

Морские, речные и озёрные льды

УДК 551.581

Изменения распространения морских льдов в Арктике и связанные с ними климатические эффекты: диагностика и моделирование

© 2013 г. И.И. Мохов, В.А. Семенов, В.Ч. Хон, Ф.А. Погарский

Институт физики атмосферы РАН имени А.М. Обухова

mokhov@ifaran.ru

Статья принята к печати 28 февраля 2013 г.

Арктика, естественные и антропогенные изменения, климат, моделирование, морской лёд.
Arctic, climate, modeling, natural and anthropogenic changes, sea ice.

Рассматриваются результаты по моделированию влияния изменений температуры поверхности океана и границ распространения морского льда в последние десятилетия на формирование региональных погодноклиматических аномалий. Отмечена связь между сокращением площади морского льда и формированием антициклонических режимов атмосферной циркуляции, которые приводят к аномально холодным зимам, в том числе на Европейской территории России. Анализ результатов численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы позволил установить, что потепление в первой половине XX в. в зимний период должно было сопровождаться значительной отрицательной аномалией площади распространения арктических морских льдов. Полученные результаты свидетельствуют о существенной роли естественных долгопериодных колебаний климата в современных изменениях площади морских льдов. Приведены модельные оценки возможных изменений повторяемости опасных явлений с сильными ветрами и интенсивными волнами в Арктическом бассейне и благоприятных навигационных условий вдоль Северного морского пути в XXI в. Отмечен рост повторяемости экстремальных волн к середине XXI в. для акваторий Карского и Чукотского морей, что связано с увеличением длины разбега волн и региональным усилением приповерхностного ветра.

Особенности климатических изменений в последние десятилетия

Среднегодовая приповерхностная температура Северного полушария с начала XX в. выросла на 1 °C (рис. 1). Потепление было неравномерным, причём темпы его значительно увеличились в последние десятилетия. Так, после локального температурного минимума 1970-х годов, только за последние четыре десятилетия в Северном полушарии у поверхности потеплело на 0,7 °C. Наряду с современным потеплением, значительный рост приповерхностной температуры отмечался в первой половине XX в. (с некоторым последующим похолоданием). Темпы роста приповерхностной температуры в тот период были сравнимы с современными изменениями. Потепление первой половины XX в. связывается, в частности, с изменениями интенсивности океанической циркуляции в Северной Атлантике [см., например, 6, 13, 30]. Существенным считается и вклад внешних воздействий на климат, в том числе солнечной

активности и вариаций аэрозольной замутнённости атмосферы [23].

Важная особенность температурных изменений современного периода — замедление темпов потепления в первом десятилетии XXI в. Хотя все среднегодовые значения температурных аномалий для Северного полушария в XXI в., в частности по данным GISS [16], превышают предшествующие значения за весь период инструментальных наблюдений с середины XIX в., рост приповерхностной температуры Северного полушария за первое десятилетие XXI в. составил всего 0,1 °C (или 0,05 °C увеличения глобальной температуры). Пространственное распределение этих изменений (рис. 2) характеризовалось некоторым похолоданием над континентами Северного полушария преимущественно в зимний период, которое контрастировало с сильным потеплением в Арктике (0,55 °C для области севернее 60° с.ш.).

Среднее за десятилетие похолодание над континентами Северного полушария связано с

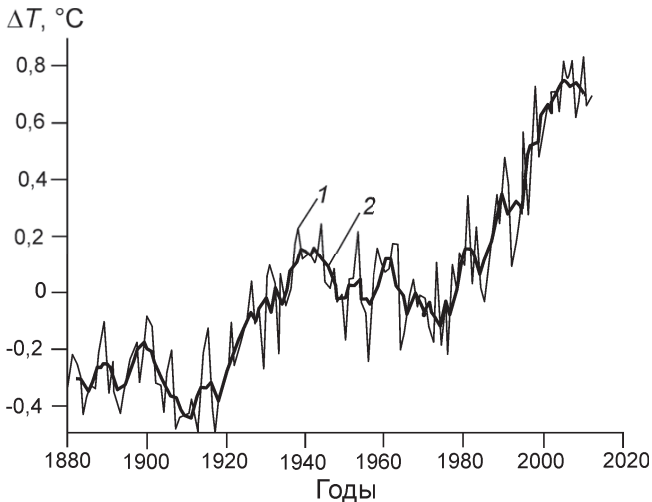


Рис. 1. Аномалии среднегодовой приповерхностной температуры Северного полушария (1) по данным GISS [16] и 5-летние скользящие средние (2) (°C)

Fig. 1. Annual mean (1) and 5-yr running means (2) of the Northern Hemisphere surface air temperature anomalies (°C) according to GISS data [16]

несколькими сильными отрицательными аномалиями в зимние периоды, в том числе 2003, 2006 и 2010 гг. (отметим также аномалию 2012 г. с низкими январской и февральской температурами). Если зимняя аномалия 2003 г. ещё могла восприниматься как случайное событие на фоне общего потепления последних десятилетий, то особенности зимы 2005/06 г. заставили исследователей рассмотреть вопрос о механизмах формирования подобных отрицательных температурных аномалий на фоне продолжающегося потепления. Зимой 2005/06 г. среднемесячные аномалии приповерхностной температуры атмосферы достигали -4 °C в Европе и -10 °C в Центральной Сибири (данные реанализа NCEP/NCAR [17]). Эта зима была самой холодной за последние три десятилетия в разных европейских регионах. Аномальные холода и сильные снегопады отмечались также в Восточной Азии.

Аномально холодные зимы связаны с формированием атмосферных блокирующих антициклонов – блокингов. Согласно модельным и эмпирическим оценкам, следует ожидать усиления их климатических эффектов при глобальном и высокоширотном потеплении [3–5, 7, 22]. В работе [22] отмечена тенденция увеличения времени жизни блокингов и числа блоко-дней в году в Северном полушарии, которая установлена по расчётам на базе модели общей циркуляции

при глобальном потеплении в связи с ростом содержания в атмосфере углекислого газа. Наиболее значимо увеличилась общая продолжительность явлений блокирования при потеплении для зимних и весенне-летних месяцев, особенно над континентами, а также в Евро-Атлантическом регионе. В зимние месяцы подобная тенденция способствует формированию продолжительных морозов на фоне общего потепления, а в весенне-летние – засух. Отмечена тенденция роста интегрального действия блокингов Северного полушария при общем потеплении [3]. Такие тенденции объяснить достаточно просто. В частности, в более тёплой тропосфере, при более слабой в целом зональной циркуляции, следует ожидать увеличения времени жизни атмосферных блокингов [3, 5, 7]. Проявление климатических аномалий последних лет, включая зимние и летние экстремальные режимы для евроазиатских регионов в средних широтах, согласуется с отмеченными тенденциями блокинговой активности. Холодные зимы, в том числе, могут быть связаны с уменьшением площади ледяного покрова в Арктике в результате нелинейного отклика атмосферной циркуляции на нагрев нижней атмосферы зимой в высоких широтах [8, 24].

Продолжающийся быстрый рост температуры в Арктике в XXI в., при замедлении глобального потепления и потепления в Северном полушарии, усиливает контраст температурных изменений в средних и высоких широтах. Возможные механизмы этих процессов связаны с изменениями атмосферной циркуляции, сопровождающимися аномально сильной адвекцией тепла в высокие широты [15], а также переносом океанического тепла в Атлантическом секторе Арктики [29]. В результате потепления в Арктике отмечается быстрое сокращение площади морских льдов, которое в сентябре 2012 г. достигло рекордного минимума за период спутниковых наблюдений с конца 1970-х годов. Сокращение площади арктических морских льдов – одно из ярчайших свидетельств глобальных изменений климата, которое имеет огромное значение для социально-экономического развития России, в частности для морской навигации по трассе Северного морского пути [18]. При этом в Антарктике на протяжении последних трёх десятилетий наблюдается общий рост площади морских льдов (хотя и не столь значимый), достигший

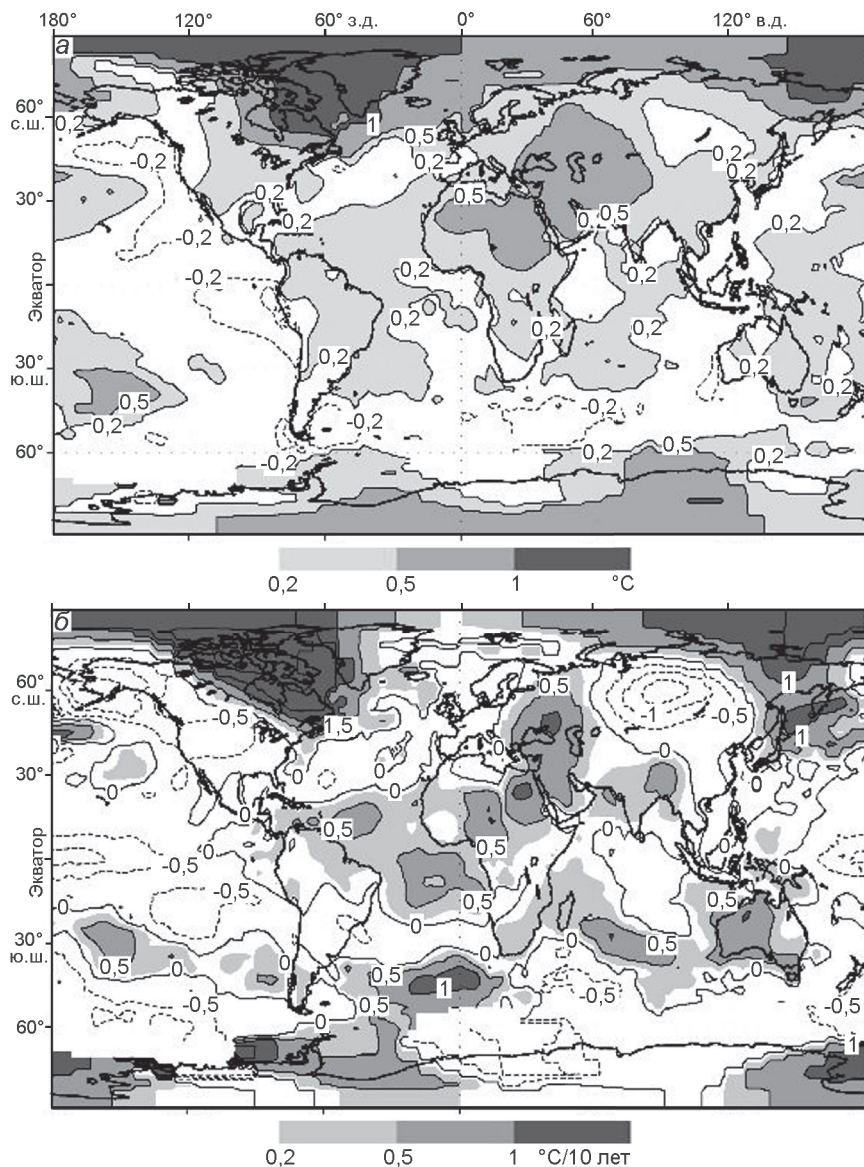


Рис. 2. Аномалии среднегодовой приповерхностной температуры ($^{\circ}\text{C}$) по данным GISS [16] для первого десятилетия XXI в. относительно последнего десятилетия XX в. (а) и тренд приповерхностной температуры ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) для периода 2001–2010 гг. (б)

Fig. 2. Annual mean surface air temperature anomalies averaged for the first decade of the 21st century relative to the last decade of the 20th century ($^{\circ}\text{C}$) according to GISS data [16] (a), and temperature trend ($^{\circ}\text{C}/10$ yr) for the 2001–2010 period (b)

абсолютного максимума в 2012 г. Объяснить причины столь разных тенденций – важная задача. В этой работе рассматриваются результаты оценки климатических изменений в высоких широтах Северного полушария и их возможные последствия на основе данных наблюдений и модельных расчётов.

Связь региональных климатических изменений с аномалиями температуры поверхности океана и границами распространения морских льдов

Для понимания причин современных изменений климата, в том числе в высоких широтах на территории России, необходимо, в частности, определить пространственные характеристики и амплитуды изменений климатических пара-

метров, связанных с изменениями как глобального поля температуры поверхности океана, так и аномалий в Северной Атлантике по сравнению с естественной внутренней изменчивостью атмосферной циркуляции. Существенную роль в формировании региональных климатических аномалий играет быстрое таяние арктических льдов. В работе [9] рассмотрены результаты численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы для оценки воздействия изменений температуры поверхности океана и концентрации морских льдов на региональные характеристики климата в западной части Евразии. Использована модель общей циркуляции атмосферы ECHAM5 [28] со спектральным горизонтальным разрешением T42 (примерно

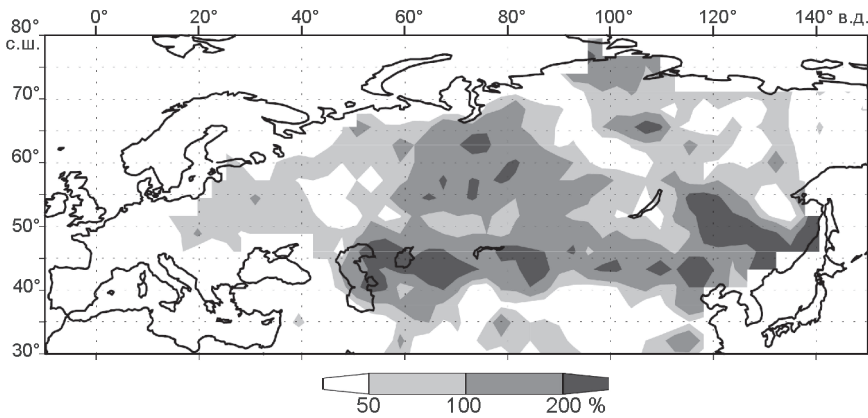


Рис. 3. Изменения вероятности (%) январских температурных аномалий, меньших $-1,5\sigma$, по модельным расчётам [9] при соответствующем уменьшении концентрации морских льдов в Арктике в 1998–2006 гг. относительно 1968–1976 гг.

Fig. 3. Changes in probability (%) of January temperature to be lower than 1.5 standard deviation due to the Arctic sea ice reduction from 1968–1976 to 1998–2006 periods as obtained from model simulations [9]

2,8° по широте и долготы) и 19 вертикальными уровнями. Анализировались чувствительности зимнего и летнего климата к изменениям температуры поверхности океана и концентрации морских льдов (по данным HadISST1.1 [26]) в 1998–2006 гг. относительно 1968–1976 гг. Эти два периода соответствуют максимальной и минимальной фазам индекса Атлантического долгопериодного колебания. Помимо численных экспериментов с изменением глобального поля температуры поверхности океана и концентрации морских льдов, анализировались результаты экспериментов с аномалиями температуры поверхности океана только в Северной Атлантике и с аномалиями концентрации морских льдов в Арктике для указанных периодов. Отмечено, что температурные изменения в Западной Европе достаточно хорошо объясняются изменениями температуры поверхности океана и площади морских льдов. Вместе с тем потепление в Восточной Европе и Западной Сибири, по модельным расчётам, существенно меньше (в 2–3 раза), чем по данным наблюдений. Это свидетельствует, что в континентальных регионах изменения приповерхностной температуры зимой в значительной степени связаны с аномалиями атмосферной циркуляции. В целом, температурные изменения летом, по модельным расчётам, характеризуются большей статистической значимостью, чем зимой, что можно связать с более интенсивной циркуляцией атмосферы зимой по сравнению с летом.

В модельных расчётах достаточно хорошо воспроизводятся реальные изменения поля давления зимой, в частности понижение давления в Прикаспийском регионе, но существенно (примерно в 3 раза) занижается диапазон изменений. Важный результат выполненных

численных экспериментов — анализ чувствительности климата западной части Евразии к изменениям концентрации морских льдов в Арктике. Отмечено, что снижение концентрации морских льдов и сильное потепление над Баренцевым морем зимой приводят к похолоданию над обширными областями северной части Евразии с увеличением вероятности аномально холодных январей (в 2 раза и более для регионов Западной Сибири) (рис. 3). Подобный эффект связан с образованием области повышенного давления над южной границей Баренцева моря. Отметим, что положительная аномалия приземного давления на южной границе Баренцева моря, полученная по результатам модельных экспериментов, адекватна реальному распределению аномалий давления в январе 2012 г. (рис. 4). В этом месяце в российских регионах, в том числе в европейской части, были сильные морозы. Хотя подобный пример однозначно не доказывает, что именно таяние льда послужило причиной формирования конкретных аномально холодных режимов, однако полученные результаты служат значимым аргументом в поддержку предложенного механизма.

Выполненные исследования показали, что для оценки воздействия Атлантического долгопериодного колебания на климат Евразии в численных экспериментах с климатическими моделями необходимо учитывать и корректно воспроизводить изменения площадей морских льдов Арктического бассейна, обусловленные этим колебанием. Особенности похолоданий над Евразией, связанные со снижением концентрации морских льдов в зимний период, а также отсутствие статистически значимых изменений зимней приповерхностной температуры атмосферы в Восточной Европе и

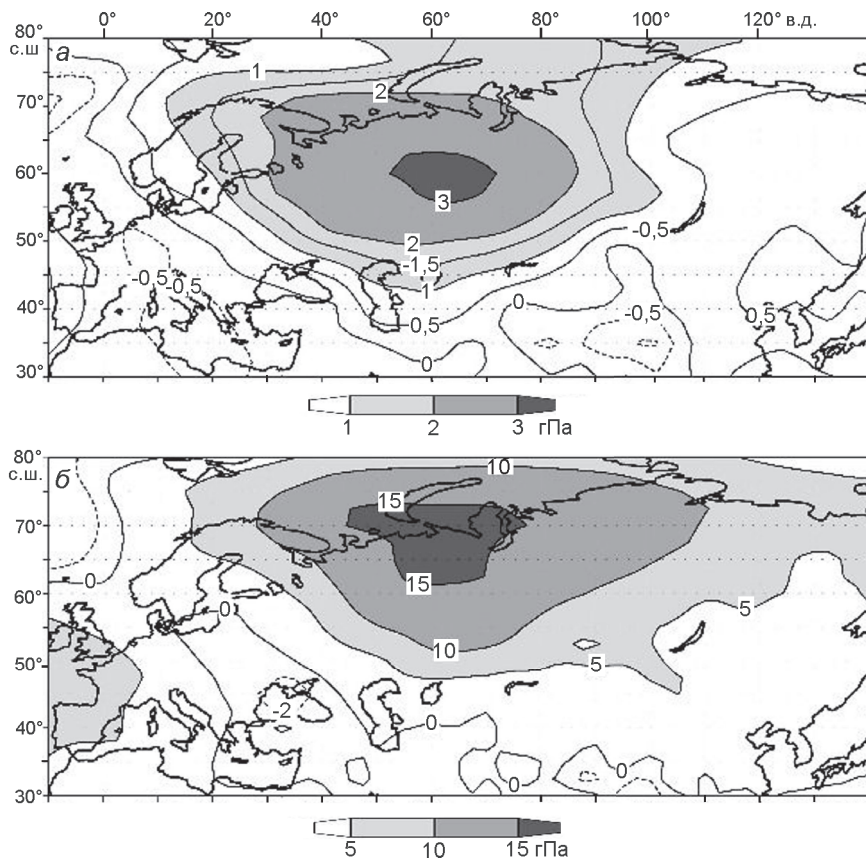


Рис. 4. Изменения давления на уровне моря (гПа) в январе по модельным расчётам [9] при соответствующем уменьшении концентрации морских льдов в Арктике в 1998–2006 гг. относительно 1968–1976 гг. (а) и аномалии давления на уровне моря в январе 2012 г. (относительно 1948–2012 гг.) по данным реанализа NCEP/NCAR (б)

Fig. 4. Changes of the January sea level pressure (hPa) due to the Arctic sea ice reduction from 1968–1976 to 1998–2006 periods as simulated by the model [9] (a) and according to NCEP reanalysis data for January 2012 (relative to 1948–2012 mean) (b)

Западной Сибири в численных экспериментах с изменением глобальных полей температуры поверхности океана и концентрации морских льдов согласуются с результатами анализа эмпирических данных. Корреляция среднегодовых аномалий глобального поля приповерхностной температуры с индексом Атлантического долгопериодного колебания (для периода 1870–2000 гг.) практически для всего Северного полушария положительна, за исключением региона к северу от Чёрного и Каспийского морей, где отмечается отрицательная корреляция [20]. Основываясь на этом, мы можем объяснить отрицательные аномалии приповерхностной температуры атмосферы над регионами Евразии при положительном индексе Атлантического долгопериодного колебания (т.е. при увеличении температуры поверхности океана в Северной Атлантике), который соответствует снижению концентрации морских льдов в Арктике, прежде всего в Баренцевом и Карском морях, в зимний период. С помощью предложенного механизма можно объяснить и холодные зимы 1941–1942 гг. в Европейской части России и Прикаспийском регио-

не. В начале 1940-х годов отмечался максимум индекса Атлантического долгопериодного колебания, что могло отвечать значительным отрицательным аномалиям концентрации морских льдов в Арктике. Достоверных данных по площадям распространения морских льдов в этом регионе для данного периода нет, но океанографические свидетельства указывают на усиленный приток атлантических вод в Баренцево море в 1940-х годах [2].

Изменения площади арктических морских льдов в первой половине XX в.

В настоящее время наблюдаются беспрецедентно низкие значения площади арктических морских льдов по сравнению с концом 1970-х годов – началом спутниковых наблюдений. Достаточно полные данные о концентрации морских льдов появились лишь в начале 1960-х годов; до этого наблюдения, особенно в зимний период, были региональными и имели большие пропуски. Отсутствие регулярных достоверных данных для первой половины XX в. существенно занизило амплитуды колебаний зимних значений границ распространения мор-

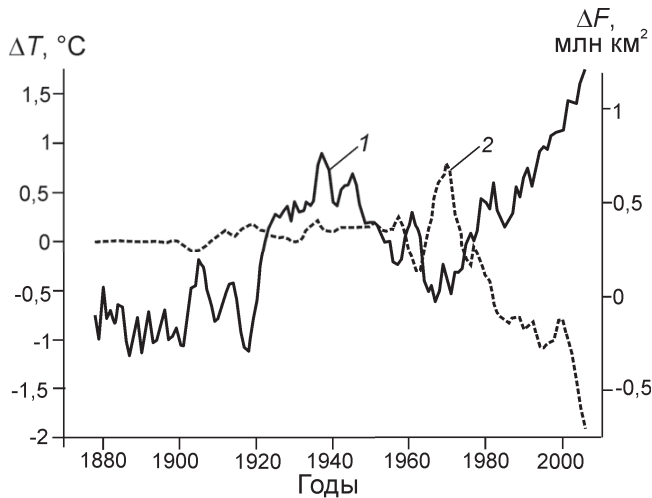


Рис. 5. Аномалии приповерхностной температуры ($^{\circ}\text{C}$) над сушей в Арктике ($60\text{--}90^{\circ}$ с.ш.) в зимний период (ноябрь–апрель) по данным CRUTEM3 [12] (1, шкала слева) и аномалии площади морских льдов (млн км^2) в Северном полушарии по данным HadISST1.1 [26] (2, шкала справа). Данные представлены с 5-летним скользящим усреднением
Fig. 5. Arctic ($60\text{--}90^{\circ}\text{N}$) surface air temperature anomalies over land ($^{\circ}\text{C}$) in winter time (November through April) according to CRUTEM3 data [12] (1, left axis) and Arctic sea ice anomalies (mln km^2) according to HadISST1.1 data [26] (2, right axis). All data are 5-yr running means

ских льдов в современных массивах сеточных данных, в частности материалов HadISST1.1 [26] (рис. 5), которые использовались Межправительственной группой экспертов по изменению климата [21] в качестве наиболее достоверной характеристики динамики площади арктических морских льдов в XX в. Отсутствие значительных изменений этой характеристики в данных HadISST1.1 не согласуется и с температурными аномалиями в высоких широтах Северного полушария (севернее 60° с.ш.) над сушей (в частности по данным CRUTEM3 [12]) (см. рис. 5). В то же время оценки изменений площади морских льдов в Восточной Арктике, по данным исследований ААНИИ, свидетельствуют о значительной долгопериодной аномалии в первой половине XX в., в частности о сильном уменьшении площади морских льдов в 1920–30-е годы [1, 25].

Для оценки достоверности сеточных данных HadISST1.1 выполнены численные эксперименты с моделью общей циркуляции атмосферы с использованием этих данных в качестве граничных условий на нижней границе атмосферы. Согласно полученным результатам, арктическое потепление последних трёх

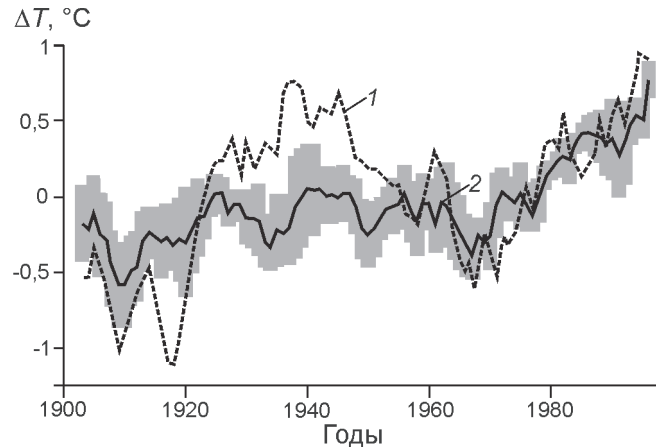


Рис. 6. 5-летние скользящие средние аномалии приповерхностной температуры ($^{\circ}\text{C}$) над сушей в Арктике ($60\text{--}90^{\circ}$ с.ш.) в зимний период (ноябрь–апрель) по данным CRUTEM3 [12] (1) и результатам модельных экспериментов (среднее по ансамблю экспериментов – 2). Серая штриховка характеризует диапазон среднеквадратических отклонений ($\pm\sigma$) для ансамбля численных экспериментов
Fig. 6. Arctic ($60\text{--}90^{\circ}\text{N}$) surface air temperature anomalies over land ($^{\circ}\text{C}$) in winter time (November through April) according to CRUTEM3 data [12] (1) and ensemble simulations with atmospheric model (2 represents ensemble mean). Shaded areas show a range of standard deviation ($\pm\sigma$) among the ensemble members. All data are 5-yr running means

десятилетий XX в. хорошо воспроизводится в ансамблевых модельных экспериментах с использованием данных HadISST1.1, а потепление первой половины XX в. в Арктике не воспроизводится (рис. 6). С целью адекватного сравнения с результатами наблюдений модельные данные в узлах сетки, где отсутствовали результаты наблюдений, из анализа исключались. При этом долгопериодная аномалия приповерхностной температуры имеет большую амплитуду, чем диапазон собственной стохастической изменчивости атмосферы. Полученные результаты показывают, что потепление в первой половине XX в. должно было сопровождаться значительной аномалией распространения морских льдов в Арктике, сравнимой с современными аномалиями. Подтверждается достоверность оценок изменения площади распространения морских льдов в Арктике в XX в., полученных в ААНИИ и указывающих на значительное уменьшение её в 1920-х годах, сравнимое с современным. Существенная роль в формировании потепления первой половины XX в. связывается с естественной внутренней изменчивостью климата [11], с долгопериодным колебанием океанической циркуляции (круп-

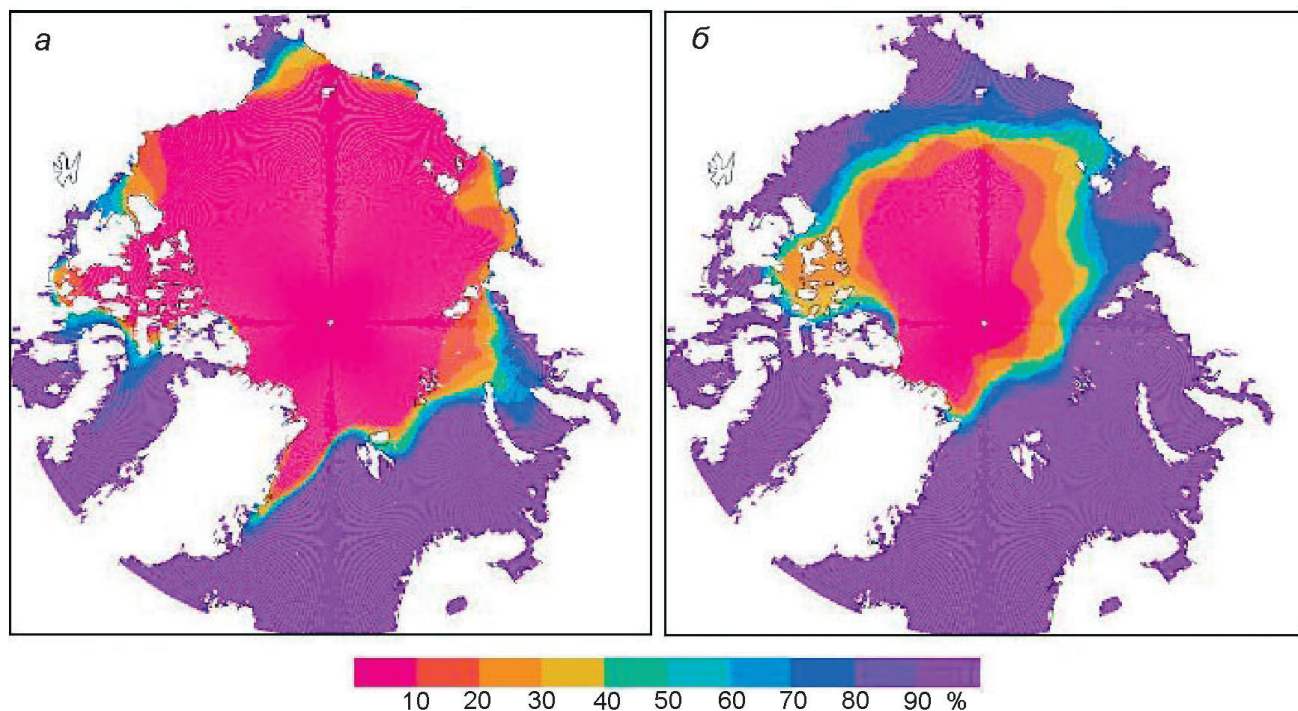


Рис. 7. Вероятность (в %) потенциально судоходных лет с благоприятными навигационными условиями в конце XX в. (*а* – 1980–1999 гг.) и в середине XXI в. (*б* – 2046–2065 гг.) по расчётам с региональной климатической моделью
Fig. 7. Probability (in %) of potentially navigable years in the end of the 20th century (*a* – 1980–1999) and in the middle of the 21st century (*b* – 2046–2065) according to regional climate model simulations

номасштабного меридионального круговорота) в Северной Атлантике [8], который связан, в частности, с индексом Атлантического долгопериодного колебания [6]. Всё это указывает на значительный вклад естественной изменчивости и в современное потепление в Арктике.

Тенденции изменения режимов морских льдов и волновой активности в Арктическом бассейне

Изменение режима распространения морских льдов в Арктике имеет большое значение в связи с развитием арктических морских транспортных систем и освоением шельфа [10, 18]. При этом данный регион подвержен сильным погодно-климатическим колебаниям. Именно шторм, морское волнение и льды опасны для судоходства, рыболовства, работ на морском шельфе. С целью оценки сценариев последствий изменения ветро-волновой активности для морской деятельности вдоль трассы Северного морского пути проанализированы возможные изменения повторяемости опасных явлений с сильным ветром и интенсивными волнами в Арктическом бассейне в XXI в. Для расчёта морского волнения применялась двухмерная спектральная численная модель ветрового вол-

нения третьего поколения WAVEWATCH III версии 3.14 [31]. В качестве входных данных (с временным шагом 6 часов) использовались результаты расчётов приповерхностного ветра и концентрации морских льдов с помощью региональной климатической модели HIRHAM/NAOSIM для Арктического региона [14, 27] при сценарии SRES-A1B, касающегося изменения концентрации парниковых газов и аэрозоля в атмосфере в XXI в. [19]. Горизонтальное разрешение модели – 0,5°.

Навигационные условия считались благоприятными при концентрации морского льда, не превышающей 60%. Год относился к потенциально судоходному, если такие условия были на протяжении не менее трёх месяцев. Навигация вдоль трассы Северного морского пути была экономически привлекательной при вероятности потенциально судоходных лет за анализируемый период более 50%. На рис. 7 даны оценки вероятности (%) потенциально судоходных лет с благоприятными навигационными условиями в конце XX и середине XXI вв. (2045–2065 гг.) согласно расчётам на основе региональной климатической модели. Модельные результаты показывают существенное увеличе-

ние протяжённости экономически привлекательных областей для судоходной навигации в российских арктических морях, включая трассу Северного морского пути, к середине XXI в.

Проанализировано также изменение числа дней с открытой водой (с долей площади морских льдов менее 15%), сильным ветром (свыше 8 м/с) и интенсивными волнами (свыше 2 м [32]) в Арктическом бассейне к середине XXI в. по сравнению с концом XX в. (1980–1999 гг.) в сентябре и октябре. Согласно модельным расчётам, к середине XXI в. усилится образование волн выше 2 м в различных акваториях Арктического бассейна. Это связано с увеличением длины разбега волн (за счёт расширения площади открытой воды) и региональным усилением приповерхностного ветра к середине XXI в. Повторяемость дней с сильным ветром ($U > 8$ м/с) и интенсивными волнами ($H_s > 2$ м/с), в целом, для Российских арктических морей растёт; наибольшее усиление вероятно на акватории Карского моря с октября по декабрь. Противоположная тенденция с ослаблением волновой активности к середине XXI в. будет характерна для бассейна Баренцева моря, что можно объяснить как региональным ослаблением скорости ветра, так и распространением более интенсивных волн в восточном направлении при увеличении акватории открытой воды в Атлантическом секторе Арктики. В целом, на фоне общего усиления волновой активности в различных акваториях Арктического бассейна возможно увеличение относительной доли экстремальных волн. В частности, модельные расчёты указывают на наибольший рост повторяемости экстремальных волн (с высотой более 3 м) к середине XXI в. для акваторий Карского и Чукотского морей с октября по декабрь.

Заключение

Выполнен анализ численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы при использовании предписанных вариаций температуры поверхности океана и концентрации морских льдов для последних десятилетий. Отмечено, что изменения температурного режима в континентальных областях России, особенно в зимний период, существенно определяются изменениями атмосферной циркуляции и не могут быть связаны только с воздействием изменений температуры по-

верхности океана и границ распространения морских льдов. Отмечен статистически значимый региональный отклик атмосферной циркуляции на изменения площади арктических морских льдов. Уменьшение площади льдов зимой в модельных расчётах приводит к формированию антициклонического режима на южной границе Баренцева моря, с которым связаны отрицательные температурные аномалии в западной части Евразии. Это согласуется с участвовавшими в последнее десятилетие аномально холодными погодными режимами в зимний период. Для оценки воздействий вариаций граничных условий на поверхности океана на климат Евразии в численных экспериментах с климатическими моделями принципиально важно учитывать (и корректно воспроизводить) изменения концентрации морских льдов в Арктическом бассейне.

Для верификации существующих сеточных данных о концентрации морских льдов выполнены численные эксперименты с моделью общей циркуляции атмосферы с использованием данных HadISST1.1 [26] для температуры поверхности океана и концентрации морских льдов в XX в. в качестве граничных условий на нижней границе атмосферы. Установлено, что в модельных расчётах хорошо воспроизводится потепление последних 30 лет XX в., но не потепление первой половины XX в. Поскольку изменения приповерхностной температуры атмосферы в Арктике зимой тесно связаны с аномалиями площади морских льдов, можно сделать вывод, что потепление первой половины XX в. должно было сопровождаться значительными отрицательными аномалиями площади морских льдов в Арктике, сравнимыми с современными. Это указывает на существенный вклад естественной изменчивости и в современные климатические изменения. Сделанные выводы относятся к изменениям площади морских льдов в зимний период. Летом, согласно спутниковым данным последних десятилетий, площадь распространения морских льдов в Арктике сокращается в 2 раза быстрее, чем зимой, что в значительной степени связано с ростом концентрации парниковых газов в атмосфере.

Оценены возможные изменения повторяемости опасных явлений с сильными ветром и волнами в Арктическом бассейне и благоприятные навигационные условия вдоль трассы

Северного морского пути в XXI в. Модельные оценки этих параметров вдоль Северного морского пути в XXI в. (при умеренных антропогенных воздействиях) свидетельствуют о существенном увеличении протяжённости экономически привлекательных областей для судовой навигации в российских арктических морях, в частности к середине XXI в. К этому времени вырастет повторяемость экстремальных волн, в том числе для акваторий Карского и Чукотского морей, что связано с увеличением длины разбега волн (за счёт расширения площади открытой воды) и региональным усилением приповерхностного ветра в это время.

Работа выполнена в рамках проектов программ фундаментальных исследований Президиума РАН № 4 и № 31, РФФИ, Минобрнауки (соглашение 8833 и ГК 11.519.11.5006) и при поддержке гранта Президента РФ НШ 5467.2012.5.

Литература

1. Алексеев Г.В., Данилов А.И., Катицов В.М., Кузьмина С.И., Иванов Н.Е. Изменения площади морских льдов северного полушария в XX и XXI веках по данным наблюдений и моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 723–735.
2. Бочков Ю.А. Ретроспектива температуры воды в слое 0–200 м на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море (1900–1981 гг.) // Тр. ПИНРО. 1982. С. 113–122.
3. Мохов И.И. Действие как интегральная характеристика климатических структур: Оценки для атмосферных блокингов // ДАН. 2006. Т. 409. № 3. С. 403–406.
4. Мохов И.И. Особенности формирования летней жары 2010 г. на Европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 709–716.
5. Мохов И.И., Петухов В.К. Блокинги и тенденции их изменения // ДАН. 1997. Т. 337. № 5. С. 687–689.
6. 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 // ДАН. 2012. Т. 443. № 2. С. 225–231.
7. Мохов И.И., Акперов М.Г., Прокофьева М.А., Тимажев А.А., Лупо А.Р., Ле Трет Э. Блокинги в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам // ДАН. 2013. Т. 449. № 5. С. 582–586.
8. Семенов В.А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // ДАН. 2008. Т. 418. № 1. С. 106–109.
9. 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. Т. 48. № 4. С. 403–421.
10. Хон В.Ч., Мохов И.И. Климатические изменения в Арктике и возможные условия арктической морской навигации в XXI веке // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. С. 19–25.
11. Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O.M. The Early Twentieth Century Warming in the Arctic – A possible mechanism // Journ. of Climate. 2004. V. 17. P. 4045–4057.
12. Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F.B., Jones P.D. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850 // Journ. of Geophys. Research: Atmospheres. 2006. V. 111. D12106. doi:10.1029/2005jd006548.
13. Delworth T.L., Knutson T.R. Simulation of early 20th century global warming // Science. 2000. V. 287. P. 2246–2250.
14. Dorn W., Dethloff K., Rinke A. Limitations of a coupled regional climate model in the reproduction of the observed Arctic sea-ice retreat // The Cryosphere. 2012. V. 6. P. 985–998. doi:10.5194/tc-6-985-2012.
15. Graverson R.G., Mauritsen T., Tjernström M., Köllén E., Svensson G. Vertical structure of recent Arctic warming // Nature. 2008. V. 541. P. 53–56. doi:10.1038/nature06502.
16. Hansen J., Ruedy R., Glascoe J., Sato M. GISS analysis of surface temperature change // Journ. of Geophys. Research. 1999. V. 104. № D24. P. 30997–31022.
17. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. of the American Meteorological Society. 1996. V. 77. P. 437–470.
18. Khon V.C., Mokhov I.I., Latif M., Semenov V.A., Park W. Perspectives of Northern Sea Route and Northwest Passage in the 21st century // Climatic Change. 2010. V. 100. P. 757–768. doi:10.1007/s10584-009-9683-2.
19. Khon V.C., Mokhov I.I., Pogarsky F.A. Climate change in Arctic and sea wave activity in the 21st century from model simulations // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling / Ed. A. Zadra. Rep. №. 42. WGNE, WMO. 2012. S. 7. P. 9–10.
20. Knight J.R., Allan R.J., Folland C.K., Vellinga M., Mann M.E. A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate // Geophys. Research Letters. 2005. V. 32. doi: 10.1029/2005gl024233.
21. Lemke P., Ren J., Alley R.B., Allison I., Carrasco J., Flato G., Yoshiyuki F., Kaser G., Mote P., Thomas R.H., Zhang J. Observations: Changes in snow, ice and frozen ground // Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds S. Solomon et al. Cambridge Univ.: Press. Cambridge, 2007. P. 337–383.
22. 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 // Climate Dynamics. 1997. V. 13. P. 181–195.
23. Otterå O.H., Bentsen M., Drange H., Suo L. External forcing as a metronome for Atlantic multidecadal variability // Nature Geoscience. 2010. V. 3. P. 688–694. doi: 10.1038/NGEO0955.

24. *Petoukhov V., Semenov V.A.* A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // *Journ. of Geophys. Research: Atmospheres*. 2010. V. 115. D21111. doi:10.1029/2009JD013568.
25. *Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Walsh D., Yulin A.V.* Long-term ice variability in Arctic marginal seas // *Journ. of Climate*. 2003. V. 16. P. 2078–2085.
26. *Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A.* Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *Journ. of Geophys. Research*. 2003. V. 108 (D14). doi: 10.1029/2002jd002670.
27. *Rinke A., Dethloff K.* Simulated circum-Arctic climate changes by the end of the 21st century // *Global and Planetary Change*. 2008. V. 62. P. 173–186.
28. *Roeckner E., Bäuml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kirchner I., Kornblüeh L., Manzini E., Rhodin A., Schlese U., Schulzweida U., Tompkins A.* The atmospheric general circulation model ECHAM 5. Part I: Model description // *MPI Rep.* V. 349. Hamburg: Max Planck Institute of Meteorology, 2003. 127 P.
29. *Schlichtholz P.* Influence of oceanic heat variability on sea ice anomalies in the Nordic Seas // *Geophys. Research Letters*. 2011. V. 38. L05705. doi:10.1029/2010GL045894.
30. *Semenov V.A., Latif M., Dommenges D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W.* The impact of North Atlantic-Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature // *Journ. of Climate*. 2010. V. 23. P. 5668–5677.
31. *Tolman H.L., Chalikov D.V.* Source terms in a third-generation wind-wave model // *Journ. of Phys. Oceanography*. 1996. V. 26. P. 2497–2518.
32. *Young I.R., Zieger S., Babanin A.V.* Global trends in wind speed and wave height // *Science*. 2011. V. 332. P. 451–455.

Summary

Modeling results of the impact of sea surface temperature and sea ice extent changes over the last decades on the formation of weather and climate anomalies are presented. It was found that the Arctic sea ice area reduction may lead to anti-cyclonic regimes' formation causing anomalously cold winters in particular on the Russian territory. Using simulation with an atmospheric general circulation model, it is shown that the Early 20th Century Warming must have been accompanied by a large negative Arctic sea ice area anomaly in winter time. The results imply a considerable role of long-term natural climate variations in the modern sea ice area decrease. Estimates of the possible probability's changes of the dangerous events of strong winds and high waves in the Arctic basin and favorable navigation conditions for the Northern Sea Route in the 21st century are made based on numerical model calculations. An increase of extreme wave height is found to the middle of the 21st century for Kara and Chukchi Seas as a consequence of prolonged run length and increased surface winds.