

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.581.1

## Роль Атлантического долгопериодного колебания в формировании сезонных аномалий температуры воздуха в Северном полушарии по модельным расчетам

В.А. Семёнов<sup>1,2,3</sup>, Е.А. Шелехова<sup>3,4</sup>, И.И. Мохов<sup>1</sup>,  
В.В. Зуев<sup>4</sup>, К.П. Колтерманн<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3, Россия

<sup>2</sup>Центр морских исследований Гельмгольца города Киль (GEOMAR)  
Дюстерброкер Вег 20, 24105, Киль, Германия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, Россия

<sup>4</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634055, г. Томск, пр-т Академический, 10/3, Россия

Поступила в редакцию 5.11.2013 г.

Атлантическое долгопериодное колебание (АДК), связанное с изменением океанического переноса тепла в Северной Атлантике и Атлантическом секторе Арктики, оказывает значительное влияние на климат Северного полушария (СП). С 1970-х по начало 2000-х гг. наблюдался рост индекса АДК, совпадающий с трендом глобального потепления. Для оценки вклада АДК в сезонные изменения температуры в СП проанализированы численные эксперименты с совместной моделью общей циркуляции атмосферы ECHAM5 и термодинамической моделью верхнего перемешанного слоя океана с использованием аномальных потоков океанической конвергенции тепла, связанных с АДК. При этом исследовался относительный вклад аномальных потоков тепла в Атлантике и в Арктике. Показано, что АДК может объяснить около 40% наблюдаемых температурных изменений в последние 30 лет в зимний и летний сезоны. Вертикальная структура температурных изменений, связанных с АДК, также имеет много общего с эмпирическими оценками, в частности воспроизводит арктическое усиление с максимальными трендами у поверхности в высоких широтах СП. АДК в модели приводит к увеличению вероятности формирования аномально холодных температурных режимов в феврале на территории России, несмотря на рост средней температуры для февраля. Также отмечено увеличение вероятности формирования аномально жарких июлей, в том числе на европейской территории России. Показано, что важный вклад в сезонные изменения вносят аномальные потоки тепла в Арктике, которые обычно не учитываются при моделировании эффекта долгопериодных колебаний в Северной Атлантике. Полученные результаты указывают на важную роль АДК в формировании погодно-климатических аномалий.

*Ключевые слова:* Атлантическое долгопериодное колебание, аномальные погодно-климатические режимы, климатические модели; Atlantic Multidecadal Variability, anomalous climatic regimes, climate models.

### Введение

Во внетропической части Северного Атлантического океана наблюдаются значительные долгопериодные колебания температуры поверхности океана (ТПО) [1]. Синхронно с этими колебаниями проявляются отклонения глобальной приповерхностной температуры от векового тренда потепления, которые предположительно являются следствием естественной

климатической изменчивости [2]. Такие колебания получили название Атлантическое долгопериодное колебание (АДК) [1]. Характерный период АДК составляет 60–70 лет [1, 3]. В период инструментальных температурных наблюдений можно выделить положительные (1940–50-е гг. и конец 1990-х гг. по настоящее время) и отрицательные (1900–1920 и 1970–1980 гг.) фазы АДК. С 1970-х по начало 2000-х гг. наблюдался положительный тренд АДК, совпадающий с трендом глобального потепления (рис. 1). АДК связано с изменениями меридионального океанического круговорота в Северной Атлантике и соответствующими изменениями океанического переноса тепла из низких в высокие широты [4].

\* Владимир Анатольевич Семёнов (vasemenov@mail.ru);  
Евгения Александровна Шелехова (sea1125@mail.ru); Игорь  
Иванович Мохов (mokhov@ifaran.ru); Владимир Владимирович  
Зуев (vvzuev@imces.ru); Клаус Питер Колтерманн.

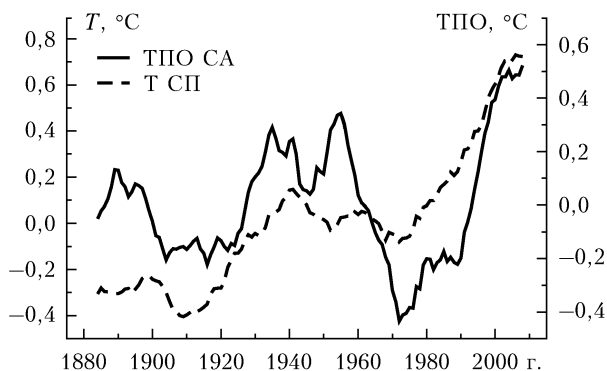


Рис. 1. Среднегодовые аномалии температуры поверхности океана в Северной Атлантике (ТПО, °C, осредненные для региона 50–10° з.д., 40–60° с.ш., ось справа), используемые как индекс АДК, и аномалии приповерхностной температуры атмосферы в СП ( $T$ , °C, ось слева)

Атлантическое долгопериодное колебание оказывает значительное влияние на региональные климатические изменения над континентами Северного полушария (СП), в том числе в России. С АДК связаны изменения температуры, осадков, давления, формирование аномальных температурных режимов, изменения площади арктического ледяного покрова, а также формирование и развитие североатлантических циклонов [5–11]. Фактор АДК необходимо учитывать при прогнозировании погодно-климатических условий над континентами СП.

В работах [6, 11–14] исследовалось воздействие АДК на климат континентов СП с использованием моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА), а также совместных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). В оценках воздействия АДК на климат остаются значительные неопределенности. Результаты экспериментов с МОЦА с заданной аномалией ТПО в Северной Атлантике (характерной для АДК) выявили статистически значимые изменения температуры в Северной Америке и Европе в летний период [14] и связь между АДК и климатом Евразии зимой [11].

Анализ пространственно-временной структуры аномальных турбулентных потоков тепла на нижней границе атмосферы, связанных с экстремумами АДК в XX в., показал, что помимо аномальных потоков в Северной Атлантике АДК сопровождается аномальными значениями потоков в Атлантическом секторе Арктики, наиболее значительными в зимний период [11]. Эти аномалии главным образом связаны с изменениями границ морского льда, вызванными вариациями океанического притока тепла. Отдельные современные климатические модели способны воспроизводить влияние АДК на океанический приток тепла в Баренцево море и соответствующие изменения распространения морских льдов и температуры воздуха [9].

Учет аномальных потоков тепла из океана в атмосферу, связанных с АДК в Арктике, привел к новым оценкам вклада АДК в изменения климата в последние 30 лет [11]. Эти оценки примерно в 2 раза превышают полученные ранее результаты и составляют около половины наблюдаемых температурных

изменений в период перехода АДК от отрицательной к положительной фазе (1978–2007). В [11] анализировались изменения среднегодовой температуры, полученные по результатам численных экспериментов с МОЦА ЕСНАМ5 и термодинамической моделью верхнего перемешанного слоя океана. Поскольку вызванные АДК аномальные потоки тепла имеют ярко выраженный годовой ход, важным является исследование температурного отклика в различные сезоны. Наблюдаемые температурные тренды, в частности над Европой, также имеют существенные сезонные отличия [15]. В настоящей статье рассматриваются зимние и летние изменения приповерхностной температуры атмосферы (ПТА), включая изменения вертикальной структуры температурного отклика, а также аномальные температурные режимы для различных месяцев по результатам численных экспериментов, представленных в [11]. Целью анализа является количественная оценка вклада АДК в отмеченные изменения температуры.

## 1. Описание модели и численных экспериментов

Для исследования отклика глобальной климатической системы на аномальные потоки тепла, связанные с АДК, анализировались эксперименты с совместной моделью МОЦА ЕСНАМ5 и термодинамической моделью верхнего перемешанного (50 м) слоя океана [16]. Модель ЕСНАМ5 является климатической версией спектральной модели прогноза погоды Европейского центра среднесрочного прогноза погоды (ECMWF). Используемая для экспериментов модель имеет спектральное горизонтальное разрешение T31 (примерно  $3,75^\circ \times 3,75^\circ$  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 [11, 17, 18].

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 1971–2000 гг. Для моделирования эффекта АДК использовались дополнительные (аномальные) потоки океанической конвергенции тепла, связанные с АДК. Оценки таких потоков были получены с помощью контрольного численного эксперимента с совместной моделью общей циркуляции атмосферы, океана и морского льда ЕСНАМ5/МР1-ОМ, которая реалистично воспроизводит АДК [4]. Подробно выбор аномальных потоков, связанных с АДК, и постановка экспериментов обсуждаются

в работе [11], где дан анализ изменения средней температуры.

Для исследования влияния аномальных потоков океанической конвергенции тепла, связанных с долгопериодными колебаниями климата в Северной Атлантике (к северу от 40° с.ш.) и в Атлантическом секторе Арктики, были проведены: 1) контрольный эксперимент CNTRL, в котором конвергенция океанического потока тепла ( $Q$ -поток) была задана по данным эксперимента с МОЦА ЕСНАМ5 с использованием стандартных (соответствующих современному климату) климатологических данных по ТПО и морскому льду АМIP-II [19]; 2) эксперимент ATLICE с дополнительным потоком тепла, который связан с АДК (добавленным к  $Q$ -потoku, использовавшемуся в контрольном эксперименте) в секторе 70° з.д. – 80° в.д., 40° с.ш. – 90° с.ш.; 3) эксперимент 2xATLICE с удвоенным потоком тепла, который использовался в эксперименте ATLICE; 4) эксперимент ATL с дополнительным потоком тепла только в Атлантике (сектор 70° з.д. – 80° в.д., 40° с.ш. – 60° с.ш.); 5) эксперимент ICE с дополнительным потоком тепла только в Арктике (сектор 70° з.д. – 80° в.д., 60° с.ш. – 90° с.ш.). Аномальные среднегодовые потоки турбулентного тепла с поверхности океана, соответствующие разности между высокой и низкой фазами АДК, получены по данным контрольного эксперимента D16 с МОЦАО ЕСНАМ5/МРI-ОМ как разность между 30-летними периодами высокой и низкой фазы АДК.

Пространственная структура аномальных среднесезонных потоков, которые использовались в экспериментах ATLICE, ATL и ICE, приведена на рис. 2, *a*, *б* соответственно для зимы и лета, потоки для эксперимента 2xATLICE – это удвоенные значения потоков ATLICE. Как видно из рис. 2, *a*, *б*, зимой аномальные потоки тепла во всех экспериментах значительно превышают соответствующие значения потоков летом. При этом зимой значения потоков в Арктике больше, чем в Североатлантическом секторе, а летом – наоборот. Суммарный годовой вклад аномальных потоков тепла составляет 0,09 ПВт для эксперимента ATLICE, для ATL и ICE соответственно 0,048 и 0,042 ПВт. На рис. 2, *в* показан сезонный ход аномальных потоков в ПВт. Несмотря на то что годовой вклад потоков тепла из океана в атмосферу в Северной Атлантике сравним со значениями в Арктике, их сезонный ход значительно отличается друг от друга. Значения аномалий в Северной Атлантике слабо меняются в течение года. В Арктике зимние аномалии превышают летние почти в 8 раз.

Длительность каждого численного эксперимента составляла 100 модельных лет. Для перемешанного слоя океана глубиной 50 м время отклика глобального климата (время достижения равновесного состояния) на аномальные потоки тепла составляет примерно 10 лет. Далее обсуждаются результаты последних 80 лет численных экспериментов [11]. Модельные результаты для ПТА сравниваются с данными наблюдений GISS [20]. Для эмпирических оценок вертикальной структуры температурных изменений ис-

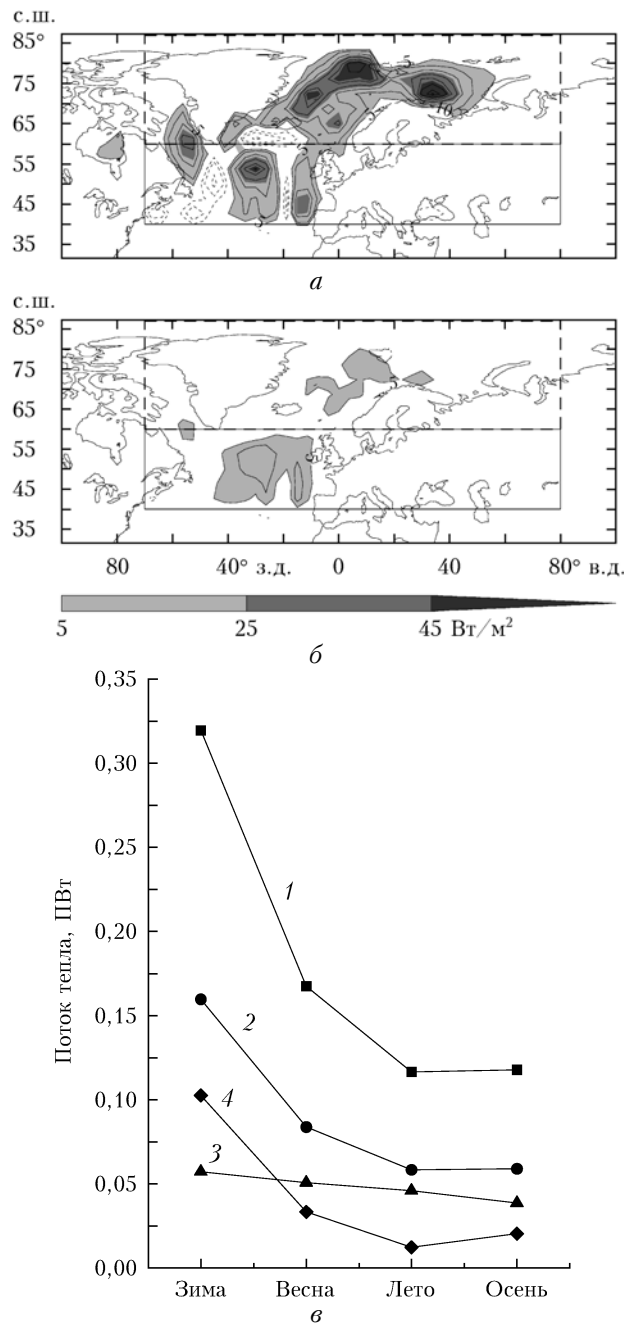


Рис. 2. Аномальные среднесезонные потоки турбулентного тепла в модели ( $Wt/m^2$ ) для эксперимента ATLICE: *a* – зима, *б* – лето. Прямоугольниками показаны регионы, где задавались аномальные потоки тепла для экспериментов ATL (сплошная линия), ICE (штриховая). Сплошным контуром показаны положительные значения потоков, пунктиром – отрицательные значения через 10  $Wt/m^2$ ; дополнительно проведены контуры  $\pm 5 Wt/m^2$ ; *в* – сезонный ход аномальных потоков тепла (ПВт) для 2xATLICE (1), ATLICE (2), ATL (3), ICE (4)

пользовались данные реанализа NCEP/NCAR [21]. Для сравнения с модельными результатами использовался 30-летний тренд в период 1978–2007 гг., соответствующий переходу АДК от отрицательной к положительной фазе в соответствии с постановкой модельных экспериментов.

## 2. Результаты численных экспериментов.

### Сезонные изменения температуры

На рис. 3, *а, б* показаны среднесезонные тренды ПТА для зимы и лета периода 1978–2007 гг. по данным наблюдений GISS [20]. Максимальное потепление приходится на высокие широты СП, рост температуры по полушарию в среднем составляет 0,67 °С зимой и 0,59 °С летом (см. таблицу).

Для зимнего периода (см. рис. 3, *а*) максимальный рост температур достигает 4 °С в северо-евро-

пейской части России, в Скандинавии, восточной и центральной частях Северной Америки. Для региона европейской территории России (ЕТР) (27–42° в.д., 50–60° с.ш.) потепление составило 1,69 °С, а для выбранного региона в Западной Сибири (ЗС) (77–92° в.д., 50–60° с.ш.) – 0,82 °С. Летом максимальный рост температуры (до 3 °С) наблюдается в Европе, особенно в юго-восточной части.

Изменения ПТА в модельных экспериментах представлены на рис. 3, *в–к*. Статистическая значимость (не показана) изменений ПТА (уровня 0,05), как правило, соответствует изменениям температуры, превышающим 0,5 °С. Аномальные потоки тепла приводят

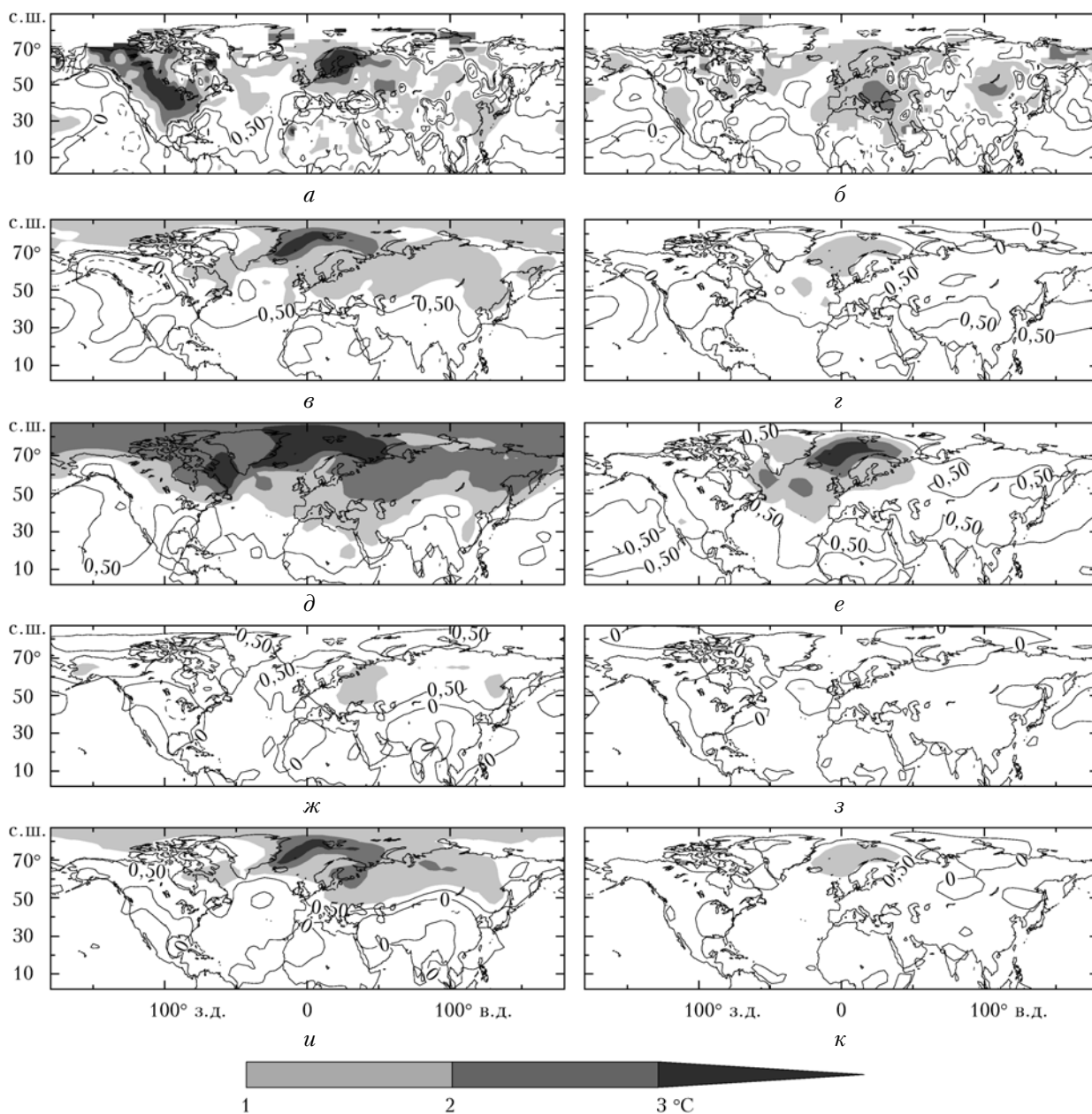


Рис. 3. Температурный тренд в период 1978–2007 гг. для зимы (*а*) и лета (*б*). Среднесезонные значения ПТА (°С) для зимы (*в, д, ж, и*) и лета (*г, е, з, к*) для разности экспериментов ATLICE и CNTRL (*в, д*), 2xATLICE и CNTRL (*д, е*), ATL и CNTRL (*ж, з*), ICE и CNTRL (*и, к*). Дополнительно проведены контуры  $\pm 0,5$  °С и 0 °С. Сплошная линия – положительные, пунктир – отрицательные значения

**Среднесезонный температурный тренд  
по данным реанализа и изменения среднесезонной ПТА  
в модельных экспериментах (относительно контрольного)  
для СП и для регионов ЕТР (27–42° в.д., 50–60° с.ш.)  
и в ЗС (77–92° в.д., 50–60° с.ш.)**

Эксперимент	Время года	СП	ЕТР	ЗС
Данные наблюдений GISS	лето	0,59	0,812	0,490
	зима	0,67	1,675	0,819
ATLICE–CNTRL	лето	0,31	0,510	0,080
	зима	0,46	1,070	1,040
2xATLICE–CNTRL	лето	0,50	1,000	0,250
	зима	0,88	2,270	1,690
ATL–CNTRL	лето	0,12	0,270	0,090
	зима	0,21	1,220	0,600
ICE–CNTRL	лето	0,17	0,410	–0,110
	зима	0,32	1,850	0,710

к значительному потеплению над Северным полушарием. Особенно сильное потепление вместе с Северной Атлантикой и Арктикой происходит в северных регионах континентов в зимний период. В эксперименте ATLICE наблюдается потепление (более 1 °C) в области севернее 30° с.ш. Двукратное увеличение потока тепла в эксперименте 2xATLICE приводит к схожей общей пространственной структуре изменений с приблизительно двукратным увеличением амплитуды отклика (см. рис. 3, а, б) для зимы и лета (см. также таблицу). Отдельно вклад потоков турбулентного тепла в Атлантике и в Арктике можно оценить из результатов экспериментов ATL и ICE (рис. 3, в и г соответственно). Видно, что вклад потоков турбулентного тепла (ПТТ) в Арктике в потепление над континентами СП больше, чем вклад ПТТ только в Атлантике. Суммарное изменение ПТА в СП и в выбранном регионе на ЕТР больше в Арктике зимой и летом, но меньше (–0,11 °C), чем в Атлантике летом для выбранного региона в ЗС. Именно потоки тепла в Арктическом регионе приводят к значительному потеплению в Северной Америке, Северной Европе и ЗС, 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 Арктике приблизительно одинаков.

Сравнение модельных результатов с данными наблюдений указывает на существенный вклад АДК в наблюдаемые тренды температуры в Атлантическом секторе и над Евразией. Следует также отметить потепление в Тихом океане (см. рис. 3, а, б), воспроизведенное моделью в эксперименте ATLICE (см. рис. 3, в, г). В то же время отмечаются и значительные расхождения, объясняющиеся тем, что изменения температуры в модели связаны исключительно с АДК, в то время как температурные изменения в последние десятилетия вызваны в том числе антропогенным воздействием и другими долгопериодными модами климатической изменчивости, например Тихоокеанским декадным колебанием.

### 3. Зональные изменения вертикальных полей температуры

На рис. 4, а, б показана вертикальная структура среднесезонного тренда температуры для зимы и лета в период 1978–2007 гг. по данным реанализа NCEP/NCAR [21].

Температурный тренд зимой (см. рис. 4, а) характеризуется более высокими значениями в нижней тропосфере высоких широт СП с максимумом у поверхности, достигающим 3 °C. Также отмечается сильное потепление в верхней тропосфере и стратосфере севернее 70° с.ш. В средних и низких широтах наблюдается отрицательный тренд среднесезонной температуры. Летом происходит похолодание в верхних слоях атмосферы (выше 200 гПа). Температурные изменения в нижней тропосфере характеризуются ограниченной областью положительного тренда с максимумом вблизи 70° с.ш., распространяющимся до высоты 700 гПа.

Отмеченные особенности температурных трендов зимой связаны с так называемым арктическим усилением глобальных температурных изменений [22, 23]. Механизм арктического усиления до конца не определен. Одной из гипотез является усиление переноса тепла атмосферой, что, как показано в работе [22], приводит к максимальным трендам в свободной тропосфере. Против этой гипотезы говорит анализ, проведенный другими авторами [23], обнаружившими максимальные тренды у поверхности и предположившими их связь с уменьшением площади арктического ледяного покрова. Представленные на рис. 4, а, б тренды по данным реанализа согласуются с результатами [23]. Аномальные потоки тепла в модельных экспериментах приводят в целом к схожей с эмпирической картине температурных изменений. В эксперименте ATLICE зимой также отмечается максимум потепления в высоких широтах СП. Величина температурных изменений примерно в 2–2,5 раза меньше, чем тренд по данным реанализа (рис. 4, в). Летом, как и в эмпирических данных, отмечается область потепления вблизи 70° с.ш. При этом в модели также наблюдается усиление потепления в низких широтах практически во всей толще тропосферы, которое отсутствует в трендах по данным реанализа (рис. 4, г). Отсутствие отрицательных изменений температуры в верхней тропосфере и стратосфере в модели объясняется постоянными значениями концентрации парниковых газов в модельных экспериментах, увеличение концентрации которых и приводит к наблюдаемому выхолаживанию стратосферы при глобальном потеплении. Изменения температуры в эксперименте 2xATLICE в целом имеют схожую структуру с примерно удвоенной амплитудой отклика (рис. 4, д, е). Сравнение результатов экспериментов ATL и ICE (рис. 4, ж, з, и, к соответственно) позволяет оценить вклад аномальных потоков исключительно в Атлантике и в Арктике. Видно, что более значимую роль в формировании температурного отклика в эксперименте ATLICE играют потоки в Арктике.

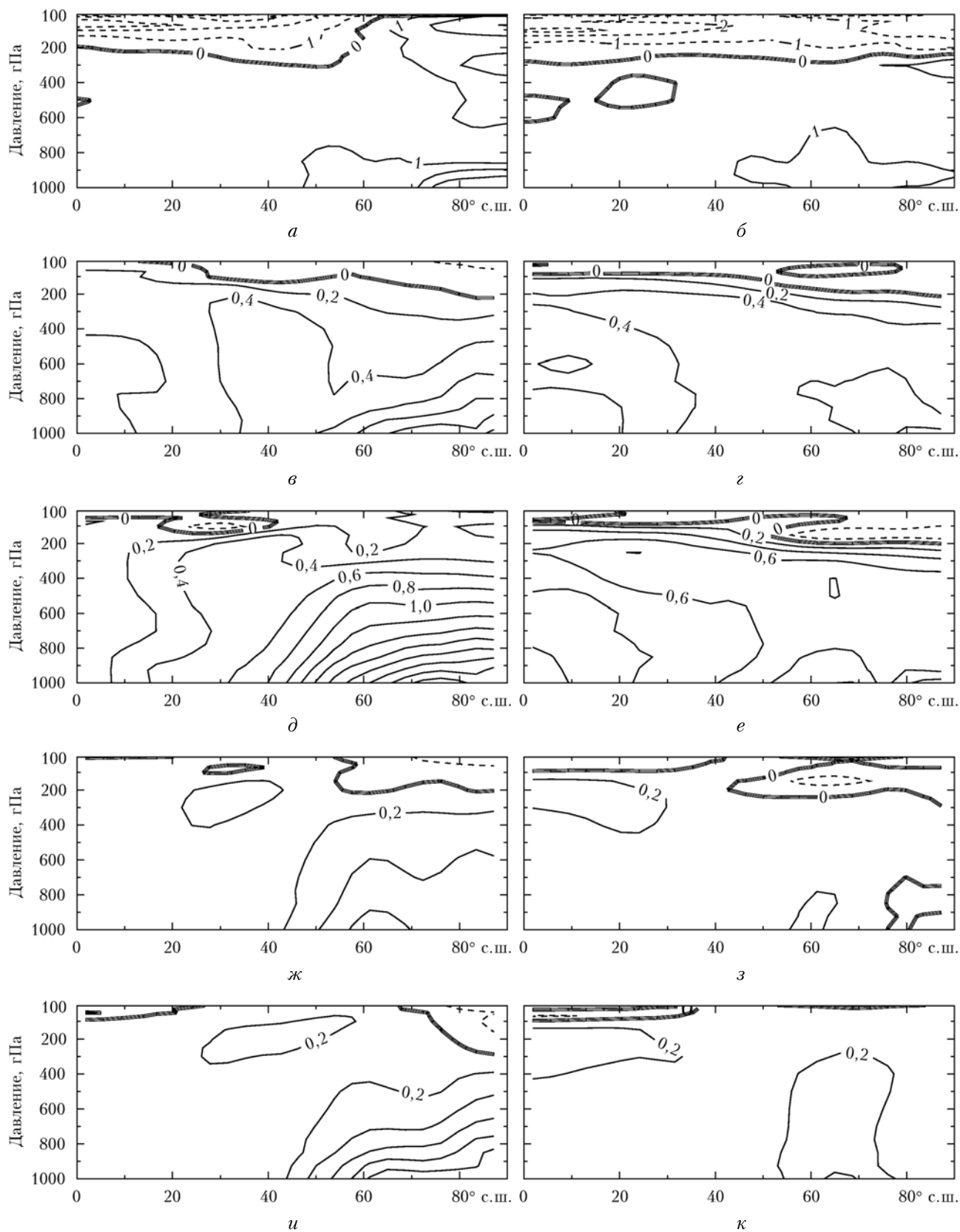


Рис. 4. Среднезональные значения тренда температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) с 1978–2007 гг. для зимы (а) и лета (б). Контуры проведены через  $1^{\circ}\text{C}$ . Среднезональные значения температуры воздуха для зимы (в, д, ж, и) и лета (г, е, з, к) для разности экспериментов ATLICE и CNTRL (в, г), 2xATLICE и CNTRL (д, е), ATL и CNTRL (ж, з), ICE и CNTRL (и, к). Контуры проведены через  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Сплошная линия – положительные, пунктир – отрицательные значения

#### 4. Аномальные температурные режимы

Помимо средних значений может меняться и функция распределения вероятности температурных аномалий. Это может приводить к формированию аномальных температурных режимов даже при отсутствии изменений средних значений. Начало XXI в., совпавшее с положительной фазой АДК, сопровождалось рядом погодных аномалий в различных регионах планеты. В том числе было отмечено увеличение вероятности формирования продолжительных аномально холодных режимов в зимний период. В последнее десятилетие также наблюдались волны жары очень большой амплитуды, например в Западной Европе в 2003 г. и на европейской территории России в 2010 г. В ряде работ указывалось на возможную связь таких событий с различными факторами естественной климатической изменчивости и антропогенными изменениями климата (см., например, [24–27]).

Рассмотрим изменения вероятностей появления аномальных температурных режимов для февраля и июля в различных экспериментах. Выбор таких месяцев связан с аномально высокими температурами на европейской территории России в июле 2010 г. [25]

и аномальными морозами в феврале 2006 и 2012 гг. [26, 28, 29]. Анализировались изменения (относительно контрольного эксперимента) вероятностей событий, когда ПТВ в феврале ниже  $-1,5$  стандартного отклонения и выше  $1,5$  стандартного отклонения в июле, что соответствует примерно 3,4 и 96,6% квантилям нормального распределения.

На рис. 5 приведены изменения вероятностей (только для континентов) формирования аномально низких температур в феврале (рис. 5, *a, в, д*) и аномально высоких температур в июле (рис. 5, *б, г, е*) для экспериментов ATLICE, ATL и ICE. Аномальный поток тепла в эксперименте ATLICE приводит к увеличению в 2–3 раза вероятности появления аномально низких температур в регионах европейской территории России, Западной Сибири, Дальнего Востока и Средней Азии. Увеличение вероятности аномально холодного февраля происходит несмотря на повышение средней температуры на  $0,5–1$  °C на европейской территории России и до  $0,5$  °C в Западной Сибири. Сравнение экспериментов ATL и ICE (см. рис. 5, *в* и *д* соответственно) показало, что основное влияние на возникновение аномально низких температур в Евразии оказывает появление аномальных потоков в Арктике, что согласуется с результатами работ [10, 26, 29].

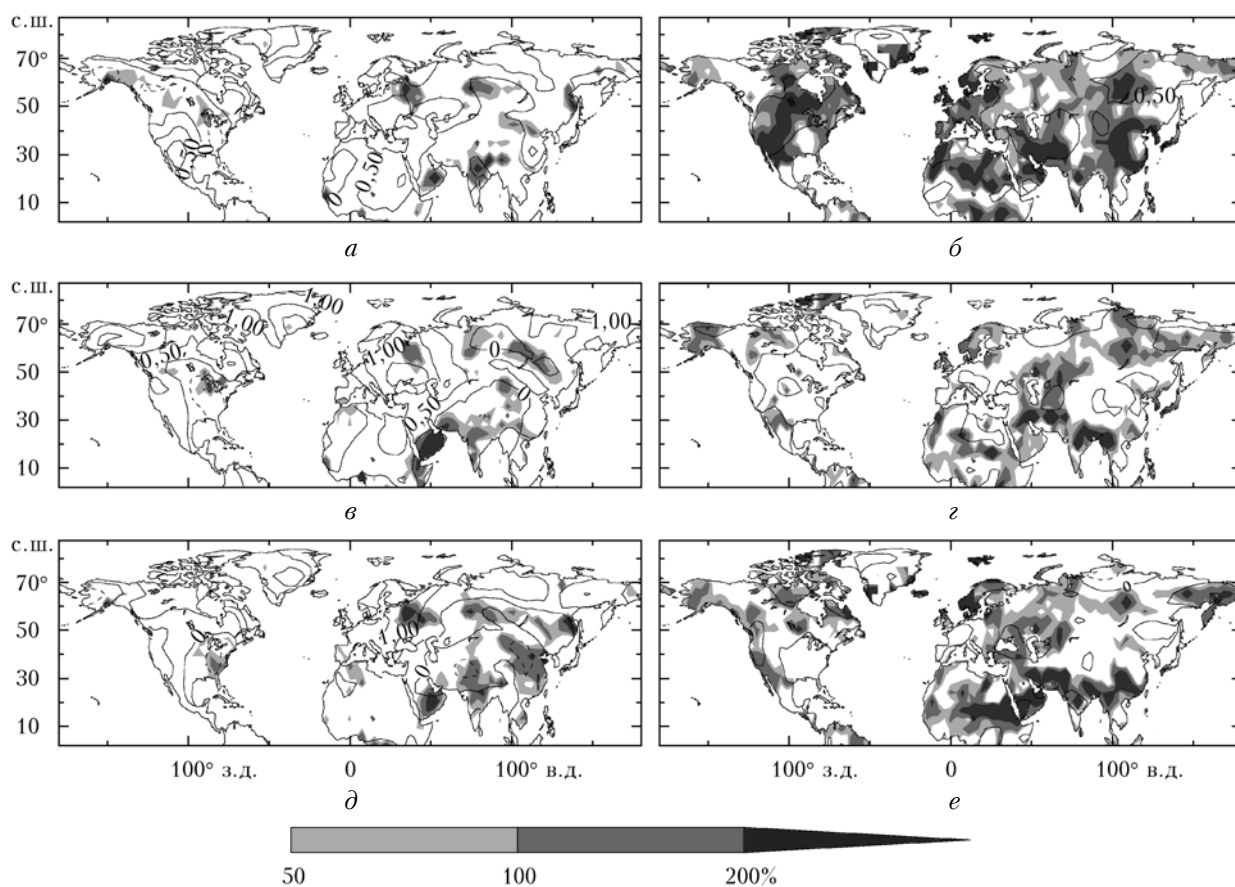


Рис. 5. Карты изменений вероятностей среднемесячных температурных аномалий (%), меньших  $-1,5\sigma$  для февраля (*a, в, д*) и больших  $1,5\sigma$  для июля (*б, г, е*), в экспериментах ATLICE (*a, б*), ATL (*в, г*), ICE (*д, е*) относительно CNTRL. Контурными (через  $0,5$  °C) показаны среднемесячные температуры для февраля и июля соответственно

Появление аномально высоких температур наблюдается на всей территории Евразии (см. рис. 5, б, г, д). Увеличение вероятности (более чем в 4 раза) появления аномально высоких температур наблюдается в Европе, европейской части России, Восточной Сибири, Средней Азии и в центральной части Северной Америки (см. рис. 5, б). Из сравнения результатов экспериментов АТЛ и ИСЕ (см. рис. 5, г и е соответственно) следует, что аномальные потоки и в Атлантике, и в Арктике оказывают почти одинаковое влияние на возникновение аномально высокой температуры в июле.

Таким образом, воздействие аномальных потоков турбулентного тепла приводит к увеличению вероятности аномально высокой температуры летом над Евразией. Для всех экспериментов отмечается увеличение вероятностей низких температурных аномалий в феврале в некоторых регионах Евразии, хотя в целом для зимнего сезона, и февраля в частности, отмечено увеличение средней температуры. Это говорит о том, что АДК приводит к изменению функции плотности распределения вероятностей температурных аномалий в анализируемые месяцы, что могло способствовать формированию наблюдавшихся аномальных температурных режимов в последнее десятилетие.

### Заключение

В настоящей статье исследовались результаты численных экспериментов с совместной моделью МОЦА ЕСНАМ5 и моделью верхнего перемешанного слоя океана. Анализировался отклик температуры воздуха в Северном полушарии на аномальные потоки тепла в Северной Атлантике и в Атлантическом секторе Арктики, связанные с Атлантическим долгопериодным колебанием. Результаты модельных экспериментов показывают, что АДК может приводить к приповерхностному потеплению зимой более чем на 1 °С практически на всей территории России. Наиболее сильное потепление наблюдается в северо-западной части Евразии и связано с аномальными потоками тепла в Арктике. Летом АДК в модели приводит к потеплению до 0,5 °С в западной части Евразии. Изменения температуры зимой в модели характеризуются большей статистической значимостью, чем летом. Модель воспроизводит в целом линейный отклик температуры на удвоение амплитуды аномальных потоков. Аномальные потоки тепла в модельных экспериментах приводят в целом к схожей эмпирической картине зонально-вертикальных изменений температуры. Также исследовались изменения вероятностей аномальных температурных режимов для февраля и июля. Показано, что аномальные потоки тепла могут приводить к увеличению более чем в 2 раза вероятности формирования аномально низких температур в феврале и аномально высоких температур в июле в регионах на территории Евразии. Полученные результаты указывают на важную роль АДК в современных изменениях климата и погоды.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 14-05-00518-а, 13-05-90755-мол\_нр\_рф, 13-05-

41443 РГО\_а, 12-05-91057-ИЦНИ\_а, 11-05-01139-а), программ Президиума РАН № 4 и 31, Российской академии наук (ГК № 74-ОК/11-4), проектов Министерства науки и образования (соглашение № 8833, ГК 14.В25.31.0026), гранта № 11.Г34.31.0007 и гранта Президента РФ ИШ-5467.2012.5.

1. *Schlesinger M.E., Ramankutty N.* An oscillation in the global climate system of period 65–70 years // *Nature (Gr. Brit.)*. 1994. V. 367, iss. 6465. P. 723–726.
2. *Delworth T.L., Mann M.E.* Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere // *Clim. Dyn.* 2000. V. 16, iss. 9. P. 661–676.
3. *Mann M.E., Park J.* Global-scale modes of surface temperature variability on interannual to century timescales // *J. Geophys. Res. D*. 1994. V. 99, iss. 12. P. 25819–25833.
4. *Latif M., Roeckner E., Botzet M., Esch M., Haak H., Hagemann S., Jungclaus J., Legutke S., Marsland S., Mikolajewicz U., Mitchell J.* Reconstructing, monitoring, and predicting multidecadal-scale changes in the North Atlantic thermohaline circulation with sea surface temperature // *J. Climate*. 2004. V. 17, iss. 7. P. 1605–1614.
5. *Gulev S.K., Zolina O., Grigoriev S.* Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data // *Clim. Dyn.* 2001. V. 17, iss. 10. P. 795–809.
6. *Мохов И.И., Семёнов 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 // Докл. РАН. 2008. Т. 419, № 5. С. 687–690.
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. Т. 443, № 2. С. 225–231.
8. *Полонский А.Б.* Глобальное потепление, крупномасштабные процессы в системе океан–атмосфера, термохалинная катастрофа и их влияние на климат Атлантико-Европейского региона. Серия «Современные проблемы океанологии». Вып. 5. Севастополь: Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины, 2008. 44 с.
9. *Семёнов В.А.* Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // Докл. РАН. 2008. Т. 418, № 1. С. 106–109.
10. *Семёнов 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. Физ. атмосфер. и океана. 2012. Т. 48, № 4. С. 403–421.
11. *Semenov V.A., Latif M., Dommenget 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. V. 23, iss. 21. P. 5668–5677.
12. *Knight J.R., Folland C.K., Scaife A.A.* Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33, iss. 17. DOI: 10.1029/2006GL026242.
13. *Sutton R.T., Hodson D.L.R.* Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate // *Science*. 2005. V. 309, iss. 5731. P. 115–118.
14. *Sutton R.T., Hodson D.L.R.* Climate response to basin-scale warming and cooling of the North Atlantic Ocean // *J. Climate*. 2007. V. 20, iss. 5. P. 891–907.
15. *Zveryaev I.I., Gulev S.K.* Seasonality in secular changes and interannual variability of european air temperature



- during the twentieth century // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D02110. DOI: 10.1029/2008JD010624.
16. *Roeckner E., Bäuml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kirchner I., Kornbluh L., Manzini E., Rhodin A., Schlese U., Schulzweida U., Tompkins A.* The atmospheric general circulation model ECHAM 5. Part I: Model description. Hamburg: Max Planck Inst. Meteorol., 2003. 140 p.
  17. *Meng Q.J., Latif M., Park W., Keenlyside N.S., Semenov V.A., Martin T.* Twentieth Century Walker Circulation Change: Data Analysis and Model Experiments // *Clim. Dyn.* 2012. V. 38, iss. 9–10. P. 1757–1773.
  18. *Semenov V.A., Latif M., Jungclaus J.H., Park W.* Is the observed NAO variability during the instrumental record unusual? // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35, iss. L11701. DOI: 10.1029/2008GL033273.
  19. *Hurrell J.W., Hack J.J., Shea D., Caron J.M., Rosinski J.* A new sea surface temperature and sea ice boundary dataset for the Community Atmosphere Model // *J. Climate.* 2008. V. 21, iss. 19. P. 5145–5153.
  20. *Hansen J., Ruedy R., Glascoe J., Sato M.* GISS analysis of surface temperature change // *J. Geophys. Res.* D. 1999. V. 104, N 24. P. 30997–31022.
  21. *Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., Dool H., Jenne R., Fiorino M.* The NCEP 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2001. V. 82, N 2. P. 247–267.
  22. *Graversen R.G., Mauritsen T., Tjernström M., Källén E., Svensson G.* Vertical structure of recent Arctic warming // *Nature (Gr. Brit.)*. 2008. V. 451, iss. 7174. P. 53–56.
  23. *Screen J.A., Simmonds I.* The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification // *Nature (Gr. Brit.)*. 2010. V. 464, iss. 7293. P. 1334–1337.
  24. *Мохов И.И., Горчакова И.А.* Радиационный и температурный эффекты летних пожаров 2002 г. в Московском регионе // *Докл. РАН.* 2005. Т. 400, № 4. С. 528–531.
  25. *Мохов И.И.* Особенности формирования летней жары 2010 г. на европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2011. Т. 47, № 6. С. 1–8.
  26. *Petoukhov V., Semenov V.A.* A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115, D21111. DOI: 10.1029/2009JD013568.
  27. *Schar C., Vidale P.L., Luthi D., Frei C., Haberli C., Liniger M.A., Appenzeller C.* The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves // *Nature (Gr. Brit.)*. 2004. V. 427, iss. 6972. P. 332–336.
  28. *Мохов И.И.* Действие как интегральная характеристика климатических структур: оценки для атмосферных блокингов // *Докл. РАН.* 2006. Т. 409, № 3. С. 403–406.
  29. *Мохов И.И., Семёнов В.А., Хон В.Ч., Погарский Ф.А.* Тенденции климатических изменений в высоких широтах Северного полушария: Диагностика и моделирование // *Лед и Снег.* 2013. Т. 122, № 2. С. 53–62.

*V.A. Semenov, E.A. Shelekhova, I.I. Mokhov, V.V. Zuev, K.P. Koltermann.* **The role of Atlantic Multidecadal Variability in formation of seasonal temperature anomalies in the Northern Hemisphere estimated by model calculations.**

Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) is associated with variations of oceanic heat transport in the North Atlantic and the Atlantic Sectors of the Arctic. It has a significant impact on the climate of the Northern Hemisphere (NH). Since 1970s to the early 2000s there has been a positive AMO trend that coincided with the global warming trend. In order to estimate the AMO contribution to the seasonal temperature changes we employ the atmospheric general circulation model (ECHAM5) coupled to a thermodynamics mixed layer ocean model by using anomalous ocean heat convergence fluxes associated with the AMO. Relative contributions of the anomalous heat fluxes in the Atlantic and the Arctic sectors have been estimated. The results show that AMO can explain up to 40% of the observed winter and summer temperature changes over the last three decades. Vertical structure of the AMO-related temperature changes has also much in common with empirical estimates. In particular, the model reproduces the Arctic amplification with maximum temperature trends at the surface in the high NH latitudes. AMO in the model leads to increased probabilities of extreme cold temperatures in February in some regions in Russia. This happens despite increase of the mean temperature. The probabilities increase for hot temperature extremes in July was also found in the European part of Russia. It is shown that the anomalous heat fluxes in the Arctic contribute a major part to the seasonal temperature changes related to the AMO. These fluxes are usually not taken into account when modeling the effect of North Atlantic Multidecadal Oscillation. The results obtained in the study indicate an important role of AMO in formation of weather and climate anomalies.