

Моделирование влияния естественной долгопериодной изменчивости в Северной Атлантике на формирование аномалий климата

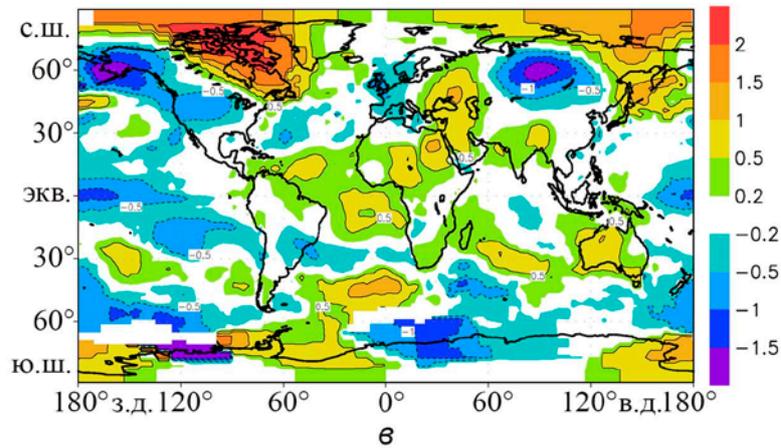
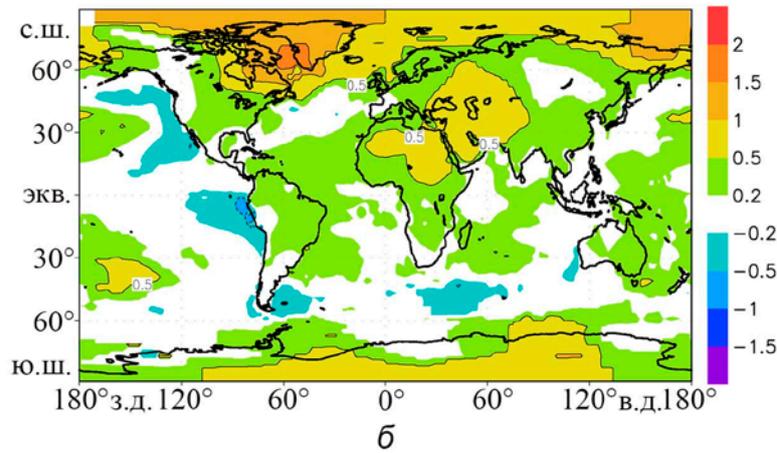
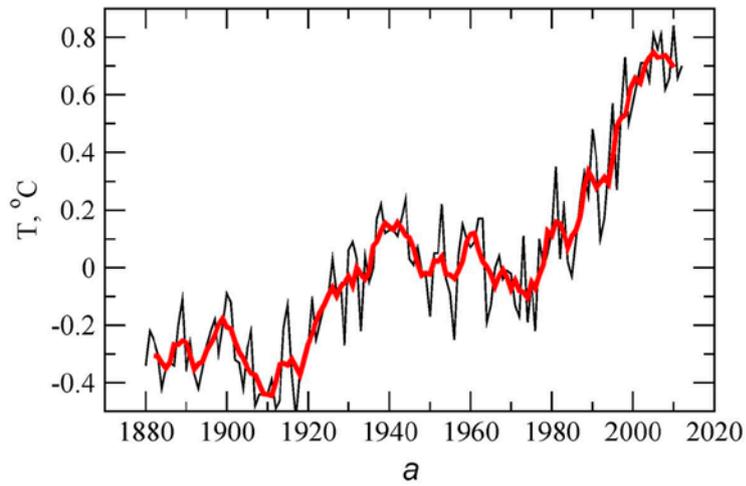
Представлены результаты моделирования влияния естественной изменчивости в системе океан – атмосфера в Северной Атлантике и Арктике на глобальный климат. Анализировались результаты численных экспериментов с совместной моделью общей циркуляции атмосферы и верхнего перемешанного слоя океана с использованием аномальных величин потоков тепла из океана в атмосферу. Согласно полученным результатам, собственной долгопериодной изменчивостью в Северной Атлантике и атлантическом секторе Арктики можно объяснить около половины величины роста приповерхностной температуры Северного полушария в последней трети XX в. Отмечено, что важный вклад при этом вносят аномальные потоки тепла в Арктике, которые обычно не учитываются при моделировании эффекта долгопериодных колебаний в Северной Атлантике. Результаты численных экспериментов подтверждают вывод о значимой роли естественной изменчивости в Северной Атлантике и Арктике в формировании не только региональных, но и глобальных изменений климата. Именно с недостаточным учетом отмеченных эффектов может быть связана существенная переоценка чувствительности некоторых глобальных климатических моделей к увеличению концентрации парниковых газов в атмосфере.

Ключевые слова: естественные и антропогенные изменения климата, Атлантическое долгопериодное колебание (Атлантическая мультideкадная осцилляция).

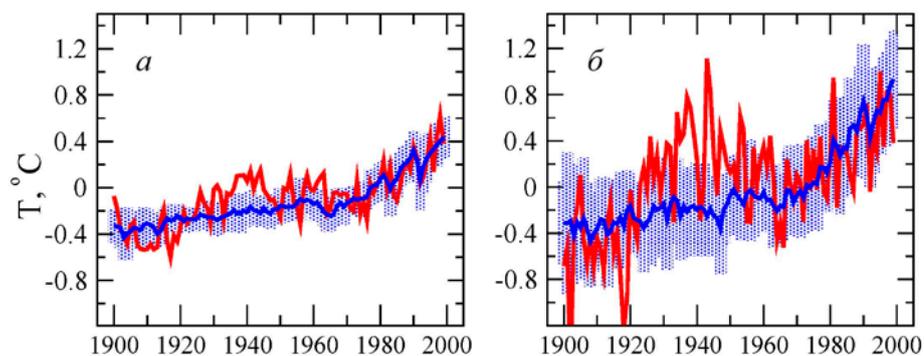
Введение

Среднегодовая приповерхностная температура атмосферы (ПТА) Северного полушария (СП) выросла приблизительно на 1°C с начала XX в. (рис. 1). Потепление было неравномерным и значительно ускорилось в последние десятилетия. Действительно, за последние четыре десятилетия – с температурного минимума 1970-х гг. по настоящее время – в СП потеплело на 0,7°C. Наряду с современным потеплением значительный рост приповерхностной температуры атмосферы отмечался в первой половине XX в. (с последующим некоторым похолоданием) [1]. Темпы роста ПТА в этот период были сравнимы с современными изменениями. Один из возможных механизмов, объясняющих потепление в первой половине XX в., связан с естественной долгопериодной изменчивостью климата, в частности с колебаниями интенсивности меридиональной океанической циркуляции в Северной Атлантике [2 – 7]. Некоторые авторы указывают на существенный вклад в изменения ПТА внешних воздействий на климат естественного происхождения. К ним прежде всего относятся вариации солнечной активности, содержания в атмосфере аэрозоля вулканического и антропогенного происхождения [1, 8, 9]. Отметим, что по результатам расчетов с использованием ансамбля глобальных климатических моделей, выполненных в рамках международного проекта *CMIP3* [10] и учитывающих как естественные, так и антропогенные воздействия на климатическую систему, потепление в середине XX в. в целом заметно недооценивается (рис. 2, а). Особенно следует отметить значительные различия модельных результатов и данных наблюдений в высоких широтах Северного полушария (рис. 2, б).

© В.А. Семенов, И.И. Мохов, А.Б. Полонский, 2014



Р и с. 1. Аномалии среднегодовой приповерхностной температуры ($^{\circ}\text{C}$) по данным *GISS* [11]: *a* – осредненные для Северного полушария (красная кривая – скользящие 5-летние средние значения); *б* – в первом десятилетии XXI в. относительно последнего десятилетия XX в.; *в* – тренд температуры ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) для периода 2001 – 2010 гг.



Р и с. 2. Среднегодовые аномалии приповерхностной температуры в XX в. по данным наблюдений (красная кривая – по данным *CRUTEM3*) и по результатам численных экспериментов с ансамблем климатических моделей *CMIP3* при антропогенных воздействиях и влиянии внешних естественных факторов – солнечной и вулканической активности (синяя кривая – средние по ансамблю моделей изменения, синяя штриховка – стандартные отклонения для ансамбля моделей) для суши Северного полушария – *а* и Арктики (60 – 90° с. ш.) – *б*

Адекватное понимание причин резкого потепления в первой половине и последней трети XX в. исключительно важно для определения относительно вклада антропогенных воздействий, естественных внешних факторов и внутренней изменчивости в температурные колебания и для корректной оценки чувствительности климата к увеличению концентрации парниковых газов [4, 5, 7]. В работе [4] сделан вывод, что не только в модельных результатах, полученных в рамках различных численных экспериментов, но и в большинстве оценок климатических изменений, выполненных с применением статистических палеореконструкций, недооцениваются естественные изменения климата. В значительной степени быстрый рост приземной температуры в последней трети XX в. (особенно в Северной Атлантике и прилегающих материковых регионах) связан с совпадением знака тренда и квазипериодической компоненты изменчивости с характерным периодом в несколько десятков лет (Атлантическая мультидекадная осцилляция (АМО), которая в настоящее время находится в фазе роста). Утверждалось, что в связи с ожидаемой сменой фазы АМО темпы потепления должны вскоре уменьшиться. И этот вывод подтверждается последними данными наблюдений.

Существенная особенность современных температурных изменений заключается в тенденции замедления темпов приповерхностного потепления в последние годы. Хотя все среднегодовые значения температурных аномалий для СП в XXI в. (по данным *GISS* [11]) превышают предшествующие значения за период инструментальных наблюдений с середины XIX в. (за исключением периода, когда наблюдался сильный глобальный эффект особенно интенсивного Эль-Ниньо 1997 – 1998 гг.), рост приповерхностной температуры в СП за первое десятилетие XXI в. составил 0,1°C, глобальной – всего 0,05°C. При этом тренды среднегодовой температуры в 2001 – 2010 гг. характеризуются некоторым уменьшением ПТА над континентами СП преимущественно вследствие похолодания в зимний период, контрастирующего с

сильным потеплением в Арктике (0,55°C в среднем для широт севернее 60° с. ш.) (рис. 1).

Среднее за десятилетие похолодание над континентами СП сопровождалось несколькими сильными отрицательными аномалиями в зимний период 2003, 2006, 2010 и 2012 гг. Проявление подобных отрицательных температурных аномалий не противоречит общей тенденции потепления последних десятилетий. Согласно модельным расчетам, следует ожидать увеличения количества блокирующих антициклонов, с которыми связаны экстремальные морозы зимой, и усиления их общего климатического влияния на сушу СП при глобальном потеплении [12, 13]. Формированию аномально холодных зим может способствовать уменьшение площади ледового покрова в Арктике вследствие нелинейного отклика атмосферной циркуляции на нагрев нижней атмосферы зимой в высоких широтах [14, 15].

Несмотря на замедление глобального (и среднеполушарного) потепления в XXI в. рост приповерхностной температуры в Арктике продолжился практически такими же темпами, как и в предшествующее десятилетие, со значительными различиями температурных изменений в средних и высоких широтах. Среди возможных причин – изменения атмосферной циркуляции с аномально сильной адвекцией тепла в высокие широты [16] и перенос океанического тепла в атлантическом секторе Арктики [17]. На связь с океаническим переносом тепла также указывает пространственная структура долгопериодных колебаний зимней температуры в Арктике [18, 19].

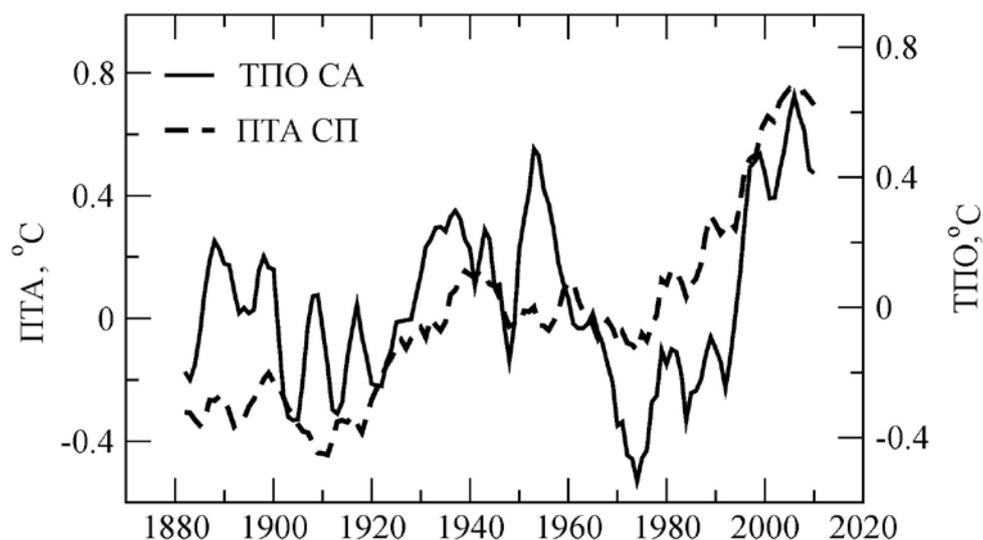
Быстрое потепление в Арктике взаимосвязано с уменьшением площади морских льдов с рекордным (за период спутниковых наблюдений с 1978 г.) минимумом в сентябре 2012 г. Уменьшение площади арктических морских льдов летом является одним из самых ярких проявлений глобального потепления. В то же время площадь арктического льда зимой уменьшается не так быстро и, согласно новым модельным оценкам, в настоящее время она сравнима со значениями предшествующего периода потепления в середине XX в. [20]. Понимание особенностей динамики климата в XX в. и начале XXI в. требует более детальных и разносторонних исследований, учитывающих фактор внутренних естественных колебаний климата, в том числе для построения достоверных сценариев возможных климатических изменений в XXI в.

Долгопериодные колебания климата в Северной Атлантике и Арктике

Динамику температурных изменений за период инструментальных наблюдений (рис. 1, *a*) можно представить как результат совместного действия монотонно растущего антропогенного воздействия и квазипериодического внутреннего колебания естественного происхождения, связанного с динамикой океанической циркуляции, характерный временной масштаб которой составляет несколько десятилетий.

Долгопериодные квазипериодические вариации глобального и регионального климата с периодом 50 – 70 лет проявляются в ПТА как по данным инструментальных наблюдений последних 150 лет, так и в различных температурных реконструкциях [21, 22]. Наиболее сильно эти вариации выражены в изменениях температуры поверхности океана (ТПО) в Северной Атлантике

(рис. 3) [2]. Именно поэтому они получили название Атлантическое долгопериодное колебание (АДК), или АМО. Эти колебания, как видно на рис. 3, в целом синфазны с соответствующими вариациями приповерхностной температуры СП в последнем столетии. Анализ пространственной структуры различий результатов модельных экспериментов по воспроизведению климатических изменений в XX в. и данных наблюдений для ПТА показал, что наиболее сильные расхождения характерны для Северной Атлантики [23, 24]. В связи с существенной ролью региональных колебаний океанической циркуляции в Северной Атлантике необходима количественная оценка вклада связанных с АДК естественных колебаний климата в происходящие глобальные климатические изменения. От адекватности учета фактора влияния АДК существенно зависит качество климатического прогноза на ближайшие десятилетия.



Р и с. 3. Среднегодовые аномалии температуры поверхности океана в Северной Атлантике, осредненные для региона 50 – 10° з. д., 40 – 60° с. ш. (ось справа) как индекс АДК и аномалии приповерхностной температуры в Северном полушарии (ось слева)

При моделировании воздействия АДК на глобальный климат ранее использовались только аномалии ТПО в Северной Атлантике. В [25] в совместной модели атмосферы и океана оценивалась роль аномальных потоков тепла из океана в атмосферу, связанных с АДК в XX в. При этом с учетом лишь потоков в Северной Атлантике, регионе аномальных значений ТПО, вклад АДК в вариации приповерхностной температуры СП не превышал 0,2°С.

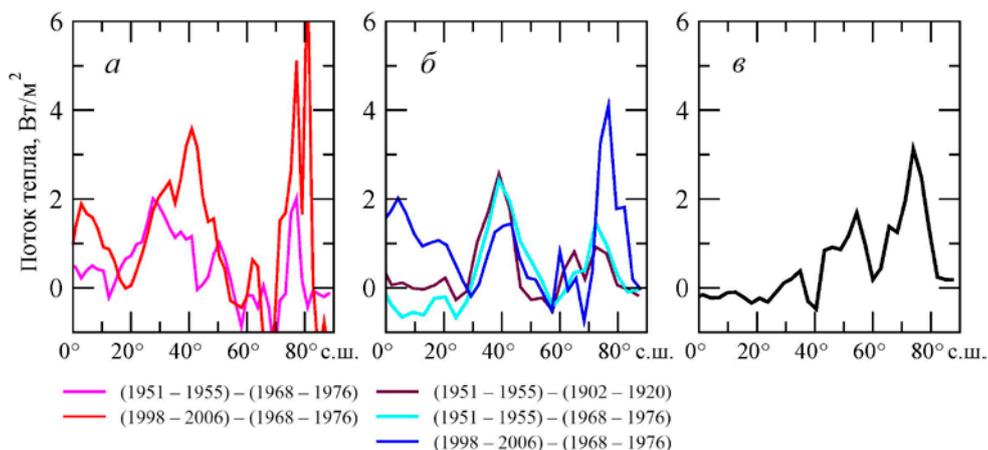
Анализ величины аномальных турбулентных потоков тепла на нижней границе атмосферы, связанных с экстремумами АДК в XX в., показал, что АДК сопровождается помимо аномальных потоков в Северной Атлантике [26] аномальными потоками в атлантическом секторе Арктики, наиболее значительными в зимний период в Баренцевом море [6, 27]. Эти аномалии связа-

ны с изменениями границ морского льда, вызванными вариациями океанического притока тепла. Отдельные современные климатические модели способны воспроизводить влияние АДК на океанический приток в Баренцево море и соответствующие потоки тепла в атмосферу [27, 28].

Аномальные потоки тепла из океана в атмосферу, связанные с АДК

Анализ эмпирических данных ТПО и границ морского льда в XX в. [29] дает возможность оценить величины аномальных потоков турбулентного тепла в атмосферу, связанных с АДК, для трех долгопериодных изменений: перехода от холодной фазы в начале XX в. к температурному максимуму в 1940-х гг., последующего перехода к холодной фазе в 1970-х гг. и перехода к современной теплой фазе. Потоки могут быть оценены с помощью модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) с использованием исторических данных для ТПО и концентрации морского льда в качестве граничных условий. Кроме того, могут быть использованы данные реанализа *NCEP* [30].

Согласно оценкам среднезональных аномалий потоков турбулентного тепла, в атлантическом секторе (70° з. д. – 80° в. д.) проявляются два максимума, характерные для всех трех переходов, между экстремумами АДК как по данным реанализа *NCEP* (рис. 4, *а*), так и по модельным расчетам с МОЦА *ECHAM5* (рис. 4, *б*). Один максимум вблизи 40° с. ш. связан с соответствующими аномалиями ТПО. Другой максимум, согласно модели общей циркуляции атмосферы и океана МОЦАО *ECHAM5/MPI-OM*, расположен между 70 и 80° с. ш. (рис. 4, *в*), что указывает на его связь с морскими льдами, изменения которых максимальны в этом широтном поясе в Гренландском и Баренцевом морях в зимний период.



Р и с. 4. Среднезональные аномальные потоки турбулентного тепла в атмосферу с поверхности океана (разность между периодами максимума и минимума АДК): *а* – по данным реанализа *NCEP*; *б* – по результатам экспериментов с МОЦА *ECHAM5* при использовании данных наблюдений по ТПО и границам морского льда *HadISST1*; *в* – по данным контрольного эксперимента с МОЦАО *ECHAM5/MPI-OM*

Вклад аномалий потоков турбулентного тепла в Арктике, связанных с АДК, может составлять ~ 45% от интегральной величины аномальных потоков. Столь значительные потери тепла в Арктике можно связать с усилением аномалий океанического притока в Баренцево море вследствие положительной обратной связи между притоком и площадью морского льда. Анализ этой обратной связи по данным наблюдений и ее моделирование были выполнены в [31], где предполагалось, что потепление в середине XX в. было вызвано долгопериодной аномалией переноса океанического и атмосферного тепла, усиленного положительной обратной связью. В [32] показано, что такая обратная связь может приводить к полному прекращению океанического притока в Баренцево море.

Механизм положительной обратной связи функционирует следующим образом. 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 Вт/м^2 с экстремальными значениями, достигающими в отдельные моменты времени до 1000 Вт/м^2 . Подобные источники тепла способствуют конвекции и образованию циклонической завихренности в нижней тропосфере. Как показали эксперименты с МОЦА [31], 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 (и атмосферного) притока тепла в Баренцево море, в результате чего формируется положительная обратная связь между притоком и площадью ледового покрова.

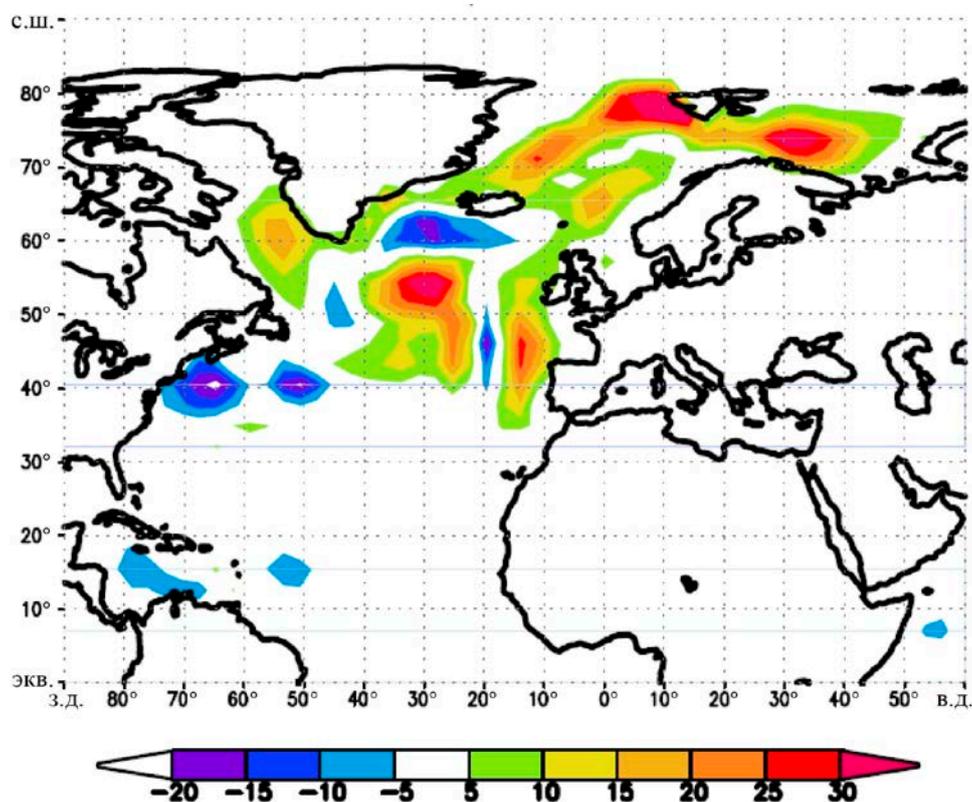
Таким образом, АДК сопровождаются усиленными потерями тепла из океана в атмосферу в Арктике, которые ранее не учитывались при анализе влияния АДК на глобальный климат. Следует отметить, что физические процессы, приводящие к данной обратной связи, достаточно сложны, требуют высокого пространственного разрешения (прежде всего океанических моделей в атлантическом секторе Арктики) и реалистичного воспроизведения характеристик климата в регионе.

Постановка модельных экспериментов

С получением оценок обусловленных АДК потоков тепла на основе эмпирических данных для ТПО и границ морских льдов связан ряд проблем. Во-первых, трудно разделить изменения потоков, обусловленные АДК и внешними климатическими воздействиями (прежде всего увеличением концентрации парниковых газов и изменениями концентрации сульфатного аэрозоля). Это особенно важно при анализе трендов последних десятилетий. Более репрезентативными для оценки естественных аномалий потоков тепла, связанных с АДК, могут быть изменения ТПО в начале XX в., когда антропогенные воздействия на климат были относительно слабыми. Это относится и к периоду похолодания в 1950 – 1970-х гг. К сожалению, надежные данные о границе морских льдов зимой доступны только для периода перехода к последней теплой фазе АДК. Спутниковые данные о морских льдах доступны с 1978 г., сеточные данные о концентрации ледового покрова – с 1953 г. [33],

но их качество до 1960-х гг. представляется неудовлетворительным. В [20] показано, что эти данные могут существенно занижать амплитуду вариаций площади морских льдов в Арктике зимой в середине XX в., что приводит к заниженным оценкам потоков тепла со свободной от льда поверхности океана в атмосферу. Модельные эксперименты [20] указывают на то, что площадь льда в середине XX в. была сравнима с современными значениями, что также согласуется с эмпирическими региональными оценками [34].

Для моделирования эффекта АДК можно использовать результаты контрольного (без внешних воздействий) численного эксперимента с климатической моделью, которая хорошо воспроизводит АДК и связанную с ним структуру и величину аномальных потоков тепла. Соответствующая модель была выбрана на основе анализа результатов контрольных экспериментов в рамках проекта *CMIP3* [27]. Структура связанных с АДК аномальных потоков тепла в модели показана на рис. 4, в. Интегральная величина аномальных потоков составляет 0,09 ПВт, что согласуется с эмпирическими оценками долгопериодных вариаций меридионального переноса тепла в Северной Атлантике [35]. Пространственная структура среднегодовых значений аномальных потоков показана на рис. 5.



Р и с. 5. Среднегодовые аномальные потоки турбулентного тепла ($\text{Вт}/\text{м}^2$) с поверхности океана (разность между периодами максимума и минимума АДК) по данным контрольного эксперимента с МОЦАО *ECHAM5/MPI-OM*

Для анализа отклика глобальной климатической системы на аномальные потоки тепла, связанные с АДК, была проведена серия численных экспериментов с совместной моделью атмосферы (МОЦА *ECHAM5*) и океана (термодинамическая модель верхнего перемешанного 50-метрового слоя), а именно:

– контрольный эксперимент *CNTRL*, в котором конвергенция океанического потока тепла (Q -поток) задавалась по данным численного эксперимента с МОЦА *ECHAM5* с использованием климатологических данных (соответствующих современному климату) для ТПО и морского льда *AMIP-II*;

– эксперимент *ATLICE* с дополнительным потоком тепла только в секторе 70° з. д. – 80° в. д., $40 - 90^\circ$ с. ш. для исключения воздействия других факторов, кроме прямого влияния АДК;

– эксперимент *ATL* с дополнительным потоком тепла *только в Атлантике* (сектор 70° з. д. – 80° в. д., $40 - 60^\circ$ с. ш.);

– эксперимент *ICE* с дополнительным потоком тепла *только в Арктике* (сектор 70° з. д. – 80° в. д., $60 - 90^\circ$ с. ш.);

– эксперимент *ATLICE* $\times 2$, аналогичный эксперименту *ATLICE*, но с удвоенной величиной аномальных потоков.

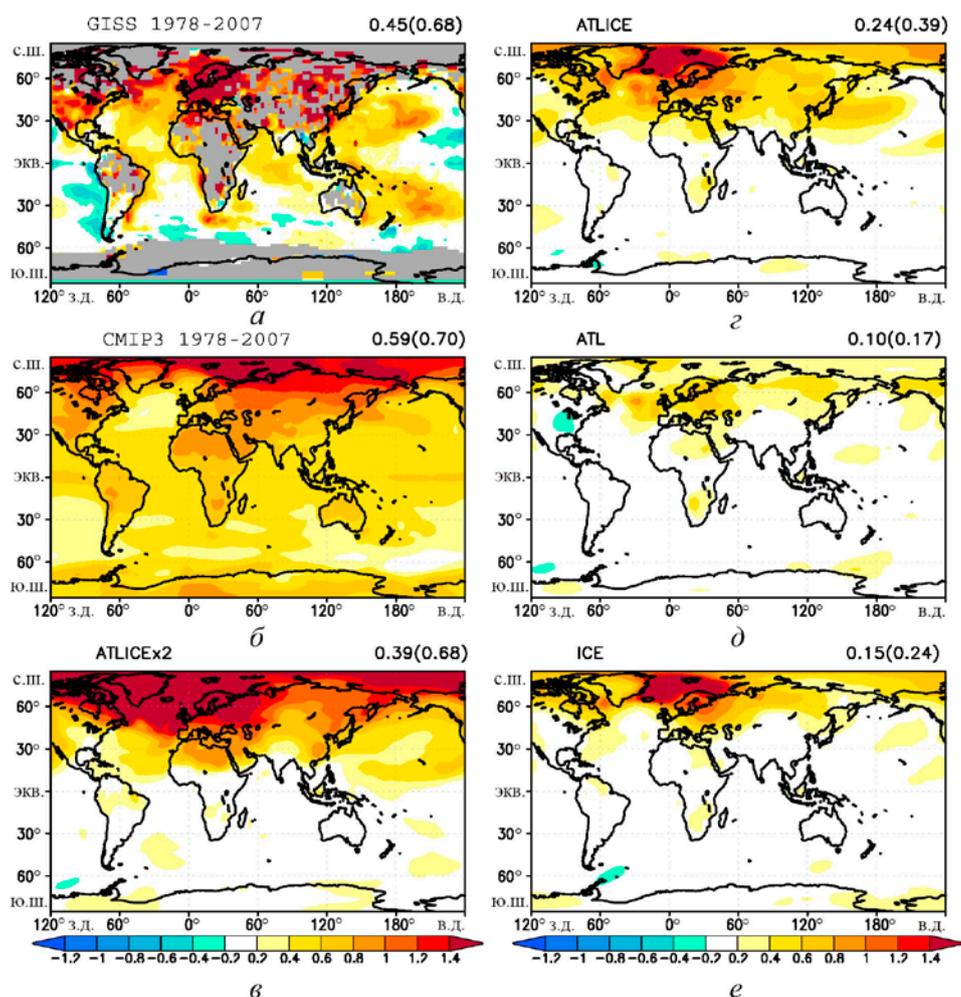
Длительность каждого эксперимента составляла 100 модельных лет.

Результаты моделирования влияния АДК на глобальный климат

Аномальные потоки тепла в проведенных численных экспериментах приводят к значительному увеличению ПТА в Северном полушарии (со среднеполюсферным ростом температуры на $0,4^\circ\text{C}$) при глобальном потеплении $\sim 0,25^\circ\text{C}$ (рис. 6, *з*). Особенно сильное потепление отмечается в высокоширотных регионах континентов СП, в том числе с региональным максимумом в Восточной Европе. Результаты численных экспериментов можно сравнить с температурными трендами по данным наблюдений за период 1978 – 2007 гг. (рис. 6, *а*) и с результатами, полученными по ансамблю глобальных моделей климата *CMIP3* за тот же период (рис. 6, *б*), представленными средним по ансамблю моделей трендом в экспериментах с антропогенным и естественным воздействием на климат. В 1978 г. ТПО в Северной Атлантике достигла минимума после потепления в середине XX в., затем начался ее быстрый рост. Таким образом, последующий 30-летний тренд соответствует переходу от отрицательного экстремума АДК к его положительной фазе. Пространственные распределения потепления на рис. 6, *а, з* очень похожи, с максимумами над северо-западной частью Евразии, северо-восточной частью Северной Америки и Восточной Азией, с наиболее сильным потеплением в атлантическом секторе Арктики и над Скандинавией. В эксперименте *ATLICE* также отмечена протяженная область потепления в Тихом океане вдоль 30° с. ш., что подтверждается данными наблюдений.

Отдельный вклад связанных с АДК аномальных потоков в Атлантике и Арктике может быть оценен по результатам экспериментов *ATL* и *ICE* (рис. 6, *д, е* соответственно). В глобальном и среднеполюсферном (в СП) потеплении вклад потоков в Арктике почти на треть больше, чем в Атлантике. С потоками тепла в Арктическом регионе связано значительное потепление в

Северной Америке, Северной Европе, Западной Сибири. Максимум потепления приходится на регион Баренцева моря, при этом над Евразией наиболее сильное потепление отмечено в Восточной Европе, в том числе на восточном побережье Черного моря. С потоками тепла в Атлантике связан основной вклад в потепление над Восточной Европой и Восточной Сибирью (рис. 6, *е*). Эксперимент с удвоенной величиной потоков (рис. 6, *в*) показал примерно удвоенную аномалию температуры по сравнению с экспериментом *ATLICE* со сходной пространственной структурой. Вертикальная структура температурных изменений в модельных экспериментах также хорошо согласуется с данными наблюдений (рис. 7 в [27]).



Р и с. 6. Тренды среднегодовой приповерхностной температуры атмосферы для периода 1978 – 2007 гг. ($^{\circ}\text{C}/30$ лет) по данным наблюдений *GISS* – *a* и по ансамблю моделей *CMIP3* – *б* в экспериментах с заданным внешним (естественным и антропогенным) воздействием на климат. Изменения ПТА (разность между экспериментами с аномальными величинами потоков и контрольным экспериментом, $^{\circ}\text{C}$) в экспериментах *ATLICE* $\times 2$ с аномальными потоками тепла – *в*, *ATLICE* – *з*, *ATL* – *д*, *ICE* – *е*. Справа сверху над каждым рисунком отмечены соответствующие значения изменений глобальной и полусферной (в скобках – для СП) температуры

С учетом потоков тепла в Арктике воздействие АДК на температурные изменения (глобальные и в СП) примерно вдвое больше, чем без этого учета в экспериментах, представленных в работе [25]. Также следует отметить, что температурные изменения, связанные с АДК (более сильное потепление в Арктике и над Евразией), в самых общих чертах сходны с изменениями, вызванными антропогенным воздействием. Это может привести к трудности в выделении антропогенного сигнала в данных наблюдений.

Обсуждение и выводы

Ускорение роста приповерхностной температуры Северного полушария в последние десятилетия XX в. связано с естественной долгопериодной климатической изменчивостью в Северной Атлантике, приводящей к значительным изменениям и в Арктическом регионе. Адекватное понимание роли внутренней долгопериодной изменчивости климата принципиально важно для оценки вклада антропогенных воздействий на глобальный климат. Согласно полученным результатам, с естественной изменчивостью может быть связано около половины величины повышения температуры последних трех – четырех десятилетий. Следует отметить, что климатические модели в среднем по ансамблю *CMIP3* хорошо воспроизводят тренд глобальной и среднеполюсферной (в СП) приповерхностной температуры для трех последних десятилетий XX в. Согласно полученным модельным оценкам, половина величины этого тренда могла быть связана с внутренней климатической изменчивостью. Это позволяет предположить, что чувствительность моделей к внешнему воздействию (прежде всего к увеличению концентрации парниковых газов в атмосфере) может существенно (примерно вдвое) завышаться.

Результаты проведенных численных экспериментов указывают на то, что около половины величины общего роста приповерхностной температуры СП за последние три – четыре десятилетия действительно связано с переходом к положительной фазе АДК естественного происхождения, для которой характерны долгопериодные колебания с периодом 50 – 70 лет. Эксперименты с моделью общей циркуляции океана при использовании заданных по данным наблюдений вариаций атмосферного воздействия свидетельствуют, что меридиональный перенос тепла усиливался в последние десятилетия [36]. При этом отсутствие роста АДК в первом десятилетии XXI в. должно способствовать замедлению темпов роста глобальной температуры. Сохранение же темпов роста температуры в Арктике можно объяснить тем, что перенос тепла в этот регион происходит с некоторой задержкой, обусловленной временем адвекции аномалий. Нельзя исключить возможности, что климатические изменения в Арктике достигли порогового значения, при превышении которого (при глобальном потеплении) могут происходить необратимые процессы в климатической системе [37]. За последние годы площадь морских льдов в Арктике значительно сократилась, и появились предположения, что, возмож-

но, критический порог уже достигнут [38] и следует ожидать неизбежного полного таяния льда в летний сезон уже в ближайшие годы или десятилетия.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (13-05-41432 РГО_а, 13-05-41443 РГО_а, 12-05-91057-НЦНИ_а, 14-05-00518, 14-05-00639), Министерства образования и науки (грант 14.В25.31.0026), Программ РАН и гранта Президента РФ НШ-3894.2014.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trenberth K.E., Jones P.D., Ambenje P. et al.* Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. Climate Change 2007: The Physical Science Basis / Eds. S. Solomon et al. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – P. 235 – 336.
2. *Delworth T.L., Mann M.E.* Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere // *Clim. Dyn.* – 2000. – 16. – P. 661 – 676.
3. *Delworth T.L., Knutson T.R.* Simulation of early 20th century global warming // *Science.* – 2000. – 287. – P. 2246 – 2250.
4. *Полонский А.Б.* Глобальное потепление, крупномасштабные процессы в системе океан – атмосфера, термохалинная катастрофа и их влияние на климат Атлантико-Европейского региона. Современные проблемы океанологии. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – Вып. 5. – 44 с.
5. *Полонский А.Б.* Роль океана в изменениях климата. – Киев: Наук. думка, 2008. – 184 с.
6. *Семенов В.А.* Долгопериодные климатические колебания в Арктике и их связь с глобальными изменениями климата // Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – М.: Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 2010. – 268 с.
7. *Мохов И.И., Смирнов Д.А., Карпенко А.А.* Оценки связи изменений глобальной приповерхностной температуры с разными естественными и антропогенными факторами на основе данных наблюдений // Докл. РАН. – 2012. – 443, № 2. – С. 225 – 231.
8. *Otterå O.H., Bentsen M., Drange H. et al.* External forcing as a metronome for Atlantic multidecadal variability // *Nature Geosci.* – 2010. – 3. – P. 688 – 694. – doi:10.1038/NGEO0955.
9. *Booth B.B., Dunstone N.J., Halloran P.R. et al.* Aerosols implicated as a prime driver of twentieth-century North Atlantic climate variability // *Nature.* – 2012. – 484. – P. 228 – 232. – doi:10.1038/nature10946.
10. *Meehl G.A., Covey C., Delworth T. et al.* The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research // *Bull. Amer. Met. Soc.* – 2007. – 88. – P. 1383 – 1394.
11. *Hansen J., Ruedy R., Glascoe J. et al.* GISS analysis of surface temperature change // *J. Geophys. Res.* – 1999. – 104, D24. – P. 30997 – 31022.
12. *Lupo A.R., Oglesby R.J., Mokhov I.I.* Climatological features of blocking anticyclones: a study of Northern Hemisphere CCM1 model blocking events in present-day and double CO₂ concentration atmospheres // *Clim. Dyn.* – 1997. – 13. – P. 181 – 195.
13. *Мохов И.И.* Действие как интегральная характеристика климатических структур: оценки для атмосферных блокингов // Докл. РАН. – 2006. – 409, № 3. – С. 403 – 406.
14. *Petoukhov V., Semenov V.A.* A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // *J. Geophys. Res.: Atmos.* – 2010. – 115, D21111. – doi:10.1029/2009JD013568.
15. *Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М.* Влияние температуры поверхности океана и границ морского льда на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2012. – 48, № 4. – С. 403 – 421.

16. *Graversen R.G., Mauritsen T., Tjernström M. et al.* Vertical structure of recent Arctic warming // *Nature*. – 2008. – 541. – P. 53 – 56. – doi:10.1038/nature06502.
17. *Schlichtholz P.* Influence of oceanic heat variability on sea ice anomalies in the Nordic Seas // *Geophys. Res. Lett.* – 2011. – 38, L05705. – doi:10.1029/2010GL045894.
18. *Семенов В.А.* Структура изменчивости температуры в высоких широтах Северного полушария // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2007. – 43, № 6. – С. 744 – 753.
19. *Мохов И.И., Семенов В.А., Елисеев А.В. и др.* Изменения климата и их последствия в высоких широтах: диагностика и моделирование // *Метеорологические и геофизические исследования* / Под ред. Г.В. Алексеева. – М. – СПб.: ООО «Паулсен», 2011. – С. 94 – 129.
20. *Semenov V.A., Latif M.* The early twentieth century warming and winter Arctic sea ice // *Cryosphere*. – 2012. – 6. – P. 1231 – 1237. – doi:10.5194/tc-6-1-2012.
21. *Mann M.E., Park J.* Global-scale modes of surface temperature variability on interannual to century timescales // *J. Geophys. Res.* – 1994. – 99. – P. 25 819 – 25 833.
22. *Schlesinger M.E., Ramankutty N.* An oscillation in the global climate system of period 65 – 70 years // *Nature*. – 1994. – 367. – P. 723 – 726.
23. *Kravtsov S., Spannagle C.* Multidecadal climate variability in observed and modeled surface temperatures // *J. Clim.* – 2008. – 21. – P. 1104 – 1121.
24. *Ting M.F., Kushnir Y., Seager R. et al.* Forced and internal twentieth-century SST trends in the North Atlantic // *J. Clim.* – 2009. – 22. – P. 1469 – 1481.
25. *Zhang R., Delworth T.L., Held I.M.* Can the Atlantic Ocean drive the observed multidecadal variability in Northern Hemisphere mean temperature? // *Geophys. Res. Lett.* – 2007. – 34, L02709. – doi:10.1029/2006GL028683.
26. *Воскресенская Е.Н., Полонский А.Б.* Низкочастотная изменчивость гидрометеорологических полей и потоков тепла в Северной Атлантике // *Морской гидрофизический журнал*. – 2004. – № 4. – С.19 – 38.
27. *Semenov V.A., Latif M., Dommenges D. et al.* The impact of North Atlantic-Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature // *J. Clim.* – 2010. – 23. – P. 5668 – 5677.
28. *Семенов В.А.* Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // *Докл. РАН*. – 2008. – 418, № 1. – С. 106 – 109.
29. *Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B. et al.* Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geophys. Res.* – 2003. – 108, D14, 4407. – doi: 10.1029/2002JD002670.
30. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* – 1996. – 77. – P. 437 – 470.
31. *Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O.M.* The early-twentieth-century warming in the Arctic – A possible mechanism // *J. Clim.* – 2004. – 17. – P. 4045 – 4057.
32. *Semenov V.A., Park W., Latif M.* Barents Sea inflow shutdown: A new mechanism for rapid climate changes // *Geophys. Res. Lett.* – 2009. – 36, L14709. – doi: 10.1029/2009GL038911.
33. *Walsh J.E., Johnson C.M.* Analysis of Arctic sea ice fluctuations 1953 – 1977 // *J. Phys. Oceanogr.* – 1978. – 9. – P. 580 – 591.
34. *Алексеев Г.В., Данилов А.И., Катцов В.М. и др.* Изменения площади морских льдов Северного полушария в XX и XXI веках по данным наблюдений и моделирования // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2009. – 45, № 6. – С. 723 – 735.
35. *Полонский А.Б., Крашенинникова С.Б.* Пространственно-временная изменчивость меридиональных переносов тепла в Северной Атлантике // *Морской гидрофизический журнал*. – 2010. – № 6. – С. 24 – 41.
36. *Boning C.W., Scheinert M., Dengg J. et al.* Decadal variability of subpolar gyre transport and its reverberation in the North Atlantic overturning // *Geophys. Res. Lett.* – 2006. – 33. – doi: 10.1029/2006gl026906.

37. *Lenton T.M., Held H., Krieger E. et al.* Tipping elements in the Earth's climate system // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. – 2008. – 105(6). – P. 1786 – 1793.
38. *Lindsay R.W., Zhang J.* Thinning Arctic Sea ice: Have we passed a tipping point? // Bull. Amer. Met. Soc. – 2005. – 86(3). – P. 325 – 326.

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
Москва
E-mail: vasesmenov@mail.ru

Материал поступил
в редакцию 03.07.13
После доработки 05.09.13

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Москва

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

⁴Московский физико-технический институт

⁵Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: apolonsky5@mail.ru

АНОТАЦІЯ Представлені результати моделювання впливу природної мінливості в системі океан – атмосфера в Північній Атлантиці та Арктиці на глобальний клімат. Аналізувалися результати чисельних експериментів зі спільною моделлю загальної циркуляції атмосфери та верхнього перемішаного шару океану з використанням аномальних величин потоків тепла з океану в атмосферу. Згідно отриманим результатам, власною довгоперіодною мінливістю в Північній Атлантиці та атлантичному секторі Арктики можна пояснити близько половини величини зростання приповерхневої температури Північної півкулі в останній третині ХХ ст. Відмічено, що важливий внесок при цьому роблять аномальні потоки тепла в Арктиці, які звичайно не враховуються при моделюванні ефекту довгоперіодних коливань в Північній Атлантиці. Результати чисельних експериментів підтверджують висновок про значущу роль природної мінливості в Північній Атлантиці та Арктиці у формуванні не тільки регіональних, але й глобальних змін клімату. Саме із недостатнім урахуванням відмічених ефектів може бути пов'язана істотна переоцінка чутливості деяких глобальних кліматичних моделей до збільшення концентрації парникових газів у атмосфері.

Ключові слова: природні та антропогенні зміни клімату, Атлантичне довгоперіодне коливання (Атлантична мультидекадна осциляція).

ABSTRACT Results of simulations of impact of natural variability of the coupled ocean-atmosphere system in the North Atlantic and Arctic on global climate are represented. Numerical experiments based on the joint model of atmospheric global circulation and the oceanic upper mixed layer are analyzed using anomalous heat fluxes on the ocean-atmosphere boundary. In accordance with the obtained results, about a half of air temperature increase in the Northern Hemisphere in the last third of the XX century can be explained by proper low-frequency variability in the North Atlantic and the Atlantic sector of the Arctic. It is noted that contribution of anomalous heat fluxes in the Arctic which usually are not taken into consideration in modeling the effect of long-period oscillations in the North Atlantic, are important. Results of numerical simulations confirm the conclusion on significant role of natural variability in the North Atlantic and Arctic in formation of not only regional climate changes but also global ones. Just underestimation of the discussed effects can be a reason of significant overestimation of sensitivity of some global climatic models to increase of concentration of green-house gases in the atmosphere.

Keywords: natural and anthropogenic climate changes, Atlantic long-period oscillation (Atlantic multidecadal oscillation).