

**КОЛЕБАНИЯ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА, ВЫЗВАННЫЕ
ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ В СИСТЕМЕ
АТМОСФЕРА – АРКТИЧЕСКИЕ ЛЬДЫ – ОКЕАН**

В.А. Семенов^{1,2)}

¹⁾ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3,

²⁾ Институт географии РАН,
Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29, vasemenov@mail.ru

Резюме. Влияние внутренней климатической изменчивости в Северной Атлантике и Арктике на глобальный климат исследовалось с помощью численных экспериментов с совместной моделью общей циркуляции атмосферы и верхнего перемешанного слоя океана с заданием аномальных потоков тепла из океана в атмосферу. Результаты экспериментов показали, что внутренняя долгопериодная климатическая изменчивость в Северной Атлантике и атлантическом секторе Арктики могла внести значительный вклад (около половины) в повышение температуры Северного полушария с 1980гг. Существенную роль при этом играли аномальные потоки тепла в Арктике, которые могли быть усилены положительной обратной связью между притоком океанического тепла и площадью морского льда в Баренцевом море. Учитывая, что современные климатические модели (в целом для мульти-модельного ансамбля) практически идеально воспроизводят наблюдаемые изменения глобальной приземной температуры в последние 30 лет XX века в качестве отклика на внешнее, преимущественно антропогенное, воздействие на климат, полученные результаты указывают на возможность существенной переоценки чувствительности климатических моделей к увеличению концентрации парниковых газов в атмосфере.

Ключевые слова. Атлантическое долгопериодное колебание, глобальные модели климата, естественная изменчивость.

**OSCILLATIONS OF PRESENT-DAY CLIMATE ASSOCIATED WITH
FEEDBACKS IN ATMOSPHERE – ARCTIC ICE – OCEAN SYSTEM**

V.A. Semenov^{1,2)}

¹⁾ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS,
3 Pyzhevsky, 119017, Moscow, Russia,

²⁾ Institute of Geography, RAS,
29 Staromonetny, 119017, Moscow, Russia, vasemenov@mail.ru

Summary. The impact of internal climate variability in the North Atlantic

and the Arctic on global climate is studied using simulations with atmospheric general circulation model coupled with mixed layer ocean model forced by anomalous heat fluxes on the ocean-atmosphere interface. The results show that internal long-term climate variability in the North Atlantic and Atlantic Sector of the Arctic may have contributed a substantial part (about a half) to the observed surface air temperature warming in the Northern Hemisphere since 1980s. An important role in this is played by the anomalous heat fluxes in the Arctic that may be enhanced by positive feedback between oceanic heat inflow and sea ice area in the Barents Sea. Taking into account the fact that modern climate models (in ensemble average) almost perfectly reproduce the observed global temperature changes during the last 30 years of the 20th century as a response to the anthropogenic forcing, the results imply a possibility of substantial overestimation of the models' sensitivity to the increase of greenhouse gas concentration in the atmosphere.

Keywords. Atlantic multidecadal oscillation, global climate models, natural variability.

Введение

Среднегодовая приземная температура Северного полушария (СП) выросла примерно на 1°C с начала XX века (рис. 1). Потепление было неравномерным и значительно ускорилось в последние десятилетия: за последние 40 лет, с температурного минимума 1970г. по настоящее время, произошло потепление на 0,7°C. Помимо современного потепления, значительный рост температуры происходил и в первую половину XX века, после чего наступило некоторое похолодание. Темпы роста температуры в этот период были сравнимы с современными изменениями и причины такого значительного потепления до сих пор не выяснены. Предполагается, что это потепление могло быть вызвано естественной долгопериодной изменчивостью климата, связанной с колебаниями интенсивности океанической циркуляции (крупномасштабного меридионального круговорота воды) в Северной Атлантике (напр., Dellworth et al., 2000; Semenov et al., 2010). Также нельзя исключать существенного вклада внешнего воздействия на климат, в том числе солнечной активности и аэрозолей, как вулканических, так и антропогенных, хотя сравнимую амплитуду климатического отклика воспроизводят (в некоторых чертах) лишь отдельные модели (Ottera et al., 2010; Booth et al., 2012) в экспериментах, постановка которых, как и результаты недостаточно обоснованы и могут подвергаться критике. В целом же по ансамблю моделей, участвовавших в программе по сравнению глобальных климатических моделей CMIP3 (Meehl et al., 2007), внешнее воздействие на климат, включающее как естественные, так и антропогенные факторы, не способно объяснить потепление середины XX века (рис. 2а). При этом наиболее сильное расхождение между результатами моделей и данными наблюдений отмечается в высоких широтах СП (рис. 2б).

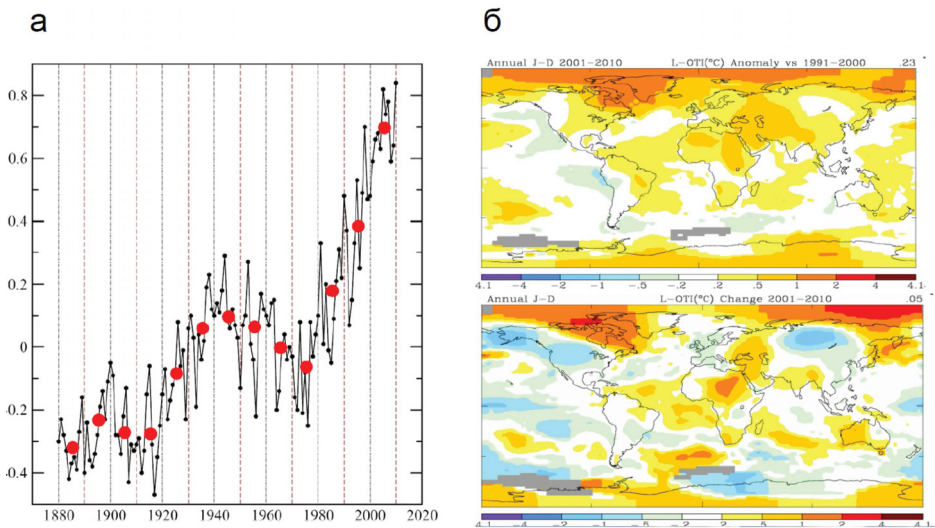


Рисунок 1 – (а) Аномалии среднегодовой приземной температуры воздуха, осредненной для Северного полушария по данным GISS (Hansen et al., 1999). Красные кружки обозначают средние за десятилетия значения; (б) Аномалии среднегодовой приземной температуры воздуха (°C) по данным GISS для первого десятилетия XXI века относительно последнего десятилетия XX века (вверху) и тренд температуры (°C/10 лет) за период 2001-2010гг. (внизу).

Таким образом, выявление причин потепления середины XX века является ключом к пониманию современной динамики климата, определению относительного вклада антропогенного воздействия и внутренней изменчивости в температурные колебания, а также корректной оценке чувствительности климата к увеличению концентрации парниковых газов, что критически важно для настройки климатических моделей и достоверного прогноза климата.

Важной особенностью температурных изменений в современный период является замедление темпов потепления в первое десятилетие XXI века. Хотя все среднегодовые значения температурных аномалий для СП в XXI веке по данным наблюдений (Hansen et al., 1999) превышают предшествующие значения за период инструментальных наблюдений с середины XIX века, рост температуры СП за первое десятилетие XXI века составил всего 0,1°C (глобальной 0,05°C). Пространственная картина этих изменений (рис. 1б) характеризовалась некоторым похолоданием над континентами СП преимущественно в зимний период, контрастирующим с сильным потеплением в Арктике (0,55°C в среднем для области севернее 60°с.ш.).

Среднее за десятилетие похолодание над континентами СП сопровождалось несколькими сильными отрицательными аномалиями в зимний период: зимы 2003, 2006 и 2010гг. (следует также отметить и аномалию 2012г. вследствие аномально холодных январских и февральских температур). Формирование таких аномально холодных зим может быть связано с

уменьшением площади ледового покрова в Арктике вследствие нелинейного отклика атмосферной циркуляции на нагрев нижней атмосферы зимой в высоких широтах (Petoukhov, Semenov, 2010; Семенов и др., 2012).

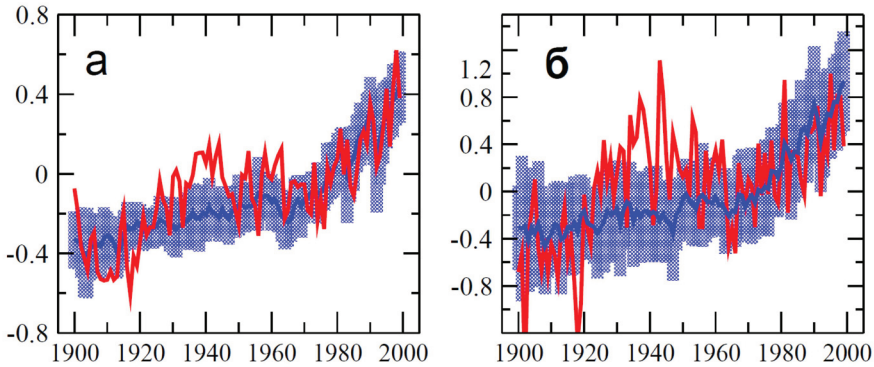


Рисунок 2 – Аномалии приповерхностной температуры воздуха (в °С) в XX веке по данным наблюдений (красная кривая – CRUTEM3 (Brohan et al., 2006)) и по данным экспериментов с ансамблем климатических моделей при антропогенном воздействии и влиянии внешних естественных факторов – солнечной и вулканической активности (синяя линия – средний по ансамблю моделей результат, синяя штриховка – стандартное отклонение в ансамбле моделей) для (а) среднегодовых значений в Северном полушарии и (б) в Арктике (60°с.ш. – 90°с.ш.).

Несмотря на замедление глобального (и среднеполушарного) потепления в XXI веке, рост температуры в Арктике продолжился практически такими же темпами, как и в предшествующее десятилетие, приводя к сильному контрасту между температурными изменениями в средних и высоких широтах. Причины этого явления также не выяснены. Среди возможных механизмов можно предположить изменения атмосферной циркуляции с аномально сильной адвекцией тепла в высокие широты (Graversen et al., 2008) аномалии переноса океанического тепла в атлантическом секторе Арктики (Schlichtholz, 2011).

Быстрое потепление в Арктике сопровождается (и связано) с уменьшением площади ледового покрова, значительно ускорившегося во второй половине первого десятилетия XXI века и достигшего в августе 2012г. рекордного минимума (за период спутниковых наблюдений с 1978г.). Уменьшение площади арктического ледового покрова является, пожалуй, одной из самых ярких иллюстраций глобального потепления. В то же время, летом 2012г. был достигнут абсолютный максимум площади морских льдов в Антарктике, которая растет (хотя и не такими быстрыми темпами) уже на протяжении последних трех десятилетий. Причина таких разнонаправленных тенденций (не воспроизводимых моделями) также непонятна и ее определение является важной задачей, в том числе для построения достоверных сценариев будущих климатических изменений.

Таким образом, динамика климата последних десятилетий ставит следующие вопросы:

- Каков вклад антропогенных факторов и внутренних колебаний климата в современное потепление?
- Почему замедлился рост глобальной температуры в XXI веке?
- Почему потепление в Арктике продолжается в XXI веке такими же темпами, как и раньше?
- Почему растет площадь морских льдов в Антарктиде, несмотря на быстрое таяние льдов в Арктике?
- Какова чувствительность климата к увеличению концентрации парниковых газов в атмосфере?

Долгопериодные колебания климата в Северной Атлантике и Арктике

Ответить на некоторые из этих вопросов можно, рассматривая изменения климата как совместный результат монотонно растущего антропогенного воздействия и (квази-) периодического естественного колебания, предположительно связанного с динамикой океанической циркуляции, (ввиду характерного временного масштаба порядка нескольких десятилетий). Хотя такое объяснение кажется достаточно очевидным, его не так просто физически обосновать.

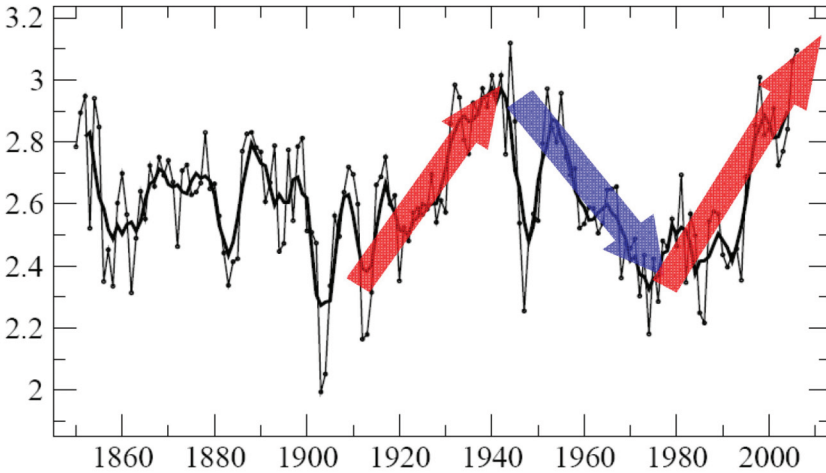
Долгопериодные вариации глобального и регионального климата (с периодом 50-70 лет) видны как в данных инструментальных наблюдений за ПТВ за последние 150 лет, так и в различных температурных реконструкциях (Mann, Park, 1994; Schlesinger, Ramankutty 1994), в том числе в палеореконструкциях для последних двух тысячелетий (Mangini et al., 2005). Сигнал, аналогичный глобальным колебаниям, наиболее сильно выражен в изменениях температуры поверхности океана (ТПО) в северной части Северной Атлантики (Delworth, Mann, 2000). Такие изменения ТПО часто называются Атлантическим долгопериодным колебанием (АДК) или Атлантической мультидекадной осцилляцией (АМО) (Schlesinger, Ramankutty, 1994; Kerr, 2000). В качестве индекса АДК часто используют ТПО в Северной Атлантике (рис. 3), которая испытывает квазипериодические колебания практически при отсутствии долгопериодного тренда. Анализ различий между результатами модельных экспериментов по воспроизведению климатических изменений в XX веке и данных наблюдений по ПТВ выявил сигнал, схожий с АДК, чья амплитуда имела максимальное значение в Северной Атлантике (Kravtsov, Spannagle, 2008; Ting et al., 2009).

Таким образом, важной задачей является оценка вклада естественных колебаний климата, связанных с АДК, в происходящие глобальные климатические изменения. Учет фактора влияния АДК мог бы существенно повысить качества климатического прогноза на 10-20 лет.

При моделировании воздействия АДК на глобальный климат до сих пор использовались исключительно аномалии ТПО в Северной Атлантике. При этом для изолирования эффекта АДК использовались модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) с предписанными аномалиями ТПО

(напр., Sutton, Hodson, 2007). В работе (Zhang et al., 2007) впервые была применена методика использования аномальных потоков тепла из океана в атмосферу (связанных с АДК) в совместной модели атмосферы и океана. Но при этом учитывались лишь потоки тепла в Северной Атлантике, регионе аномальных значений ТПО.

Аномалии ТПО в СА (40-60°с.ш.)



Аномалии ПТВ в СП

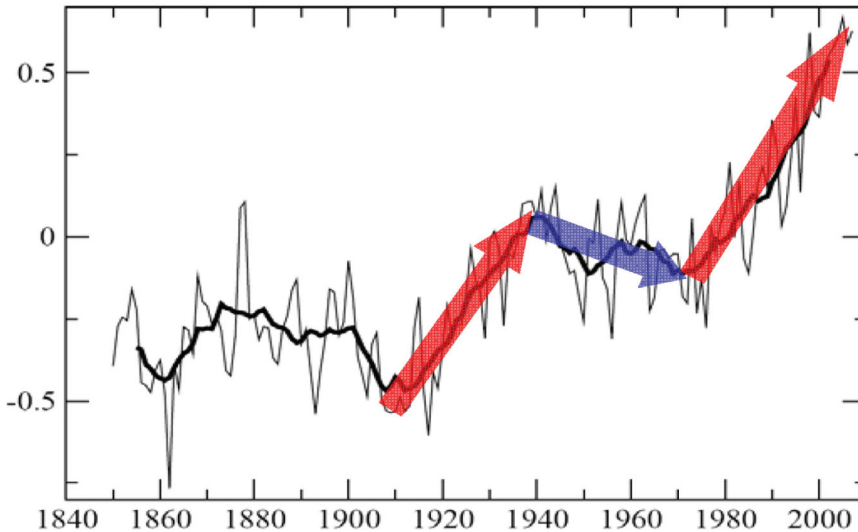


Рисунок 3 – (вверху) Среднегодовые аномалии температуры поверхности океана, ТПО, в Северной Атлантике (°С, осредненные для региона 50°з.д. – 10°з.д., 40°с.ш. – 60°с.ш.) как индекс Атлантического долгопериодного колебания (АДК). (внизу) Аномалии приповерхностной температуры воздуха, ПТВ, в Северном полушарии (°С, данные HadCRU3). Стрелки (внизу и вверху для одинаковых временных интервалов) показывают переходы от отрицательной фазы АДК к положительной и обратно и иллюстрируют одинаправленность колебаний температуры в СП и АДК.

Исследование аномальных турбулентных потоков тепла на нижней границе атмосферы, связанных с экстремумами АДК в XX веке показало, что помимо аномальных потоков в Северной Атлантике, АДК сопровождается аномальными потоками в атлантическом секторе Арктики, наиболее сильными в зимний период в Баренцевом море (Semenov et al., 2010; Семенов, 2010). Эти аномалии связаны с изменениями границ морского льда, вызванными вариациями океанического притока тепла. Некоторые климатические модели успешно воспроизводят влияние АДК на океанический приток в Баренцево море (Семенов 2008).

Анализ эмпирических данных ТПО и границ морского льда в XX веке (Rayner et al., 2003) дает возможность оценить аномальные потоки турбулентного тепла в атмосферу, связанные с АДК, для трех долгопериодных изменений: переход от холодной фазы в начале XX века к теплomu максимуму в 1940гг., последовавший переход к холодной фазе в 1970гг. и переход к современной продолжающейся теплой фазе. Потоки могут быть оценены с помощью модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА), использующей исторические данные по ТПО и концентрации морского льда как граничные условия. Кроме того, могут быть использованы полуэмпирические (полученные также с помощью атмосферной модели, но с учетом данных наблюдений в свободной тропосфере) данные реанализа NCEP (Kalnay et al., 1996) с 1948г. по настоящее время, которые доступны для периода последнего потепления и, частично, для предшествующего периода похолодания.

Оценки среднесезональных аномалий потоков турбулентного тепла в атлантическом секторе (70° з.д. – 80° в.д.), представленные на рис. 4, явно указывают на два хорошо разделенных максимума, которые характерны для всех трех переходов между экстремумами АДК, как по данным NCEP (рис. 4а), так и по данным МОЦА ECHAM5 (рис. 4б). Один максимум вблизи 40° с.ш. связан с соответствующими аномалиями ТПО. Другой расположен между 70° с.ш. и 80° с.ш., что указывает на его связь с изменениями ледового покрова, которые максимальны как раз в этом зональном поясе в Гренландском и Баренцевом морях в зимний период. Аномалии потоков турбулентного тепла, полученные по данным контрольного эксперимента (рис. 4в) достаточно хорошо соответствуют эмпирическим и модельным оценкам как по структуре, так и по амплитуде.

Усиление климатических колебаний в Арктике положительной обратной связью между площадью морского льда и притоком океанического тепла. Арктический сегмент потоков турбулентного тепла составляет примерно 40% от интегральной величины аномальных потоков, связанных с АДК, несмотря на существенно меньшую площадь поверхности океана в этом сегменте. Одной из причин, которая может объяснить увеличение потерь тепла в Арктике, является усиление аномалий океанического притока в Баренцево море вследствие положительной обратной связи между притоком и площадью морского льда. В работе (Bengtsson et al., 2004) было впервые предположено, что потепление середины XX века вызвано долгопериодной аномалией переноса океанического и атмосферного

тепла, усиленного положительной обратной связью. Такие выводы были сделаны на основе анализа данных наблюдений и расчетов с климатической моделью. Позже было показано, что такая обратная связь может приводить к полному прекращению океанического притока в Баренцево море (Semenov et al., 2009).

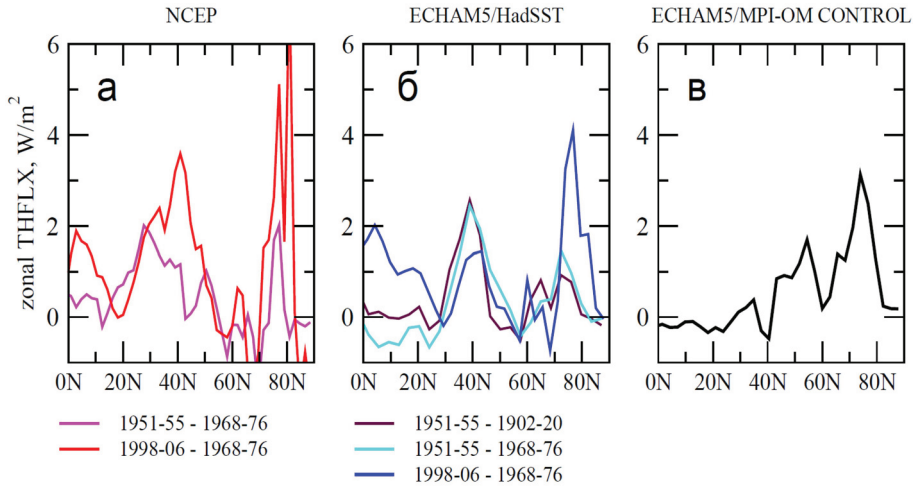


Рисунок 4 – Разность между среднезональными аномальными потоками турбулентного тепла в атмосферу с поверхности океана для положительной и отрицательной фаз АДК ($Вт/м^2$) по данным (а) реанализа NCEP, (б) результатам экспериментов с МОЦА ECHAM5 при использовании данных наблюдений по ТПО и границам морского льда (HadISST1) и (в) контрольного эксперимента с МОЦАО ECHAM5/MPI-OM как разность между 30-летними периодами высокой и низкой фазы АДК.

Схематически механизм положительной обратной связи представлен на рис. 5. Усиление океанического притока приводит к уменьшению площади морского льда и усилению потерь тепла с поверхности моря. Потери тепла с поверхности Баренцева моря в зимний период в среднем за сезон достигают $150 \text{ Вт}/\text{м}^2$ с мгновенными значениями, достигающими до $1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Такой сильный источник тепла вызывает конвекцию и образование циклонической завихренности в нижней тропосфере. Как показали эксперименты с МОЦА (Bengtsson et al., 2004), аномалии атмосферной циркуляции, связанные с уменьшением концентрации морского льда в Баренцевом море приводят к усилению юго-западных ветров в западной оконечности моря. Это приводит к дальнейшему усилению океанического (как и атмосферного) притока тепла в Баренцево море, формируя положительную обратную связь между притоком и площадью ледового покрова.

Таким образом, АДК сопровождаются усиленными потерями тепла из океана в атмосферу в Арктике, которые ранее не учитывались при моделировании воздействия АДК на глобальный климат. Следует отметить, что ряд физических процессов, приводящих к данной обратной связи достаточно сложен, их адекватное моделирование требует достаточного высо-

кого пространственного разрешения, прежде всего океанических моделей в атлантическом секторе Арктики, и реалистичного воспроизведения характеристик климата в регионе.

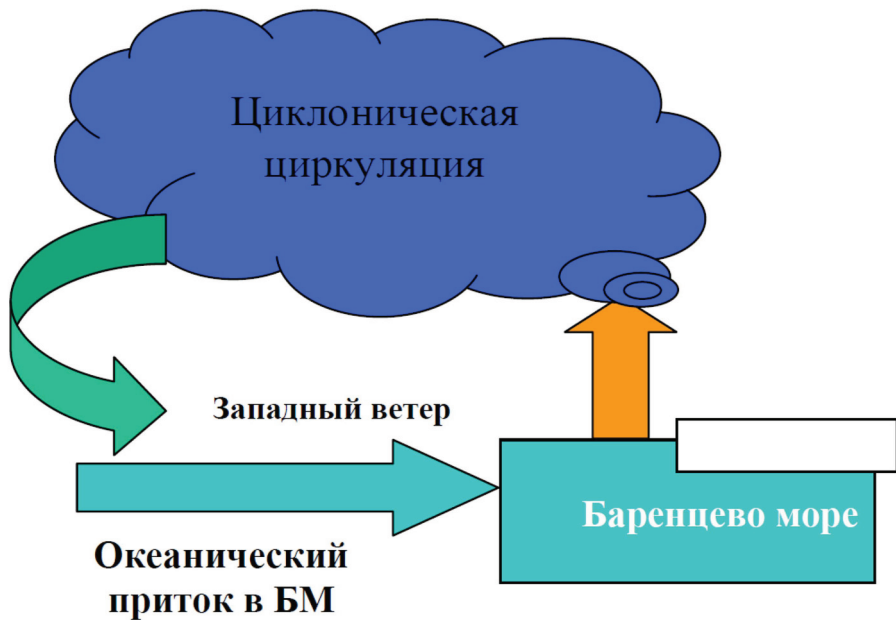


Рисунок 5 – Схема положительной обратной связи между океаническим притоком воды в Баренцево море и ледовым покровом. Положительная аномалия притока вызывает уменьшение площади ледового покрова и усиление циклонической циркуляции и западных ветров между северной оконечностью Норвегии и Шпицбергенom, что далее усиливает приток.

Аномальные потоки тепла, связанные с АДК и использующиеся в модельных экспериментах

Следует отметить основные проблемы при использовании эмпирических данных по ТПО и границе морских льдов для оценки потоков тепла, связанных с АДК. Во-первых, невозможно разделить сигнал, относящийся к АДК, и изменения потоков, вызванные внешним климатическим воздействием (прежде всего увеличением концентрации парниковых газов и изменениями концентрации сульфатного аэрозоля). Это особенно важно для трендов последних десятилетий. Изменения ТПО в начале XX века могут быть наиболее репрезентативными для оценки естественных аномалий потоков тепла, связанных с АДК, т.к. в это время антропогенное воздействие на климат было относительно слабым. Это также относится к периоду похолодания в 1950-1970гг. К сожалению, надежные данные по границе морских льдов в зимний период доступны только для перехода к последней теплой фазе АДК. Спутниковые наблюдения за ледовым покровом начались в 1978г. Сеточные данные по концентрации ледового покрова доступны с 1953г. (Walsh, Johnson, 1978), но их качество до 1960гг. неудовлетворительно. В работе (Semenov, Latif, 2012) показано,

что эти данные существенно занижают амплитуду изменений площади ледового покрова в Арктике зимой в середине XX века (и, соответственно, потоков тепла со свободной ото льда поверхности океана в атмосферу), которая, возможно, была примерно такой же величины, что и современная отрицательная аномалия.

Поэтому для моделирования эффекта АДК предпочтительно использовать данные контрольного эксперимента с климатической моделью, которая хорошо воспроизводит АДК и связанную с ним структуру и величину аномальных потоков тепла. Согласно условиям постановки таких (контрольных) экспериментов, в них отсутствуют любые внешние воздействия на климат, и вся изменчивость связана исключительно с внутренней динамикой. В результате анализа контрольных экспериментов модельной базы данных СМIP3 была выбрана модель, наиболее подходящая под указанные критерии (Semenov et al., 2010). Структура аномальных потоков тепла в модели, связанных с АДК, показана на рис. 4с. Интегральная величина аномальных потоков составляет 0,088 ПВт, что согласуется с эмпирическими оценками изменений меридионального переноса тепла в Северной Атлантике. Пространственная структура среднегодовых аномальных потоков показана на рис. 6.

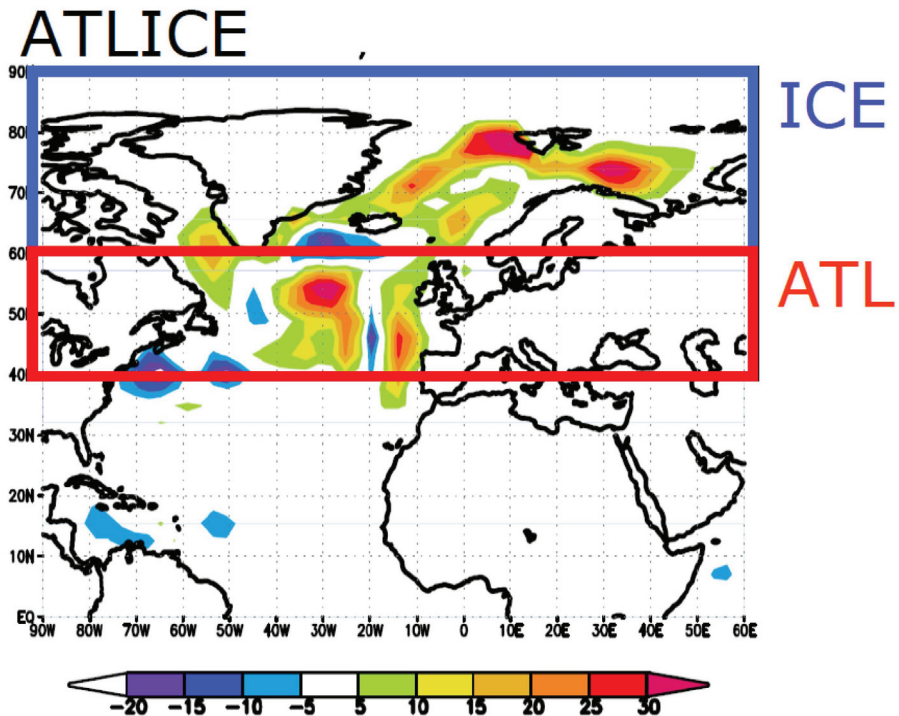


Рисунок 6 – Аномальные среднегодовые потоки турбулентного тепла с поверхности океана (W/m^2), соответствующие разности между высокой и низкой фазами АДК по данным контрольного эксперимента (D16) с МОЦАО ЕСНАМ5/MPI-OM. Цветные прямоугольники обозначают сектора, где задавались аномальные потоки турбулентного тепла в различных численных экспериментах.

Следует отметить, что оценки аномальных потоков тепла, связанные с АДК и полученные с использованием эмпирических данных за относительно непродолжительный период времени, чувствительны к выбору соответствующих временных периодов и отличаются неопределенностью, связанной с влиянием других факторов. Климатические модели представляют длинные ряды данных, но, в настоящее время, не в состоянии адекватно воспроизводить все процессы, важные для динамики АДК. Поэтому используемые в настоящей работе аномалии потоков следует считать некоторой идеализированной оценкой, которая, тем не менее, лежит в диапазоне неопределенности оценок, основанных на эмпирических данных.

Моделирование влияния АДК на глобальный климат

Для исследования отклика глобальной климатической системы на аномальные потоки тепла, связанные с АДК были проведены эксперименты с совместной моделью МОЦА ECHAM5 и термодинамической моделью верхнего перемешанного (50 м) слоя океана. Используемая для экспериментов модель имеет спектральное горизонтальное разрешение T31 (примерно, $3,85^\circ \times 3,85^\circ$ по широте и долготе) и 19 вертикальных уровней. Несмотря на относительно низкое пространственное разрешение модели, она способна реалистично воспроизводить главные моды естественной климатической изменчивости и климатические тренды (напр. Semenov et al., 2008; Semenov and Latif 2012). Океаническая модель представляет собой уравнение сохранения тепла для однородного слоя океана для каждой модельной ячейки с нулевым потоком тепла на боковых и нижней границах ячейки и потоком турбулентного тепла (скрытого и явного) и радиации (длинноволновой и коротковолновой) на верхней границе ячейки. Средний климатологический перенос тепла между ячейками, связанный с динамикой океана (конвергенция океанического потока тепла), задавался с помощью, так называемого Q-потока, вычисляемого по данным эксперимента с МОЦА с заданными граничными условиями для ТПО и границ морского льда за период 1971-2000гг. Для моделирования эффекта АДК использовались дополнительные (аномальные) потоки океанической конвергенции тепла, связанные с АДК. Были проведены: 1) контрольный эксперимент (CNTRL), в котором Q-поток был задан по данным эксперимента с МОЦА ECHAM5 с использованием стандартных (соответствующих современному климату) климатологических данных по ТПО и морскому льду AMIP-II; 2) эксперимент (ATLICE) с дополнительным потоком тепла только в секторе ($70^\circ \text{з.д.} - 80^\circ \text{в.д.}, 40^\circ \text{с.ш.} - 90^\circ \text{с.ш.}$) (рис. 6, черный сектор) для исключения воздействия других факторов, кроме прямого влияния АДК; 3) эксперимент (ATL) с дополнительным потоком тепла (рис. 6, синий сектор) только в Атлантике (сектор $70^\circ \text{з.д.} - 80^\circ \text{в.д.}, 40^\circ \text{с.ш.} - 60^\circ \text{с.ш.}$); 4) эксперимент (ICE) с дополнительным потоком тепла (Рис. 5.8, красный сектор) только в Арктике (сектор $70^\circ \text{з.д.} - 80^\circ \text{в.д.}, 60^\circ \text{с.ш.} - 90^\circ \text{с.ш.}$). Длительность каждого эксперимента составляла 100 модельных лет.

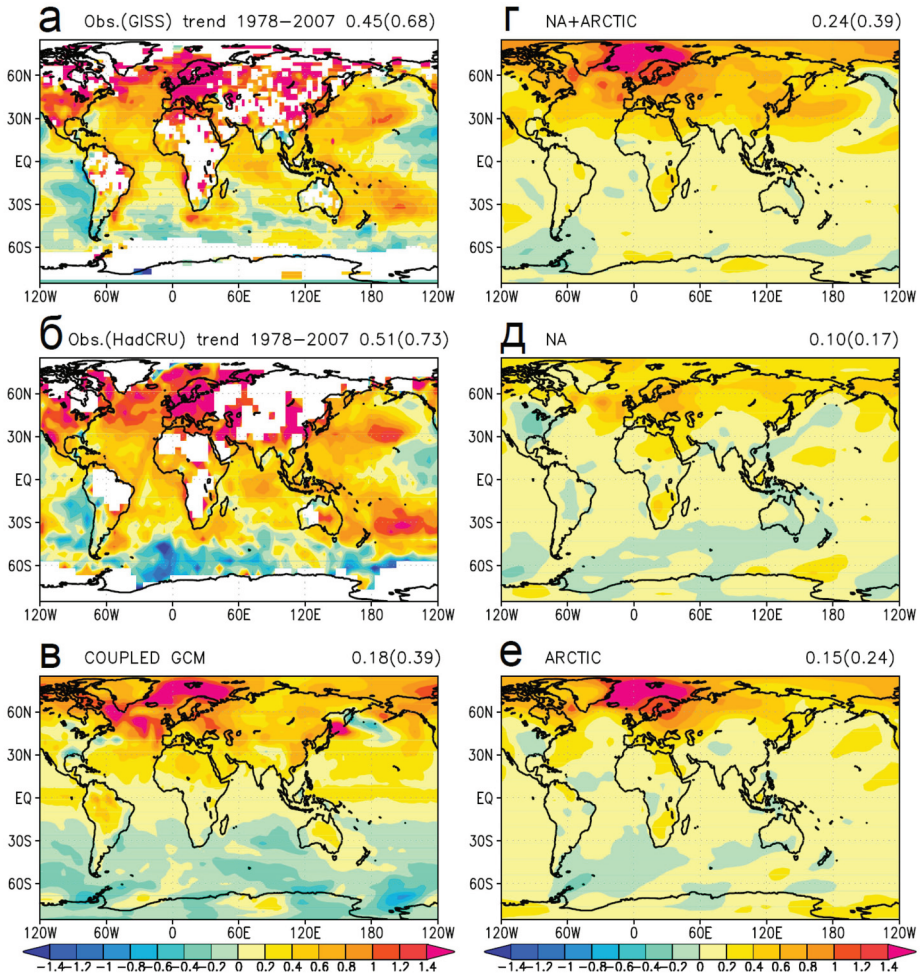


Рисунок 7 – Тренд среднегодовой приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) для периода 1978–2007гг. ($^{\circ}\text{C}/30$ лет) по данным наблюдений (а) GISS и (б) HadCRU3. (в) Разность ПТВ для периодов, соответствующих экстремумам АДК, которые были использованы для вычисления аномальных потоков турбулентного тепла (см. рис. 6). Среднегодовые аномалии ПТВ ($^{\circ}\text{C}$) (относительно контрольного эксперимента) по результатам экспериментов при воздействии аномальных потоков тепла в Северной Атлантике и Арктике (ATLICE, з), только в Северной Атлантике (ATL, д), только в Арктике (ICE, е). Значения в верхнем правом углу каждой карты обозначают глобальное и (в скобках) среднеполушарное изменения температуры.

Аномальные потоки тепла приводят к значительному потеплению над всем Северным полушарием со среднеполушарным значением $0,39^{\circ}\text{C}$ (рис. 7). Глобальное потепление составляет $0,24^{\circ}\text{C}$. Особенно сильное потепление вместе с Северной Атлантикой и Арктикой происходит в северных регионах континентов СП. Результаты экспериментов можно сравнить с наблюдаемыми температурными трендами (рис. 7а) за послед-

ние 30 лет (1978-2007гг.). В 1978г. ТПО в Северной Атлантике достигла минимума после потепления середины XX века, после чего начался ее быстрый рост. Таким образом, данный тридцатилетний тренд соответствует переходу от отрицательного экстремума АДК к его положительной фазе. Картины потепления на рис. 7а и 7в очень похожи, имея максимумы над северо-западной частью Евразии, северо-восточной частью Северной Америки и восточной Азии с наиболее сильным потеплением в атлантическом секторе Арктики и над Скандинавией. В эксперименте ATLICE также наблюдается протяженная полоса потепления в Северном Тихом океане вдоль 30°с.ш., которая очень похожа на наблюдаемую картину потепления в этом регионе.

Отдельный вклад аномальных потоков, связанных с АДК, в Атлантике и в Арктике может быть оценен из результатов экспериментов ATL и ICE (рис. 7д и 7е, соответственно). В глобальном и среднеполушарном (в СП) потеплении, вклад потоков в Арктике, примерно, на 30% больше, чем вклад потоков 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 (рис. 7д). Вертикальная структура температурных изменений в модельных экспериментах также хорошо согласуется с наблюдаемыми трендами (рис. 7 в Semenov et al., 2010).

Таким образом, с учетом потоков тепла в Арктике, оценка воздействия АДК на температурные изменения (глобальные и в СП) увеличивается, примерно, в 2 раза по сравнению с ранее опубликованными результатами (Zhang et al., 2007).

Обсуждение и выводы

Предложено объяснение ускорения потепления приповерхностной температуры Северного полушария в последние три десятилетия XX века. Причиной ускорившегося потепления может являться естественная долгопериодная климатическая изменчивость в Северной Атлантике, приводящая также к значительным изменениям в Арктическом регионе, учет которых принципиально важен для оценки влияния внутренней изменчивости на глобальный климат. Полученные результаты показывают, что естественная изменчивость может приводить к потеплению, составляющему, примерно, половину от величины наблюдаемого тренда. Следует отметить, что климатические модели в среднем по ансамблю CMIP3 (что считается наиболее достоверной оценкой моделируемого отклика климатической системы на внешнее воздействие) практически идеально воспроизводят тренд глобальной и среднеполушарной (СП) температуры в последние 30 лет XX века. Поскольку, как было показано, половина этого тренда могла являться следствием внутренней климатической изменчивости, можно предположить, что чувствительность моделей к внешнему воздействию (прежде всего к увеличению концентрации парниковых газов в атмосфере) существенно (примерно в 2 раза) завышена. Значительные рас-

хождения модельных результатов с наблюдениями на региональных масштабах (Kravtsov, Spannagle, 2008), в частности в Северной Атлантике и Арктике и значительные расхождения в чувствительности к аэрозольному форсингу (Knutti, 2008) при хорошем воспроизведении глобальных температурных трендов говорят об обоснованности таких опасений.

Представленные эксперименты указывают на то, что, примерно, половину потепления в Северном полушарии за последние 30 лет составили изменения, вызванные переходом к положительной фазе меридионального круговорота воды (МКВ) в Северной Атлантике, испытывающего долгопериодные естественные колебания (с периодом 60-70 лет). Эксперименты с моделью общей циркуляции океана при использовании предписанного по данным наблюдений атмосферного воздействия показывают, что МКВ действительно усиливался в последние десятилетия (Boning et al., 2006). Такие эксперименты также показывают, что в первое десятилетие XXI века АДК не растет, что может объяснить замедление темпов глобального потепления. В то же время, перенос тепла в Арктику происходит с некоторой задержкой, обусловленным временем адвекции аномалий. Кроме того, усиленный приток может поддерживаться положительной обратной связью, представленной выше. Это может объяснять тот факт, что потепление в Арктике все еще продолжается теми же темпами, что и ранее. Наконец, нельзя исключить возможности, что климатические изменения в Арктике достигли, так называемой, критической точки – “tipping point” (Lenton et al. 2008), порогового значения, при достижении которого (при глобальном потеплении) могут происходить необратимые процессы в климатической системе. За последние годы уменьшение площади ледового покрова в Арктике значительно ускорилось и появились предположения, что возможно, критический порог уже достигнут (Lindsay, Zhang, 2005) и следует ожидать неизбежного полного таяния льда в летний сезон уже в ближайшие годы.

В заключение хочется отметить новую гипотезу формирования внутренних колебаний глобального климата, связанную с колебаниями океанической циркуляции в Южном Океане. Такие колебания связаны с эпизодами глубокой конвекции в море Уэдделла (Latif et al., 2013). Глубоководная ветвь термохалинной циркуляции в Южной Атлантике приводит к аккумулярованию относительно теплой воды в море Уэдделла, которое при достижении некоторого порогового значения, приводит к глубокой конвекции и выделению большого количества тепла. Предполагается, что такие эпизоды происходят примерно раз в 100 лет, о чем свидетельствуют температурные данные для высоких широт Южного полушария. Вклад таких колебаний в изменения глобальной температуры, оцененный по результатам модельных экспериментов, составляет около 0,2°C, что еще больше расширяет диапазон внутренних долгопериодных колебаний климата.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №14-17-00647)

Литература

- Семенов В.А. 2008. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике. Доклады РАН, т. 418, №1, с. 106-109.
- Семенов В.А. 2010. Долгопериодные климатические колебания в Арктике и их связь с глобальными изменениями климата. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, 268 с.
- Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М. 2012. Влияние температуры поверхности океана и границ морского льда на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, т. 48, №4, с. 403-421.
- Bengtsson, L., V.A. Semenov, Johannessen O. M. 2004. The early-twentieth-century warming in the Arctic – A possible mechanism. *J. Climate*, v. 17, pp. 4045-4057.
- Boning C.W., Scheinert M., Dengg J., Biastoch A., Funk A. 2006. Decadal variability of subpolar gyre transport and its reverberation in the North Atlantic overturning. *Geophysical Research Letters*, v. 33, doi: 10.1029/2006gl026906.
- Booth B.B., Dunstone N.J., Halloran P.R., Andrews T., Bellouin N. 2012. Aerosols implicated as a prime driver of twentieth-century North Atlantic climate variability, *Nature*, v. 484, pp. 228-232.
- Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F. B. Jones P.D. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, v. 111, D12106, doi:10.1029/2005jd006548.
- Delworth T.L., Mann M.E. 2000. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere. *Clim. Dyn.*, v. 16, pp. 661-676.
- Graversen R.G., Mauritsen T., Tjernstrom M., Kallen E., Svensson, G. 2008 Vertical structure of recent Arctic warming, *Nature*, v. 451, pp. 53-54, 10.1038/nature06502.
- Kalnay E., et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, v. 77, pp. 437-470.
- Kerr R.A. 2000. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries. *Science*, v. 288, pp. 1984-1985.
- Knutti R. 2008. Why are climate models reproducing the observed global surface warming so well? *Geophysical Research Letters*, v. 35, L18704, doi:10.1029/2008gl034932.
- Kravtsov S., Spannagle C. 2008. Multidecadal climate variability in observed and modeled surface temperatures. *J. Climate*, v. 21, pp. 1104-1121.
-

- Latif M., Martin T., Park W. 2013. Southern Ocean Sector Centennial Climate Variability and Recent Decadal Trends. *J. Climate*, v. 19, pp. 7767-7782.
- Lenton T.M., et al. 2008. Tipping elements in the Earth's climate system, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. V. 105(6), pp. 1786-1793.
- Lindsay R.W., Zhang J. 2005. Thinning Arctic Sea ice: Have we passed a tipping point? *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 86(3), pp. 325-326.
- Mangini A., Spötl C., Verdes P. 2005. Reconstruction of temperature in the Central Alps during the past 2000 yr from a $\delta^{18}O$ stalagmite record. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 235, pp. 741-751.
- Mann M.E., Park J. 1994. Global-scale modes of surface temperature variability on interannual to century timescales. *J. Geophys. Res.*, v. 99, pp. 25819-25833.
- Meehl G.A., Covey C., Delworth T., Latif M., McAvaney B., Mitchell J.F.B., Stouffer R.J., Taylor K.E. 2007. The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research. *Bull. Amer. Met. Soc.*, v. 88, pp. 1383-1394.
- Otterå O.H., Bentsen M., Drange H., Suo L. 2010. External forcing as a metronome for Atlantic multidecadal variability. *Nature Geoscience*, v. 3, pp. 688-694.
- Petoukhov V., Semenov V.A. 2010. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. *J. Geophys. Res. – Atmospheres*, v. 115, D21111, doi:10.1029/2009JD013568.
- Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, v. 108, D14, p. 4407 doi:10.1029/2002JD002670.
- Schlichtholz P. 2011. Influence of oceanic heat variability on sea ice anomalies in the Nordic Seas. *Geophys. Res. Lett.*, v. 38, L05705, doi:10.1029/2010GL045894.
- Schlesinger M.E., Ramankutty N. 1994. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. *Nature*, v. 367, pp. 723-726.
- Semenov V.A., Latif M., Jungclaus J.H., Park W. 2008. Is the observed NAO variability during the instrumental record unusual? *Geoph. Res. Lett.*, v. 35. Is. L11701, doi:10.1029/2008GL033273.
- Semenov V.A., Park W., Latif M. 2009. Barents Sea inflow shutdown: A new mechanism for rapid climate changes. *Geoph. Res. Lett.*, v. 36, L14709, doi:10.1029/2009GL038911.
- Semenov V.A., Latif M., Dommenges D., Keenlyside N.S., Strehz A.,

Martin T., Park W. 2010. The Impact of North Atlantic-Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature. *J. Climate* v. 23, pp. 5668-5677.

Semenov V.A., Latif M. 2012. The early twentieth century warming and winter Arctic sea ice. *The Cryosphere*, v. 6, pp. 1231-1237, doi:10.5194/tc-6-1-2012.

Sutton R.T., Hodson D.L.R. 2007. Climate response to basinscale warming and cooling of the North Atlantic Ocean. *J. Climate*, v. 20, pp. 891-907.

Ting M.F., Kushnir Y., Seager R., Li C.H. 2009. Forced and Internal Twentieth-Century SST Trends in the North Atlantic. *Journal of Climate*, v. 22, pp. 1469-1481.

Walsh J.E., Johnson C.M. 1978. Analysis of Arctic sea ice fluctuations 1953-1977. *J. Phys. Oceanogr.*, v. 9, pp. 580-591.

Zhang R., Delworth T.L., Held I.M. 2007. Can the Atlantic Ocean drive the observed multidecadal variability in Northern Hemisphere mean temperature? *Geophys. Res. Lett.*, v. 34, L02709, doi:10.1029/2006GL028683.