длительном эксперименте с новой глобальной климатической моделью Института морских исследований им. Лейбница в Киле (КСМ). Модель и анализировавшийся эксперимент рассматриваются в **разделе 7.2**. Важной особенностью океанического блока использовавшейся модели является относительно высокое пространственное разрешение (менее 100 км в Северных и

Баренцевом морях), в сравнении с другими моделями, использовавшимися при проведении подобных длительных экспериментов. Такое разрешение позволяет

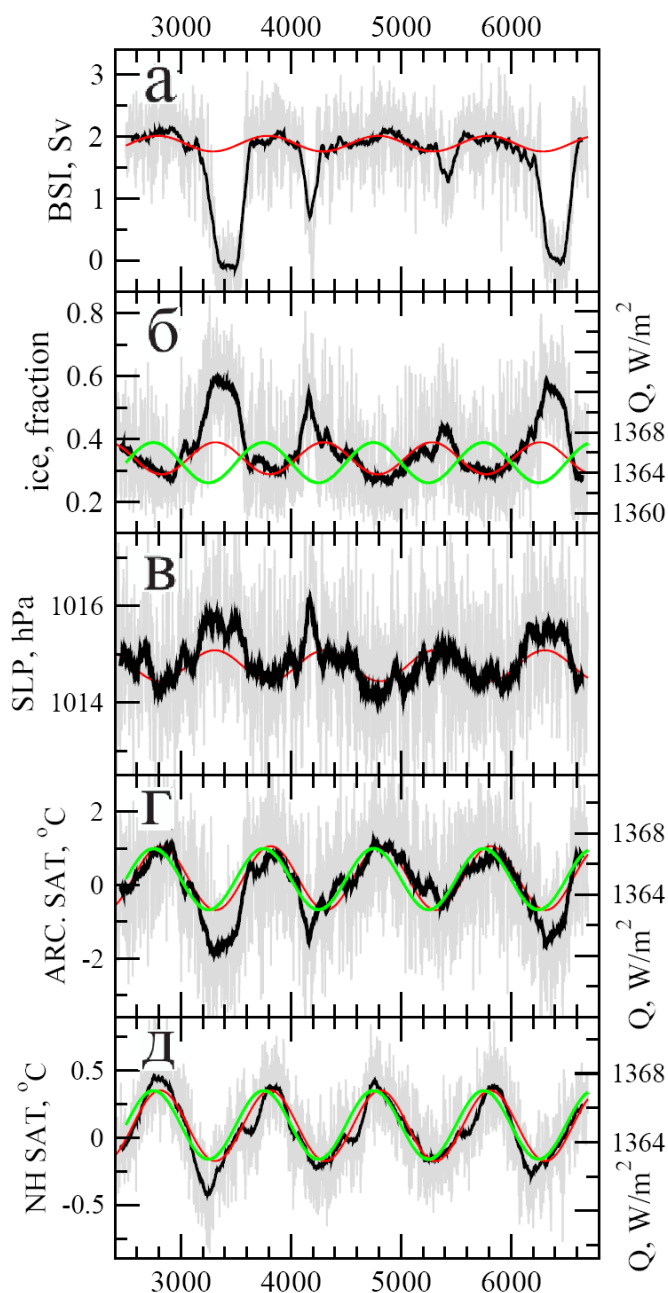


Рис. 15: Океанический приток в Баренцево море, БМ, (а), часть западного сектора БМ, покрытая льдом (б), давление воздуха над западной частью БМ (в), аномалии ПТВ в регионе БМ (г) и в СП (д). Серые линии – среднегодовые значения. Жирные черные линии – 100-летнее скользящее среднее. См. текст для дальнейших пояснений.

более реалистично моделировать взаимодействие между атмосферой, океаническими течениями и морским льдом в атлантическом секторе Арктики. Модель КСМ реалистично воспроизводит (для своего пространственного разрешения) океаническую циркуляцию в Баренцевом море. Единственным внешним воздействием в эксперименте было периодическое (с периодом 1000 лет) изменение солнечной постоянной с амплитудой $\pm 2 \text{ Вт/м}^2$. Такие изменения идеализированно представляют вариации солнечной постоянной на временных масштабах порядка 1000 лет в период Голоцена согласно оценкам палеоклиматических реконструкций. Результаты эксперимента представлены в **разделе 7.3**. Две длительных остановки океанического притока в Баренцево море (рис. 15) произошли во время численного эксперимента вследствие изменения солнечной постоянной

(светлая синусоида на рис. 15б,г,д) в модели. Линейный отклик модельных параметров на внешнее воздействие представлен на рис. 15 темными синусоидами (с

периодом 1000 лет), наиболее хорошо (в смысле суммарного среднеквадратичного отклонения) описывающие эволюцию соответствующей характеристики во время модельного эксперимента за исключением периодов остановки притока. Переход к состоянию с нулевым притоком занимает несколько десятилетий и такое состояние длится около 300 лет с последующим резким возвращением к нормальному режиму с притоком около 2 Св ($1 \text{ Св} = 10^6 \text{ м}^3$). Во время остановки притока атлантические воды не поворачивают на восток в направлении Баренцева моря, а, напротив, отклоняются к западу, таким образом усиливая круговорот в Гренландском море и течение вдоль восточного побережья Гренландии. При этом происходит значительное похолодание не только в регионе Баренцева моря, но и над северной Евразией. Аномалии ПТВ также заметны при среднеполушарном осреднении. Отрицательные температурные аномалии наиболее сильны зимой и достигают -2°C над северной Норвегией. Эволюция притока укладывается в классическую теорию стохастического резонанса и может быть качественно воспроизведена с помощью простой модели. Важным условием для осуществления быстрых переходов является наличие положительной обратной связи в области неустойчивого равновесия системы. В рассматриваемом явлении быстрой остановки притока, положительная обратная связь существует между притоком и морским льдом. Механизм этой обратной связи подробно исследовался в предыдущих главах. В анализируемом в данной главе модельном эксперименте неустойчивость возникает, когда, вследствие уменьшения солнечной постоянной, площадь ледового покрова увеличивается (рис. 15б) и граница ледового покрова приближается к западной оконечности моря. Над покрытым льдом морем в западной части Баренцева моря развивается антициклоническая аномалия атмосферной циркуляции (рис. 15в), ослабляя юго-западные ветра к северу от побережья Норвегии и, таким образом, ослабляя приток. Это вызывает дальнейшее распространение ледового покрова на запад вплоть до границы, определяемой относительно теплым и соленым Норвежским течением к западу от меридиана, соединяющего Норд Кап и Шпицберген. С возрастанием солнечного воздействия уменьшается площадь ледового покрова, что увеличивает вероятность перехода системы в другое устойчивое состояние с притоком в Баренцево море (рис. 15а). В **разделе 7.4** обсуждаются основные результаты проведенного анализа. Отмечается, что прекращение океанического притока в Баренцево море приводит к значительному похолоданию в высоких широтах Северного полушария и перестройке океанической циркуляции в Северной

Атлантике и Арктическом океане. Полученные результаты свидетельствуют о существовании точки бифуркации в арктической климатической системе и предлагают новую точку зрения для понимания быстрых климатических изменений, прослеживаемых в палеоклиматических реконструкциях в Северной Атлантике, Северных морях и Европе.

В Заключении приведены результаты работы и выводы.

1. С помощью анализа данных наблюдений выявлена характерная структура долгопериодной изменчивости температуры воздуха в высоких широтах СП, указывающая на связь этой изменчивости с вариациями ледового покрова и океанического переноса тепла в Атлантическом секторе Арктики.
2. На основе комплексного анализа данных наблюдений и результатов экспериментов с климатическими моделями показано, что долгопериодные квазипериодические колебания североатлантической меридиональной циркуляции (САМЦ) связаны с соответствующими изменениями ледового покрова и температуры в Арктике.
3. Предложен механизм влияния САМЦ на климат Арктики посредством модуляции интенсивности океанического притока в Баренцево море, усиленной положительной обратной связью между притоком и морским льдом. Наличие такой обратной связи продемонстрировано в проведенных численных экспериментах с климатическими моделями. Этот механизм объясняет, в частности, потепление середины XX века в Арктике.
4. С помощью долгопериодного эксперимента с глобальной климатической моделью показана возможность полного прекращения океанического притока в Баренцево море, приводящего к резким климатическим изменениям в высоких широтах СП. Объяснен физический механизм этого явления, связанный с наличием положительной обратной связи между притоком и морским льдом. Полученные результаты свидетельствуют о существовании важного порога неустойчивости в арктической климатической системе и предлагают новый подход для понимания быстрых климатических изменений, прослеживаемых в палеоклиматических реконструкциях в Северной Атлантике, Северных морях и Европе.
5. Показано, что современный архив сеточных данных по концентрации ледового покрова, использующийся, в том числе для оценок Межправительственной группы экспертов по изменению климата, существенно недооценивает (из-за отсутствия

надежных данных) долгопериодные аномалии ледового покрова (ЛП) в Арктике в середине XX века в зимний период. Проведенные эксперименты с моделью общей циркуляции указывают на наличие значительной отрицательной аномалии ЛП в это время, сравнимой с современным трендом.

6. Получены количественные оценки вклада естественной долгопериодной изменчивости в Северной Атлантике и Арктике в ускорившиеся изменения климата в последние десятилетия. Эти результаты получены впервые с помощью оригинальных численных экспериментов с глобальной климатической моделью и свидетельствуют о том, что около 50% современного потепления в Северном полушарии с середины 1970-х гг. может быть связано с естественной климатической изменчивостью. Показано, что потери тепла с поверхности океана в высоких широтах СП являются важным фактором в формировании глобальных и региональных климатических аномалий.

7. Предложен новый механизм формирования экстремально холодных погодных режимов над территорией континентов СП в зимний период, таких, например, как исключительно холодная зима 2005/2006 г. в Европе. Показано, что причиной таких похолоданий может служить глобальное потепление и ускорившееся таяние морского льда в Баренцевом и Карском морях. Обнаружен и, с помощью аналитической модели, объяснен эффект нелинейного отклика атмосферной циркуляции на уменьшение площади ледового покрова (и, соответственно, diabatic heating атмосферы), приводящего к образованию антициклонической аномалии над источником тепла.

Список публикаций по теме диссертации

1. Semenov, V.A., Latif, M., Dommenges, D., Keenlyside, N.S., Strehz, A., Martin, T., Park, W. The impact of North Atlantic-Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature // J. Climate. 2010. Doi: 10.1175/2010JCLI3347.1.
2. Petoukhov, V., Semenov, V.A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // J. Geophys. Res. 2010. Doi:10.1029/2009JD013568.

3. Semenov, V.A., Park, W., Latif, M. Barents Sea inflow shutdown: A new mechanism for rapid climate changes // *Geoph. Res. Lett.* 2009. V. 36, L14709. Doi: 10.1029/2009GL038911.
4. Khon, V.C., Mokhov, I.I., Latif, M., Semenov, V.A., Park, W. Perspectives of Northern Sea Route and Northwest Passage in the twenty-first century // *Climatic Change*. 2010. Doi: 10.1007/s10584-009-9683-2.
5. Семенов, В.А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // *Доклады РАН*. 2008. Т. 418. № 1. С. 106-109.
6. Semenov, V.A., Latif, M., Jungclaus, J.H., Park, W. Is the observed NAO variability during the instrumental record unusual? // *Geoph. Res. Lett.* 2008. V. 35, L11701. Doi: 10.1029/2008GL033273.
7. Мохов, И.И., Семенов, В.А., Хон В.Ч., Латиф М., Рекнер Э. Связь аномалий климата Евразии и Северной Атлантики с естественными вариациями Атлантической термохалинной циркуляции по долгопериодным модельным расчетам // *Доклады РАН*. 2008. Т. 419. №5. С. 687–690.
8. Möller, J., Dommenges, D., Semenov, V.A. The annual peak in the SST anomaly spectrum // *J. Clim.* 2008. V. 21. P. 2810-2823.
9. Семенов, В.А. Структура изменчивости температуры в высоких широтах Северного полушария // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43. № 6. С. 744–753.
10. Khon, V.Ch., Mokhov, I.I., Roeckner, E., Semenov, V.A. Regional changes of precipitation characteristics in Northern Eurasia from simulations with global climate models // *Global and Planetary Change*. 2007. V. 57. P. 118-123. Doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.006.
11. Semenov, V.A., Latif, M. Impact of tropical Pacific variability on the mean North Atlantic thermohaline circulation // *Geoph. Res. Lett.* 2006. V.33. L16708. Doi: 10.1029/2006GL026237.
12. Мохов, И.И., Рокнер, Э., Семенов, В.А., Хон, В.Ч. Возможные региональные изменения режимов осадков в Северной Евразии в XXI веке // *Водные ресурсы*. 2006. Т. 33. С. 702-710.

13. Мохов, И.И., Роекнер, Э., Семенов, В.А., Хон, В.Ч. Экстремальные режимы осадков в регионах северной Евразии в XX веке и их возможные изменения в XXI веке // Доклады РАН. 2005. Т. 402. С. 818-821.
14. Bengtsson, L., Semenov, V.A., Johannessen, O.M. The early twentieth-century century warming in the Arctic – a possible mechanism // J. Clim. 2004. V. 17. P. 4045-4057.
15. Johannessen, O.M., Bengtsson, L., Miles, M.W., Kuzmina, S.I., Semenov, V.A., Alekseev, G. V., Nagurniy, A. P., Zakharov, V. F., Bobylev, L., Pettersson, L., Hasselmann, K., Cattle, H. P. Arctic climate change: observed and modeled temperature and sea-ice variability // Tellus. 2004. V. 56A. P. 328-341.
16. Мелешко, В.П., Голицын, Г.С., Говоркова, В.А., Демченко, П.Ф., Елисеев, А.В., Катцов, В.М., Малевский-Малевич, С.П., Мохов, И.И., Надежина, Е.Д., Семенов, В.А., Спорышев, П.В., Чон, В.Х. Возможные изменения климата России в XXI веке: оценки по ансамблю климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 38-45.
17. Semenov, V.A., Bengtsson, L. Modes of the wintertime Arctic temperature variability // Geoph. Res. Lett. 2003. V. 30. Doi: 10.1029/ 2003GL017112.
18. Мохов, И.И., Семенов, В.А., Хон, В.Ч. Оценки возможных региональных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 2. С.150-165.
19. Мохов, И.И., Семенов, В.А., Хон, В.Ч. Региональные вариации гидрологического режима в XX веке и модельные сценарии изменений в XXI веке // В: Глобальные изменения климата и их последствия для России. М.: РООУППГ. 2002. С.310-333.
20. Semenov, V.A., Bengtsson, L. Secular trends in daily precipitation characteristics: Greenhouse gas simulation with a coupled AOGSM // Clim. Dyn. 2002. V. 19. P. 123-140.
21. Голицын Г.С., Мохов И.И., Демченко П.Ф., Елисеев А.В, Семенов А.В., Хон В.Ч. Моделирование климатических изменений в высоких широтах в XX-XXI веках. // Криосфера Земли как среда жизнеобеспечения. М.: Российская академия наук. С.87-88. 2003.

22. Арпе, К., Бенгтссон, Л., Голицын, Г.С., Елисеев, А.В., Ефимова, Л.К., Мелешко, В.П., Мещерская, А.В., Мохов, И.И., Семенов, В.А., Спорышев, П.В., Хон, В.Ч. Моделирование стока Волги и Невы в XX и XXI веке // Сборник к 150-летию ГГО. 2001.
23. Арпе, К., Бенгтссон, Л., Голицын, Г.С., Ефимова, Л.К., Мохов, И.И., Семенов, В.А., Хон В.Ч. Анализ гидрологического режима на водосборе Ладожского озера и стока Невы в XX и XXI веках с помощью глобальной климатической модели // Метеорология и гидрология. 2000. № 12. С. 5-12.
24. Голицын, Г.С., Мелешко, В.П., Ефимова, Л.К., Говоркова, В.А., Мохов, И.И., Семенов, В.А., Сомова, Н.Г. Анализ составляющих водного и теплового балансов на водосборе Ладожского озера, рассчитанных по моделям общей циркуляции атмосферы // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т.36. №4. С.435-445.
25. Arpe, K., Bengtsson, L., Golitsyn, G. S., Mokhov, I. I., Semenov, V. A., and Sporyshev, P.V. Connection between Caspian Sea level variability and ENSO // Geophysical Research Letters. 2000. V. 27. P. 2693-2696.
26. Арпе, К., Бенгтссон, Л., Голицын, Г.С., Мохов, И.И., Семенов, В.А., Спорышев, П.В. Анализ и моделирование изменений гидрологического режима в бассейне Каспийского моря // Доклады Академии наук. 1999. Т. 366. № 2. С. 248-252.
27. Semenov, V.A. Simulation of the Arctic temperature variability in the 20th century with a set of atmospheric GCM experiments // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. H. Cote (ed.). 2007. WMO/TD-No. 1397. Rep. No. 37. P. 7.19–7.20.
28. Khon, V. Ch., M. Latif, I.I. Mokhov, E. Roeckner, Semenov, V.A. Impact of the North Atlantic thermohaline circulation on the European and Northern Atlantic weather in a coupled GCM simulation // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. H. Cote (ed.). 2007. WMO/TD-No. 1397. Rep. No. 37. P. 7.5–7.6.
29. Ivanova, E.V., Semenov, V.A., Murdmaa, I., Park, W., Chistyakova, N., Latif, M., Risebrobakken, B., Alekhina, G. N. The impact of the Atlantic Water inflow on the Holocene environments in the Barents Sea: data and modeling results // 40th

International Arctic Workshop, 10-12 March 2010, Boulder, Colorado, USA (University of Colorado).

30. Semenov, V.A., Petukhov, V. A link between reduced Arctic sea ice and cold winter extremes over northern continents // EGU General Assembly, Vienna, Austria, 19-24 April. 2009. Geoph. Res. Abstracts. V. 11. EGU2009-4531.
31. Semenov, V.A., Park, W., Latif, M. Barents Sea inflow shutdown: a new mechanism for rapid climate changes // EGU General Assembly, Vienna, Austria, 19-24 April. 2009. Geoph. Res. Abstracts. V. 11. EGU2009-4486.
32. Khon, V.Ch., Mokhov, I.I. , Semenov, V.A. Forcing of the Recent Climate Change over Eurasia by Atlantic SSTs and Arctic Sea Ice // EGU General Assembly, Vienna, Austria, 19-24 April. 2009. Geoph. Res. Abstracts. V. 11. EGU2009-11122.
33. Semenov, V.A., Dommenges, D., Stroeh, A. Can Arctic warm the Earth? // EGU General Assembly, Vienna, Austria, 13-18 April. 2008. Geoph. Res. Abstracts. V. 10. EGU2008-A-05084.
34. Semenov, V.A., Latif, M., Jungclauss, J.H. Multicentury oscillation of the North Atlantic Thermohaline Circulation in a partially coupled AOGCM experiment // EGU General Assembly, Vienna, Austria, 13-18 April. 2008. Geoph. Res. Abstracts. V. 10. EGU2008-A-05168.
35. Khon, V.Ch., Latif, M., Mokhov, I.I., Roeckner, E., Semenov, V.A. Modelling of climate changes for Eurasian regions and their relationship to the circulation processes in the North Atlantic // EGU General Assembly, Vienna, Austria, 13-18 April. 2008. Geoph. Res. Abstracts. V. 10. EGU2008-A-08379.
36. Semenov, V.A., Latif, M., Jungclauss, J. H., Park, W. Is the observed NAO variability during the instrumental record unusual? // EGU General Assembly, Vienna, Austria, 13-18 April. 2008. Geoph. Res. Abstracts. V. 10. EGU2008-A-06764.
37. Latif, M., Keenlyside, N., Park, W., Semenov, V., Müller, W. Understanding Common Aspects and Interactions between ENSO and the NAO // EGU General Assembly, Vienna, Austria, 13-18 April. 2008. Geoph. Res. Abstracts. V. 10. EGU2008-A-07545.
38. Semenov, V.A., Dommenges, D., Stroeh, A. A role of ice modulated heat losses for the Northern Hemisphere temperature variations // SCAR/IASC IPY Open Science Conference, 8-11 April. 2008. St. Petersburg, Russia. Abstract Volume. P. 153.

39. Semenov, V.A. Can atmospheric model reproduce the 20th century Arctic climate changes in AMIP-type simulations? // SCAR/IASC IPY Open Science Conference, 8-11 April. 2008. St. Petersburg, Russia. Abstract Volume. P. 169.
40. Khon, V.Ch., Mokhov, I.I., Roeckner, E., Semenov, V.A. Changes of extreme precipitation in northern Eurasia from observations, reanalysis and model simulations // EGU General Assembly 2005. Vienna, Austria, 24 – 29 April. 2005. Geoph. Res. Abstracts. V. 7. EGU05-A-04818.
41. Semenov, V.A., Latif, M. Long-term partially coupled ocean-atmosphere experiments: The role of the tropical oceans for northern hemisphere climate variability // EGU General Assembly 2005. Vienna, Austria, 24 – 29 April. 2005. Geoph. Res. Abstracts. V. 7. EGU05-A-04618.
42. Semenov, V.A. Arctic climate variability: A role of the Barents Sea inflow // EGU General Assembly, Nice, France, 25-30 April. 2004. Geoph. Res. Abstracts, V. 6. CD-ROM.
43. Semenov, V.A., Bengtsson L. Wintertime Arctic temperature variability in the 20th century: dominant modes // EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, 6-11 April, 2003. Geoph. Res. Abstracts. V. 5. CD-ROM.
44. Bengtsson, L., Semenov, V.A. Arctic climate response to the sea ice changes: century-long atmospheric GCM simulations // EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, 6-11 April. 2003. Geoph. Res. Abstracts. V. 5. CD-ROM.
45. Bengtsson, L., Semenov, V.A., Johannessen, O.M. A mechanism for the early 20th century warming in the Arctic: A missing link // EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, 6-11 April. 2003. Geoph. Res. Abstracts. V. 5. CD-ROM.
46. Semenov, V.A., Bengtsson, L. Arctic climate response to the sea ice changes: atmospheric GCM simulations // ACSYS Final Science Conference, 11-14 Nov. 2003, AARI, St. Petersburg, Russia. Book of abstracts. P. 192.
47. Bengtsson, L., Semenov, V.A., Johannessen, O.M. A mechanism for the early 20th century warming in the Arctic // World Climate Change Conference. Moscow. 2003. Book of abstracts. P. 339.
48. Semenov, V.A., Bengtsson, L. Arctic climate response to the sea ice changes: Atmospheric GCM simulations // World Climate Change Conference. Moscow. 2003. Book of abstracts. P. 467.