

УДК 551.465

ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В АРКТИКЕ В XXI СТОЛЕТИИ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОГНОСТИЧЕСКОГО СЦЕНАРИЯ

Г. Н. Панин

Институт водных проблем РАН (Москва, Российская Федерация)

Н. А. Дианский

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Институт вычислительной математики РАН, Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова (Москва, Российская Федерация)

И. В. Соломонова

Институт водных проблем РАН (Москва, Российская Федерация)

А. В. Гусев

Институт вычислительной математики РАН,
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва, Российская Федерация)

Т. Ю. Выручалкина

Институт водных проблем РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 20 октября 2016 г.

Проведено исследование взаимосвязей между климатическими процессами Северной Атлантики и Арктики. Показано, что таяние льда в Арктике в 70–90-х годах XX столетия связано с изменчивостью климата в Северной Атлантике, хорошо отражаемой в индексах Атлантической мультидекадной осцилляции и интенсивности Атлантической меридиональной циркуляции. Последний отражает также климатические изменения в потоках тепла и пресной воды с поверхности Северной Атлантики в атмосферу в средних широтах. Предложен физико-статистический прогностический сценарий климатических изменений (комбинированный сценарий) на основе композиции «парникового» (внешнее воздействие) и «циклических» (внутренняя изменчивость климатической системы) эффектов. Проведены численные эксперименты с моделью общей циркуляции океана INMOM по ретроспективному и прогностическому воспроизведению термохалинной циркуляции и морского льда в Атлантическом и Северном Ледовитом океанах. Анализ результатов расчетов и исследование их циклических свойств позволили по-новому подойти к описанию климатической изменчивости Арктики и Северного морского пути. Этот подход позволяет описывать рост температуры, вызванный не только эмиссией парниковых газов, но и изменчивостью климата (в частности похолодание, наблюдавшееся в 1950–1970-х годах). Предложенный комбинированный сценарий климатических изменений показывает возможное похолодание в Арктике и соответствующее снижение продолжительности навигационного периода Северного морского пути в ближайшие 10–20 лет. В целом исследование направлено на оценку того, в какой степени изменчивость Северной Атлантики влияет на вариации климата Евразии, чтобы учесть их при последующем прогнозировании.

Ключевые слова: Арктика, Северный морской путь, Атлантика, лед, прогноз, климатические изменения, парниковый эффект, колебания.

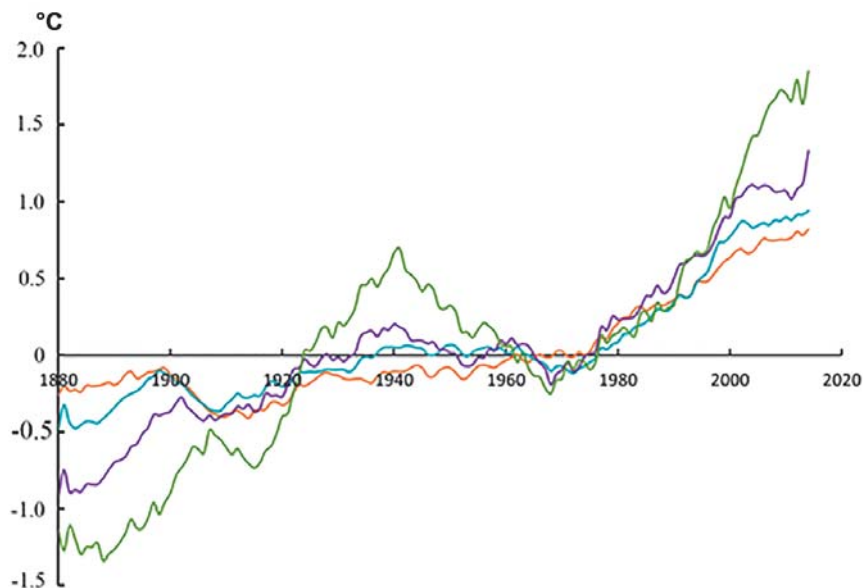


Рис. 1. Среднегодовые аномалии приземной температуры воздуха над сушей (сглаженные по девяти годам) за 1880–2014 гг. Оранжевая кривая – от экватора до 24° с. ш., голубая – 24–44° с. ш., фиолетовая – 44–64° с. ш., зеленая – 64–90° с. ш. (по данным Surface Temperature Analysis (GISTEMP). NASA Goddard Institute for Space Studies [41])

Введение

В последнее время активно исследуется проблема изменения климата полярных зон Земли, а также то, в какой мере океан (и Атлантика в частности) испытывает те или иные колебания [14; 23; 24; 34; 49; 60]. Интерес к Арктике заметно повысился благодаря происходящим в этом регионе быстрым изменениям климата, а также прогнозам, указывающим на арктическое усиление глобального потепления на протяжении всего XXI в. [26], и выводам отдельных публикаций [54], свидетельствующих о том, что климатические изменения в Арктике достигли порогового значения, при котором могут происходить необратимые процессы, и что в грядущие десятилетия следует ожидать полного таяния льда в летний сезон. Теоретические исследования продолжительности навигационного периода Северного морского пути (СМП) в XXI в. (при степени покрытия акватории льдом (концентрации морских льдов) менее 15%), выполненные в серии работ [13; 15; 16] по результатам с ансамблями прогностических расчетов по современным климатическим моделям земной системы (МЗС) в рамках международного проекта CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project) [30] при сценарии умеренных антропогенных воздействий RCP 4.5 [48], показали, что к концу XXI в. продолжительность навигационного периода может составить около пяти месяцев.

В течение XX в. происходили заметные колебания климата Земли [1; 7; 14; 17; 23; 24; 43], вызванные в частности обратными связями в системе атмосфера — полярные льды — океан. При этом в Арктике изменения климата происходят в наиболее значительной степени, что хорошо отражено на рис. 1. В то

же время Арктика — самый уязвимый к изменениям климата регион. До сих пор недостаточно изучены климатически значимые процессы и обратные связи, действующие в климатической системе Арктики [11]. Также отмечаются недостаток данных наблюдений и проблемы моделирования климата Арктики. Существуют многочисленные пробелы в понимании того, как функционирует климатическая система в целом и какие факторы определяют региональные изменения климата в Арктике. Восполнение этих пробелов является необходимым условием уточнения оценок будущих изменений климата и их последствий.

Показанные на рис. 1 изменения колебательного характера в аномалиях приповерхностной температуры в целом не воспроизводятся при моделировании с использованием климатических МЗС из списка Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), основанных на совместных моделях общей циркуляции атмосферы и океана, за исключением французской модели CNRM-CM5 (Météo-France/CNRS and CERFACS) и немецкой модели в двух версиях mpi-esm-Mr, mpi-esm-Lr (улучшенные варианты модели ECHAM5/MPIOM Института Макса Планка) [13; 15; 16]. Большинство климатических моделей нового поколения показывает монотонное увеличение среднеглобальной аномалии среднегодовой температуры поверхности [39; 40]. Однако наблюдения ясно демонстрируют замедление потепления начиная с 2000-х годов — так называемое *warming hiatus* [27; 28; 31; 37; 39; 40; 46; 48; 51; 52; 56; 58; 59; 62; 63]. Неясно, в какой степени это несоответствие обусловлено некорректным внешним форсингом, или некорректным модельным

откликом на него, например за счет недостаточного учета внутренней изменчивости климата в современных МЗС, или случайными факторами.

Такое поведение климатических изменений, произошедших за последние полтора века, позволило Г. Н. Панину [17] предложить простую аппроксимацию климатических изменений на основе композиции «парникового» и «циклического» эффектов:

$$\Delta T \approx \Delta T_{\text{IPCC}} + k \sin \omega t, \quad (1)$$

где ΔT — прогнозируемая аномалия температуры приземного воздуха; ΔT_{IPCC} — аномалия температуры, прогнозируемая с помощью МЗС МГЭИК; ω — циклическая частота приблизительно 60-летних колебаний климата; t — время; $k(\lambda, \varphi)$ — эмпирический коэффициент, зависящий от координат.

Здесь под парниковым изменением климата подразумеваются климатические изменения, вызванные внешними факторами антропогенного или естественного (извержения вулканов, изменение солнечной постоянной и т. д.) характера. В свою очередь, под циклическими изменениями климата понимаются собственные колебания в совместной системе атмосфера — океан — суша. При этом предполагалось, что главная частота наиболее сильных циклических колебаний климата соответствует периоду колебаний в 60 лет, а парниковые изменения климата определяются линейным трендом.

В климате Арктики по сравнению с другими широтными зонами циклические изменения климата проявляются наиболее сильно (см. рис. 1). Эти колебания в Арктике в XX в. спровоцировали несколько периодов потепления и похолодания [17; 20; 21; 23], которые, как отмечено выше, не воспроизводятся МЗС [47; 48] за отдельными исключениями. Однако при предписанных вариациях солнечной радиации в МЗС вполне удастся воспроизвести вынужденное потепление 1940-х годов с последующим похолоданием до 1970 г. [64].

Анализ современных изменений климата на территории Северной Евразии, выполненный по данным стационарных наблюдений [17; 18; 21; 22], показал значимые региональные особенности климата, связанные с влиянием Северной Атлантики. Оценки этого влияния на изменение регионального климата в Евразии [23; 24; 61] показали, что примерно половину потепления в Северном полушарии за последние 30 лет обусловили изменения в Северной Атлантике.

Несмотря на обширные научные данные о происходящих и прогнозируемых климатических изменениях, сохраняется значительная неопределенность в оценках того, как именно будут протекать климатические изменения. Снижение существующего уровня неопределенности оценок будущих изменений климата и их последствий для России остается неизменным приоритетом климатических исследований.

Проявления квазишестидесятилетних колебаний климата

Шестидесятилетние колебания климата проявляются в поведении многих климатических индексов, таких как Североатлантическое колебание (САК), Атлантическая мультидекадная осцилляция (АМО), Тихоокеанская декадная осцилляция, а также других характеристик климата (см., например, [8; 12; 43; 45; 55]).

В работах [1; 13] отмечается, что во внутривековых температурных региональных (в частности, в Северной Атлантике и атлантическом секторе Арктики), полушарных и глобальных изменениях, а также в изменениях ледовитости арктических морей значительно проявляются вариации с периодом около шести десятилетий — они характерны для АМО, связанной, в свою очередь, с термохалинной циркуляцией океана. В [8; 14; 44; 45; 55] показано, что именно океан ответственен за формирование долгопериодных мультидекадных осцилляций. И главную роль в этом процессе в Северной Атлантике играет термохалинная циркуляция (АТХЦ), характеризующаяся индексом интенсивности Атлантической меридиональной циркуляции (АМЦ) [8; 14; 55; 45]. Поэтому приведем здесь проявление квазишестидесятилетних колебаний в других характеристиках климатических изменений в Северной Атлантике, полученных при моделировании общей циркуляции океана с помощью модели INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [8; 10; 32; 33].

В [8] было показано, что значения временного хода среднегодового индекса АМО за 1948—2009 гг. по данным наблюдений (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.us.long.data>) и по результатам модельных расчетов INMOM хорошо согласуются между собой, что свидетельствует о возможности использовать результаты модельных расчетов для оценки климатической изменчивости циркуляции Северной Атлантики (рис. 2). В индексе АМО хорошо проявляется 60-летнее колебание. В [8; 14; 33] показано, что основным фактором, который формирует это колебание, являются изменения интенсивности АМЦ (рис. 3). Именно за счет АМЦ формируется меридиональный перенос тепла (МПТ) в океане, являющийся главным климатообразующим фактором климатической системы Земли. Поэтому в Атлантике МПТ также испытывает это колебание, поскольку формируется главным образом за счет АМЦ.

Важным фактором климатического воздействия Атлантического океана на Северную Евразию, включая Арктику, является западный атмосферный перенос тепла и влаги [17; 21]. Интенсивность этого переноса должна быть напрямую связана с величиной результирующего потока тепла между океаном и атмосферой. Величина результирующего потока тепла между Атлантикой и атмосферой по результатам модельных расчетов INMOM (рис. 4) колеблется от 14 до 21 Вт/м², достигая максимума в середине 1990-х годов. Результаты моделирования хорошо согласуются с данными наблюдений

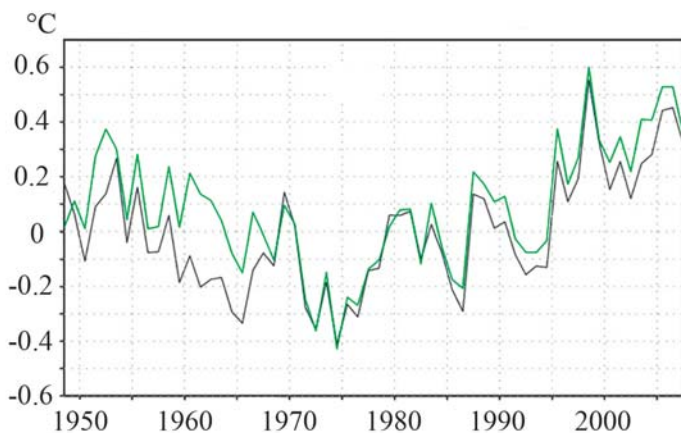


Рис. 2. Временной ход среднегодового индекса AMO за 1948–2007 гг. (°C) по данным наблюдений (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.us.long.data>) (зеленая кривая) и по результатам модельных расчетов по INMOM (черная кривая) [8; 10]

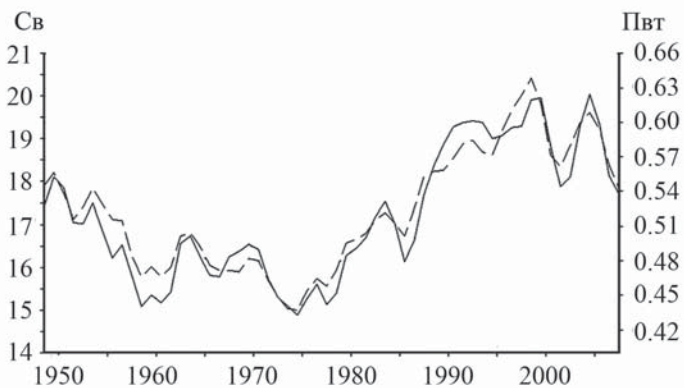


Рис. 3. Временная эволюция среднегодового максимума меридиональной функции тока (индекса интенсивности AMЦ) (шкала Св слева, сплошная линия) и меридионального переноса тепла, среднего в полосе 30–60° с. ш. (шкала ПВт справа, пунктир) в Северной Атлантике по результатам расчетов по INMOM

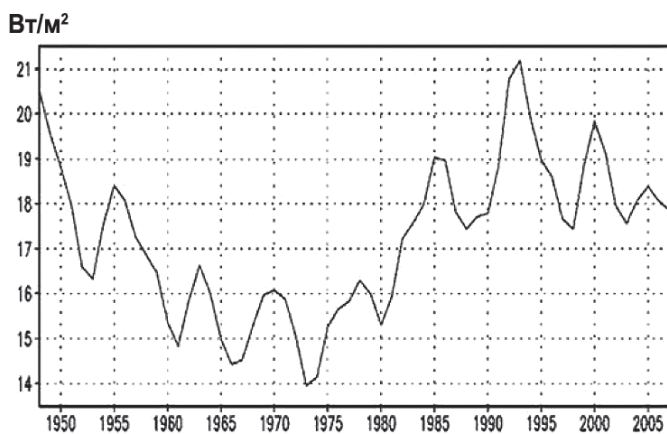


Рис. 4. Вариации результирующего среднегодового потока тепла между океаном и атмосферой (Вт/м²) по результатам расчетов по INMOM за периоды 1948–2009 гг. в полосе 30–60° с. ш. в Северной Атлантике [8]

(рис. 5) [44]. Это согласование тем более ценно, что получено абсолютно разными способами и подтверждает возможность использования модели общей циркуляции океана (МОЦО) для исследования климатических изменений.

Изменчивость результирующего потока тепла между Северной Атлантикой и атмосферой, также как и AMЦ, характеризуется на фоне квазишестидесятилетнего колебания и значительными декадными колебаниями. Оценка зон влияния Северной Атлантики на Евразию, включая северную полярную зону, сделанная ранее [21] с помощью корреляционного анализа между зимними значениями температуры воздуха и зимними значениями индекса САК при разных тенденциях в изменении индексов АТХЦ и МПТ, свидетельствует о непосредственном влиянии последней на вариации там климата.

Изменчивость результирующего потока тепла между Атлантикой и атмосферой, показанного на рис. 4 и 5, отражает его интенсификацию в последние десятилетия XX в. от 14 до 21 Вт/м², что способствовало быстрому потеплению в западном секторе Арктики [36] и, соответственно, увеличению продолжительности навигационного периода Северного морского пути.

Следует отметить, что такой увеличившийся поток тепла из океана вместе с ростом температуры его поверхности должен был увеличить и испарение с поверхности. В свою очередь, последнее должно было способствовать увеличению с середины 1970-х годов транспорта влаги из Северной Атлантики в Евразию и, следовательно, заметному росту уровня Каспийского моря в конце XX в. [20]. Очевидно, что влияние Атлантики на изменение уровня Каспийского моря происходит в конечном счете за счет переноса влаги с акватории Северной Атлантики в регион водосбора Каспийского моря. Количество переносимой влаги находится в прямой зависимости как от количества самой влаги над Северной Атлантикой, так и от скорости и направления ее переноса. В [6; 19] показана согласованность уровня режима Каспийского моря с транспортом влаги. Периоды падения и подъема уровня Каспия полностью согласуются с аналогичными периодами в интенсивности транспорта влаги над бассейном Каспийского моря. Момент смены тенденций, происходящий на 1978 г., совпадает с точностью до года. И, что важно, смена тенденций в транспорте влаги в бассейне водосбора

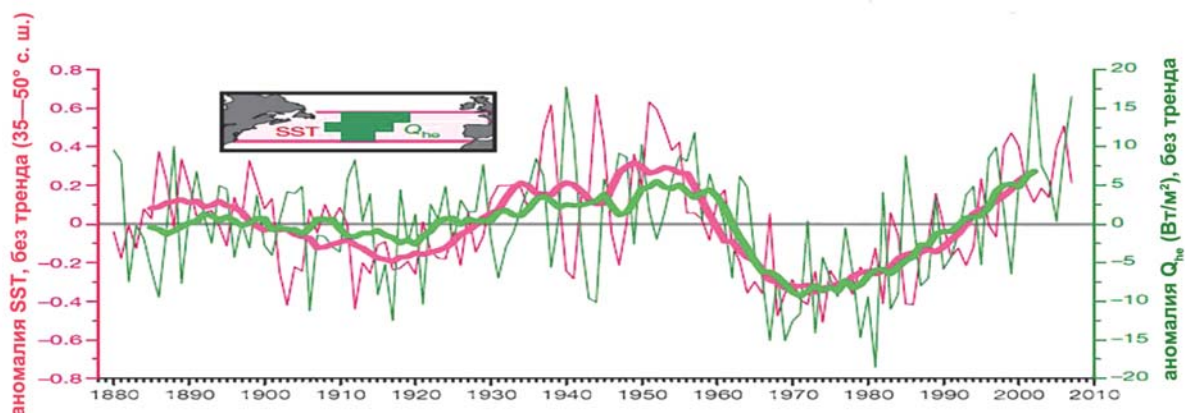


Рис. 5. 128-летняя реализация индекса АМО по данным HadISST1 для области 35–50° с. ш. (красные линии) и аномалии турбулентного потока скрытого тепла на поверхности Q_{he} (зеленые линии), осредненные по области к юго-востоку от Ньюфаундленда в области, отмеченной зеленым цветом с исключенным трендом [44]. Тонкие кривые – среднегодовые значения, толстые – сглаженные по 11 годам

Каспийского моря с подъема на падение также согласуется с изменением потока тепла с поверхности моря в Северной Атлантике (рис. 6).

Таким образом, можно констатировать, что природа колебаний уровня Каспийского моря обусловлена сменой тенденций в транспорте влаги с Атлантики в бассейн его водосбора. По результатам расчетов циркуляции Мирового океана также выявлено заметное падение интенсивности АМЦ к концу XX в., которое проявляется также и для эволюции МПТ в океане [8; 20], результирующего потока тепла между Северной Атлантикой и атмосферой (см. рис. 3). Значения изменчивости указанных индексов, транспорта влаги и уровня Каспийского моря характеризуются значительными долгопериодными колебаниями и хорошо согласуются между собой. Это дает основание использовать данную информацию для оценки непосредственного влияния изменения климата Северной Атлантики на вариации климата в Северной Евразии и Арктике.

По крайней мере активизация таяния льда в Арктике в 1970–1990-х годах согласуется с ростом индексов АМО, АМЦ и связанных с ним роста МПТ и высвобождения тепла из Северной Атлантики (см. рис. 2, 3 и 4).

Заметим, что по результатам расчетов циркуляции Мирового океана (см. рис. 3 и 5) с середины 1990-х годов прекратился рост интенсивности АМЦ и результирующего потока тепла между океаном и атмосферой, и наметилась тенденция к падению к началу XXI в. Такое же поведение проявляется и в эволюции индекса АМО начиная с конца 1990-х годов (см. рис. 2). Это изменение тенденций индексов АМЦ и АМО в конце XX в. может свидетельствовать о предстоящей смене тенденций в ледовитости Арктики, а начавшееся снижение интенсивности указанных индексов к началу XXI в. — о возможном похолодании в западной Арктике, что неизбежно должно привести и к уменьшению

продолжительности навигационного периода Северного морского пути.

Все эти факты представляются важными, так как позволяют рассматривать индексы атмосферной и океанической циркуляции в качестве предикторов для прогнозирования климатических изменений Северной Полярной зоны на ближайшую перспективу.

Физико-статистический прогноз климатических изменений в Арктике на период 2010–2071 гг. на основе данных 1948–2009 гг. COREII

Важнейшая особенность климата Арктики в прошедшем столетии — его неоднократные изменения. Объяснения вариации векового хода региональной температуры пока не существует. По крайней мере при моделировании климата Арктики смену направления тенденций температуры в XX в. не воспроизводят и признанные МЗС из списка МГЭИК. Существует также термин арктического усиления потепления (см., например, [5; 9; 47; 48] и др.). Поэтому в данной работе мы используем подход расчета прогностических изменений в океане с помощью модели INMOM, которая, как показано выше, воспроизводит ретроспективные климатические изменения. Для этого необходимо рассчитать прогностическое воздействие на океан.

С этой целью нами согласно формуле (1) был построен прогноз приповерхностных характеристик циркуляции атмосферы на 2010–2071 гг. по данным 1948–2009 гг. из базы CORE (Datasets for Common Ocean-ice Reference experiments) за 1948–2009 гг. [40]. Эти данные [53], основанные на реанализе NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research), характеризуются высоким качеством, достоверностью и сбалансированностью (что особенно важно для приходящей к поверхности Земли радиации), так как специально

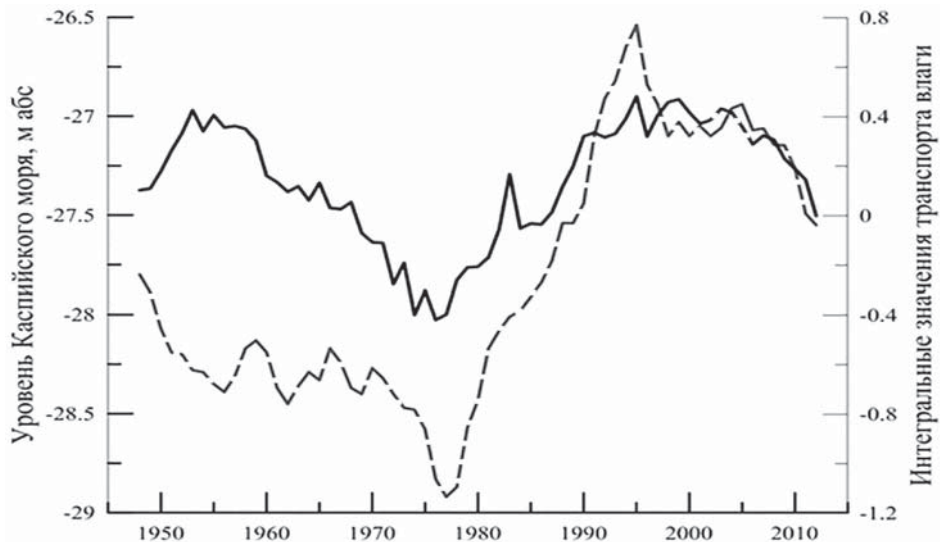


Рис. 6. Среднегодовые значения уровня Каспийского моря (пунктир) и интегральные значения среднегодового транспорта влаги для региона, ограниченного 35° и 57,5° в. д. (сплошная линия) согласно [19]

подготовлены для использования в моделях общей циркуляции океана.

Для построения прогноза были выбраны все поля приповерхностных характеристик, необходимые при задании атмосферного воздействия для МОЦО, которые включают в себя температуру и влажность воздуха, скорость ветра (все на высоте 10 м), атмосферного давления на уровне моря (временной интервал 6 ч), среднесуточную длинноволновую и коротковолновую радиацию, среднемесячные атмосферные осадки и сток рек. Для удобства исключаем из них внутrigодовую изменчивость, получая набор среднегодовых двумерных глобальных полей $F_{\theta}(\lambda, \varphi, t)$, зависящих от долготы λ , широты φ и времени t из интервала 1948—2009 гг. Выделим из исходных данных две основные составляющие:

линейный тренд $F_{\theta}^{\text{lin}} = A_{\theta} + B_{\theta}t$;

60-летние колебания $F_{\theta}^{\text{cos}} = C_{\theta} \cos \frac{2\pi}{T}(t - t_0) + D_{\theta}$,

где $T = 60$ лет — принятая оценка периода циклических климатических колебаний согласно [17]; t_0 — момент времени, соответствующий 2000 г., когда наблюдался максимум 60-летнего колебания; коэффициенты A_{θ} , B_{θ} , C_{θ} и D_{θ} являются также двумерными полями, характеризующими каждый узел расчетной сетки в пространстве по отдельности, и рассчитываются по методу наименьших квадратов; θ — физический параметр (из списка, приведенного в предыдущем абзаце), для которого строится приближение.

Тогда основную тенденцию климатических долгопериодных изменений данных по времени можно представить как сумму линейного тренда и косинусоиды $F_{\theta} = F_{\theta}^{\text{lin}} + F_{\theta}^{\text{cos}}$, которую, исходя из ее смысла, можно назвать несущей функцией.

Описанный здесь метод климатического прогноза тенденций приповерхностных характеристик атмосферы можно применять не единственным способом. Например, можно сначала приблизить данные линейной функцией, затем вычесть из них эту функцию, а остаток приблизить косинусоидой. Можно, наоборот, сначала найти косинусоиду, и после ее вычитания — линейный тренд¹. Были реализованы оба способа, в результате чего были рассчитаны тенденции соответственно F_{θ}^1 и F_{θ}^2 . Общая тенденция рассчитывалась как линейная комбинация этих тенденций:

$F_{\theta} = \frac{1}{2}F_{\theta}^1 + \frac{1}{2}F_{\theta}^2$, которая показала наилучший результат.

После построения прогностических долгопериодных тенденций в полях исходных приповерхностных характеристик необходимо было добавить к ним их межгодовую и сезонную изменчивость для дальнейшего использования в качестве прогностического форсинга для модели океана. За неимением лучшего эта изменчивость переносилась на 2010—2071 гг. в виде аномалий из исходных рядов за 1948—2009 гг., что позволяет сохранить исходные статистические свойства сезонной и межгодовой изменчивости. На рис. 7 показаны примеры комбинированного сценария климатических изменений в XX в. и их прогноз в XXI в. для зонально-осредненной приповерхностной среднемесячной температуры воздуха для низких (0—30° с. ш.), средних (30—60° с. ш.) и высоких широт (60—90° с. ш.). Сравнительная оценка точности предложенной аппроксимации долгопериодных тенденций при разных вариантах

¹ Можно также одновременно рассчитывать приближение по линейной и колебательной компонентам. Однако этот метод показал наихудший результат.

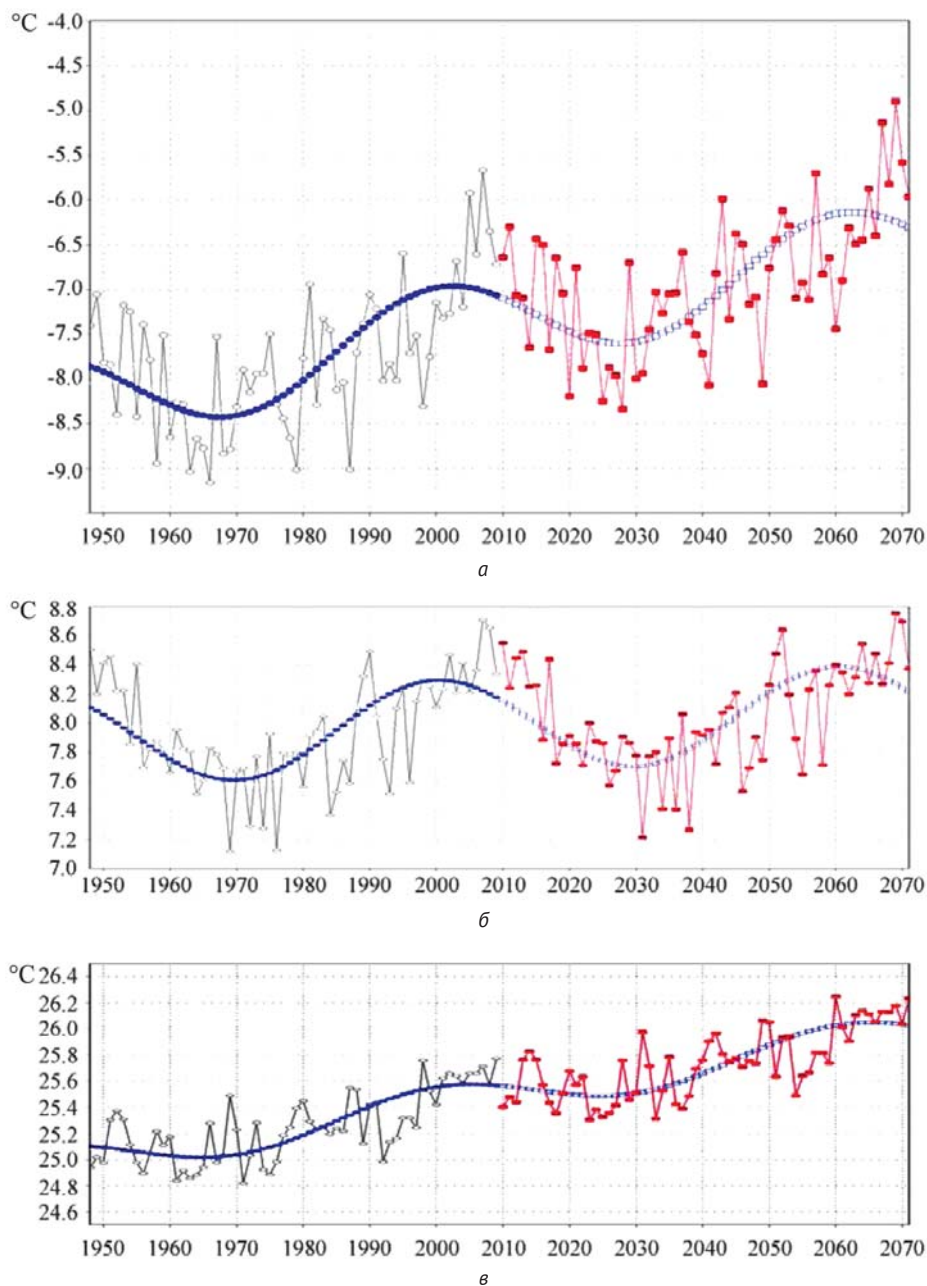


Рис. 7. Примеры комбинированного сценария климатических изменений в XX в. и их прогноз в XXI в. зонально-осредненной приповерхностной среднемесячной температуры воздуха для высоких (60–90° с. ш.) (а), средних (30–60° с. ш.) (б) и низких (0–30° с. ш.) (в) широт. С 1948 по 2009 гг. — реальные данные (черная линия), с 2010 по 2070 гг. — полученный прогноз (красная линия), несущая функция F_T — синяя линия

в полосе 60–90° с. ш. для приповерхностной температуры, показанная на рис. 8, свидетельствует о правомерности нашего подхода: наилучшее приближение дает комбинированный сценарий.

Необходимо отметить, что выверенные данные по воздействию атмосферы на океан из базы данных CORE имеются только за 1948–2009 гг. Поэтому можно оценить, как предложенная методика работает на прогноз с 2010 по 2015 гг. Для этого на рис. 9 показано, как построенный нами прогноз изменения

температуры в Северном полушарии согласуется с ее реальным ходом. Здесь мы использовали независимый, отличный от CORE массив приповерхностной температуры [65]. По этому рисунку видно, что, с одной стороны, различные массивы данных наблюдений уже имеют отличия в ретроспективном плане, а с другой — он показывает успешность прогноза на 2010–2015 гг., которая укладывается в 90%-ный доверительный интервал изменчивости температуры. Во временном ходе приповерхностной температуры

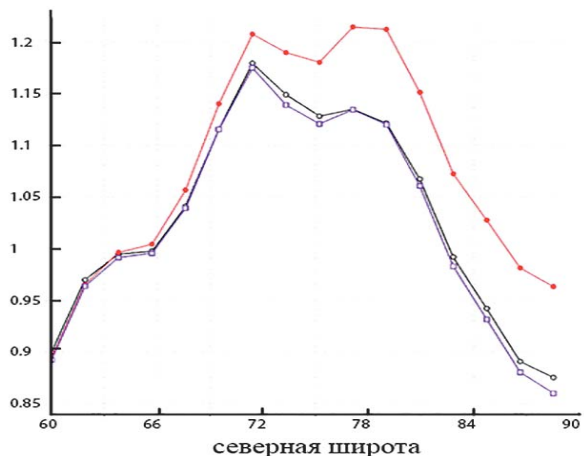


Рис. 8. Зонально-средненные среднеквадратические отклонения приповерхностной температуры воздуха по разным вариантам прогноза в полосе 60–90° с. ш. Черная линия – линейный тренд вычисляется первым (F_T^1), красная линия – косинусоида первая (F_T^2), фиолетовая линия – комбинированный сценарий (F_T)

начиная с 2000-х годов отчетливо проявляется хорошо известное замедление потепления (warming hiatus) (см. рис. 1, 7 и 9), которое как раз и определяется 60-летней цикличностью климатических изменений. Анализ результатов расчетов по реализованному сценарию показал, что в целом в Арктическом регионе в ближайшие 15 лет (до 2030 г.) ожидается понижение среднегодовой температуры на 0,7°C. При этом в отдельные годы (2025–2030 гг.) снижение среднегодовой температуры может достигать 1,3–1,5°C. Затем до 2070 г. может происходить даже более стремительное повышение температуры воздуха, чем было в конце XX в.

Далее с использованием всех построенных полей приповерхностных характеристик, необходимых для задания атмосферного воздействия для МОЦО, был проведен расчет циркуляции Мирового океана

с помощью МОЦО INMOM. В этой модели на основе полной системы уравнений гидротермодинамики океана рассчитываются все параметры циркуляции и термодинамического состояния вод океана включая динамику и термодинамику морского льда [9]. Мы не будем здесь приводить ее описание, поскольку оно выполнено в ряде работ [8–10; 32; 33; 35; 38], где она использовалась в том же варианте. Следует отметить, что эта версия INMOM также служит океаническим компонентом в модели земной системы [3–5], созданной в Институте вычислительной математики (ИВМ) РАН и участвующей в программе CMIP [30] под эгидой МГЭИК по прогнозированию изменений климата, кроме того, она использовалась в экспериментальной модели долгосрочного прогноза Гидрометцентра РФ [25].

В соответствии с целью статьи ниже приводятся результаты для Арктического бассейна, полученные с помощью расчетов по INMOM. На рис. 10а и 10б показаны рассчитанные и наблюдаемые временные эволюции площади морского льда в Арктике с 1948 по 2070 г. В период 1979–2014 гг. результаты хорошо согласуются с данными наблюдений из National Snow and Ice Data Center (NSIDC) [57]. Значительное рассогласование модельных величин и данных наблюдений для марта до 1987 г. на рис. 10а вызвано тем, что до этого года лед Охотского моря не учитывался в наблюдениях, а затем его площадь присовокуплялась к площади льда Северного Ледовитого океана (СЛО). Отсюда для площади сентябрьского льда (см. рис. 10б) этого рассогласования нет, так как в это время Охотское море свободно ото льда.

На рис. 10в видно хорошее согласование рассчитанных и наблюдаемых площадей морского льда в Арктическом бассейне. Детрендрованная корреляция наблюдаемой и рассчитанной площадей морского льда для марта составляет 0,81, а для сентября — 0,87 (с трендами эти значения были бы еще выше), что является очень неплохим показателем воспроизведения не только трендов,

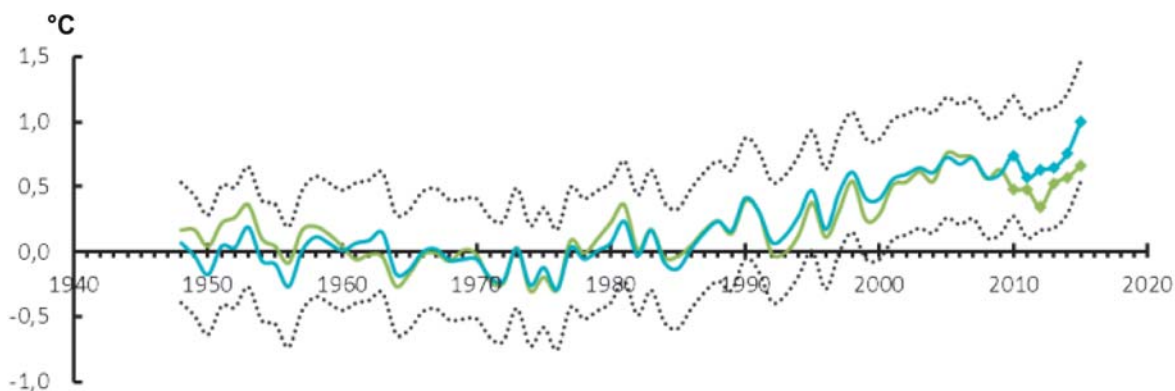


Рис. 9. Значения изменения температуры воздуха (аномалии) в Северном полушарии по данным CORE (зеленая линия) и ход температуры воздуха по данным наблюдений [65] (голубая линия). Черный пунктир – доверительный интервал 90%-ной обеспеченности. Голубые ромбы – точки, не участвовавшие в построении прогноза, поскольку прогноз строился по данным 1948–2009 гг. Зеленые ромбы – результаты комбинированного прогноза за 2010–2015 гг.

но и межгодовой изменчивости ледового покрова СЛО. Отметим, что нельзя предсказать поведение интегральных характеристик морского льда для летнего периода, основываясь на их значениях для зимнего периода, — достаточно сравнить площадь морского льда для 2006 и 2007 гг. на рис. 10а и 10б [10].

На рис. 10 показано, как ближе к 2020-м годам смену тенденций в ледовитости с падения на рост до середины 2030-х. А далее опять происходит быстрое уменьшение площади морского льда в Арктике. Такое поведение ледовитости находится в полном соответствии с ходом приповерхностной температуры в высоких широтах (см. рис. 7а), когда имеет место падение температуры с начала 2020-х по середину 2030-х годов. Также можно заметить, что рост площади льда в 2020—2030 гг. весьма значителен, и на 2026 г. почти соответствует состоянию, наблюдавшемуся при локальном похолодании 1970-х. При этом средняя температура локального похолодания 1960-х годов была приблизительно на 1,5°C ниже, чем в 2020-х годах. Таким образом, обнаружен нелинейный эффект в эволюции льда в Арктике, когда при значительно разных климатических ситуациях площадь льда в Арктике сравнима. Этот эффект требует в будущем особого изучения.

Тенденции изменения ледовитости СЛО (см. рис. 10) находятся в противофазе с вариациями АМЦ и индекса АМО (см. рис. 2 и 3). Снижение активности термохалинной циркуляции в Северной Атлантике в период с 1948 г. до середины 1970-х годов согласуется с ростом ледовитости СЛО в этот период. Рост интенсивности АМЦ с середины 1970-х годов до конца столетия сопровождается уменьшением площади морского льда СЛО.

На рис. 11 и 12 показаны детализированные прогностические изменения во времени общей площади льда в Арктике для марта и сентября — в периоды ее

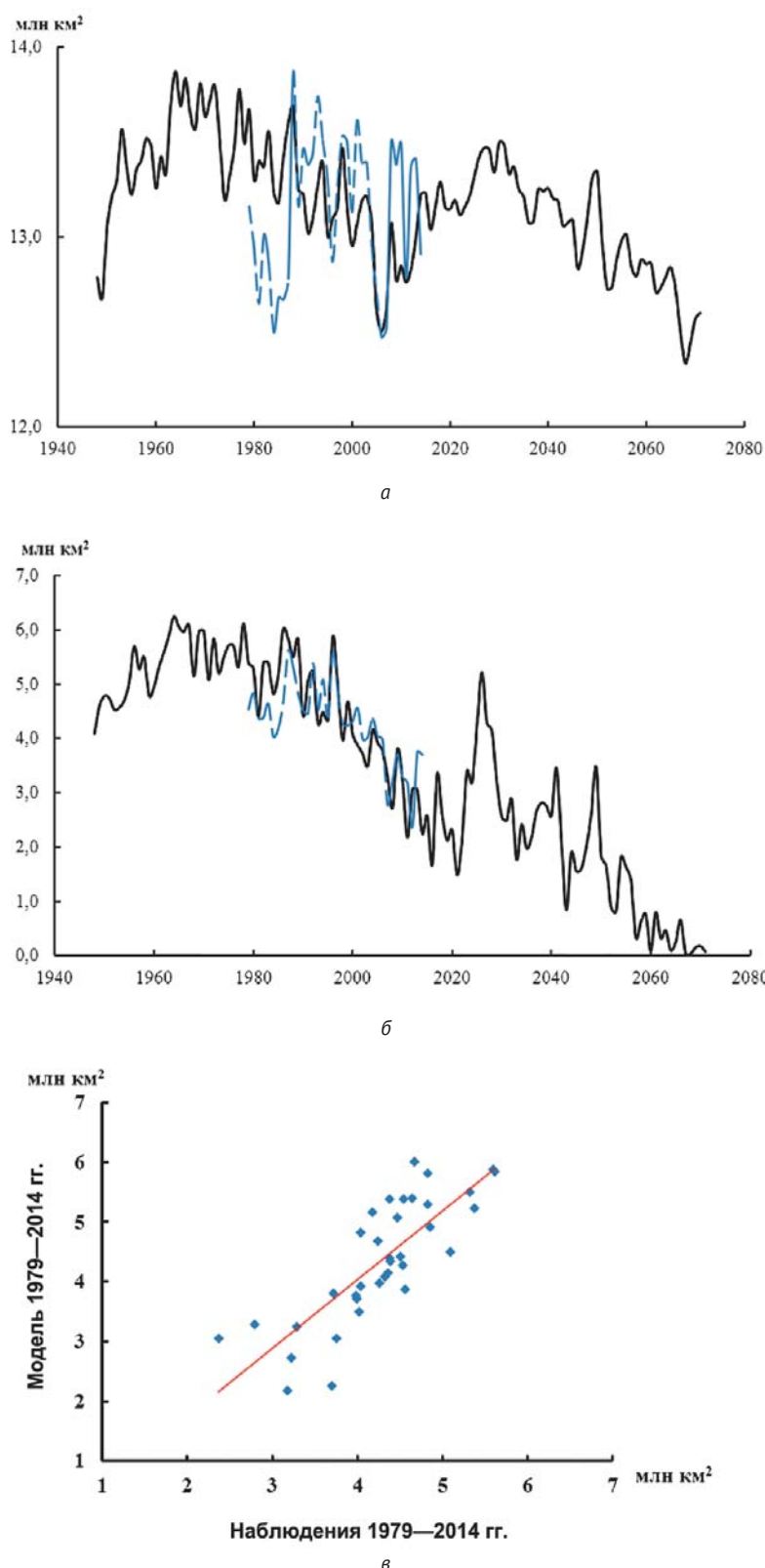


Рис. 10. Результаты расчетов по INMOM площади арктического льда в марте и сентябре (комбинированный сценарий) с 1948 до 2070 г. (черная линия) и данные наблюдений Goddard [57] в период с 1979 по 2014 гг. Синяя линия: пунктир — 1979—2007 гг., сплошная линия — 2008—2014 гг. (а — для марта, б — для сентября); в — сопоставление результатов моделирования концентрации арктического льда (комбинированный сценарий) с данными наблюдений в сентябре в 1979—2014 гг.

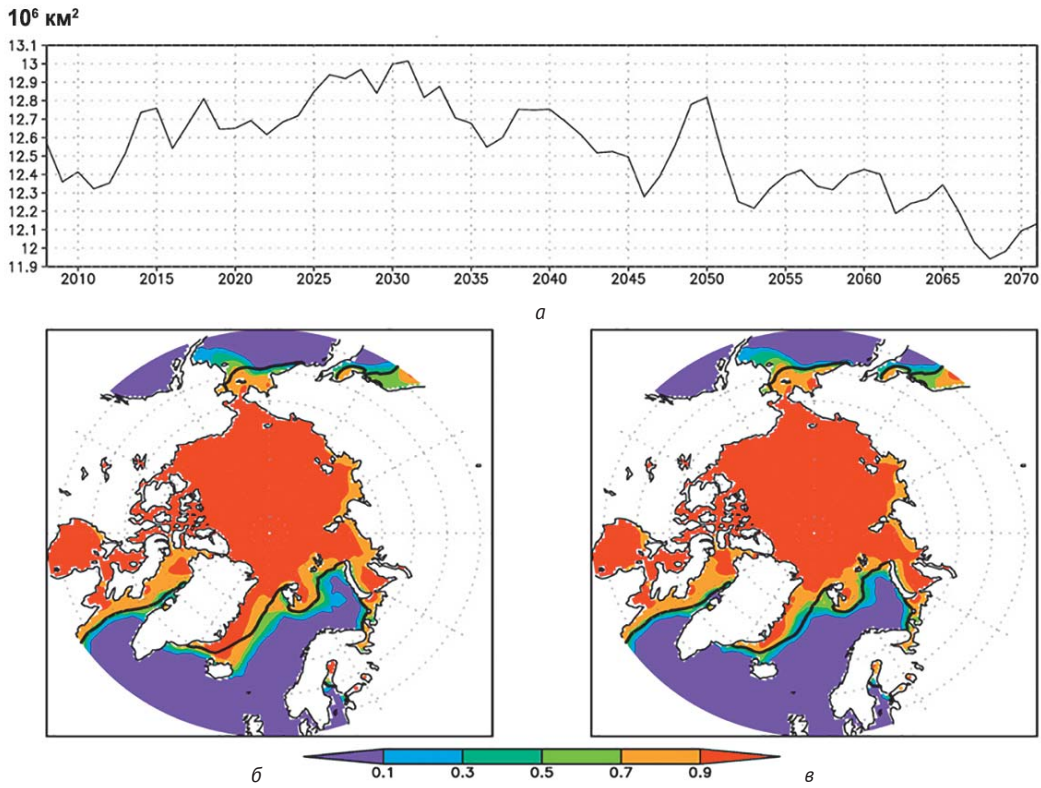


Рис. 11. Прогноз площади льда (а) в Арктике для марта (вверху). Внизу показаны поля характерной сплоченности морского льда в Арктике за март в период его прогнозируемого увеличения до 2030-х годов: для 2022 г. (а) и 2030 г. (б). Черной линией показана среднеклиматическая мартовская граница льдов по результатам расчетов за 1998–2007 гг.

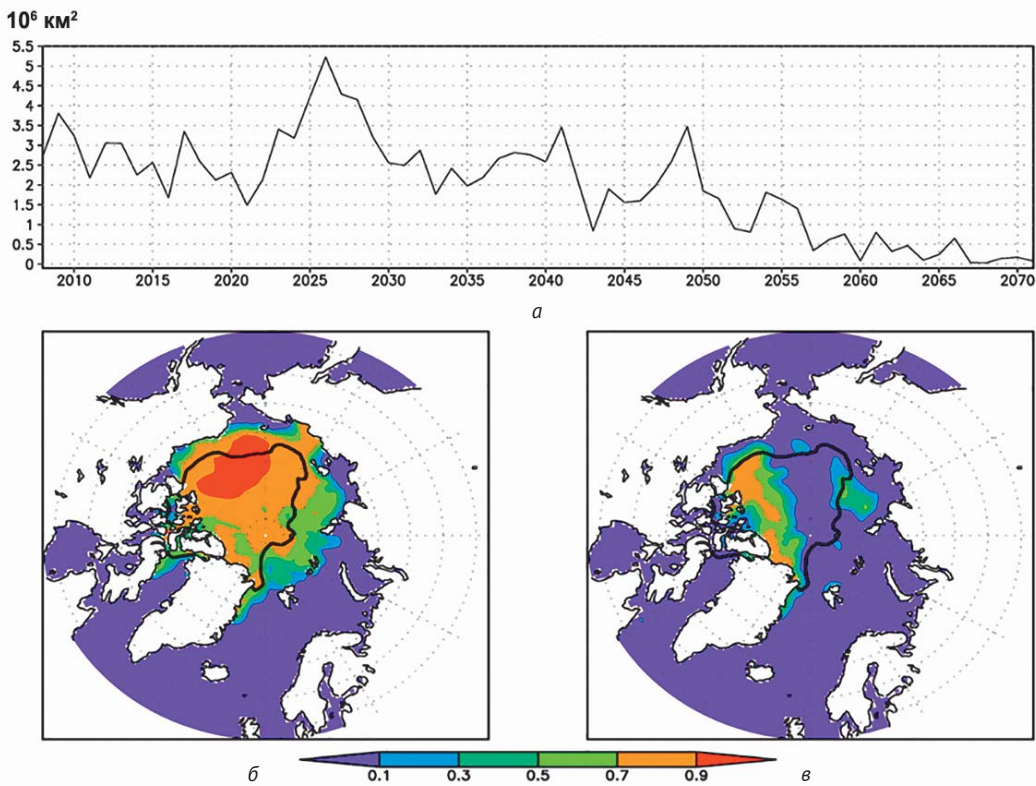


Рис. 12. То же, что и на рис. 11, но для сентября, и в качестве характерных лет выбраны 2021 г. (а – минимум в период роста) и 2026 г. (б – максимум)

максимальных и минимальных значений в годовом ходе. По ним можно судить, как происходит рост, а затем падение прогностических величин. Видно, что зимнее распределение льда происходит более плавно, чем летнее, на которое оказывает большое воздействие межгодовая изменчивость. На этих же рисунках показаны поля характерной сплоченности морского льда в Арктике в период его прогнозируемого увеличения до 2030-х годов. Из них видно, что зимнее покрытие льдом будет ненамного превышать настоящую климатическую норму. А для летнего состояния Арктического льда эти поля подвержены межгодовой изменчивости и могут быть как значительно больше, так и значительно меньше современной климатической нормы.

Заклучение

Предлагается комбинированный сценарий оценок климатических изменений в Арктике, базирующийся на композиции «парникового» (внешнее воздействие) и «циклических» (внутренняя изменчивость климатической системы) эффектов. Численные эксперименты по воспроизведению термохалинной циркуляции Атлантического океана и концентрации арктического льда, исследование циклических особенностей их климата позволили по-новому подойти к описанию климатической изменчивости Арктики, Северного морского пути и др. Этот подход позволяет дать описание не только роста температуры, вызванного эмиссией парниковых газов, но и изменчивости климата (в частности, наблюдавшегося похолодания в 1950—1970-х годах). Показано, что рост интенсивности АМЦ в последние три десятилетия XX в. наряду с антропогенным воздействием мог способствовать значительному потеплению в Арктике. Эти изменения, по-видимому, привели и к увеличению продолжительности навигационного периода СМП.

Изменчивость индексов АМО (см. рис. 2), а также индекса интенсивности АМЦ и связанного с ним результирующего потока тепла между Северной Атлантикой и атмосферой (см. рис. 3) характеризуется значительными долгопериодными колебаниями, что дает основание использовать эти индексы для оценки непосредственного влияния изменения климата Северной Атлантики на вариации климата в Северной Евразии и Арктике. По крайней мере активизация таяния льда в Арктике в 1970—1990-х годах согласуется с ростом этих индексов. Следует также отметить, что эти индексы хорошо описывают с некоторым опережением и изменение уровня Каспийского моря [19].

Проведенные исследования свидетельствуют о возможном похолодании в Арктике и соответствующем снижении продолжительности навигационного периода Северного морского пути в 2020—2030-х годах. При этом поведение ледовитости в Арктическом бассейне находится в полном соответствии с ходом приповерхностной

температуры в высоких широтах (см. рис. 7а), когда имеет место падение температуры с начала 2020-х по середину 2030-х годов. Также можно заметить, что рост площади льда в 2020—2030 гг. весьма значителен и на 2026 г. почти соответствует состоянию, наблюдавшемуся при локальном похолодании 1970-х. При этом средняя температура локального похолодания 1960-х годов приблизительно на 1,5°C была ниже, чем в 2020-х годах. Таким образом, обнаружен нелинейный эффект в эволюции льда в Арктике, когда при значительно разных климатических ситуациях площадь льда в Арктике сравнима. Этот эффект требует особого изучения в будущем.

Ограничение потепления в 2100 г. примерно до 1—2°C по сценарию выбросов RCP2.6 [48] может помочь стабилизировать ледовую обстановку на сегодняшнем уровне. Сценарий RCP8.5 (потепление примерно на 4°C) может привести к сезонному освобождению Арктики ото льда к концу нынешнего века. Наш прогноз показывает увеличение ледовитости примерно до 7106 км² к 2030-м годам. Далее ледовитость немного снизится до 5106 км² к 2040—2050-м годам, и произойдет ее стабилизация на уровне до 2106 км² после 2060 г.

В последние несколько лет в рамках Экспертного совета по Арктике и Антарктике при Совете Федерации ведется работа по законодательному закреплению СМП в качестве национальной транспортной магистрали России. В результате разрабатывается логистическая модель, обеспечивающая использование СПМ круглогодично. Теоретические исследования продолжительности навигационного периода СМП в XXI в. (при степени покрытия акватории льдом (концентрации морских льдов) менее 15%), выполненные в серии работ [13; 15; 16] по результатам с ансамблями прогностических расчетов по современным климатическим МЗС в рамках международного проекта CMIP5 [30] при сценарии умеренных антропогенных воздействий RCP 4.5 [48] показали, что к концу XXI в. продолжительность навигационного периода может составить около пяти месяцев. Активизация данной деятельности в Совете Федерации, очевидно, связана с выводами в ряде работ отечественных и зарубежных ученых о том, что климатические изменения в Арктике уже достигли порогового значения, при котором могут происходить необратимые процессы, и следует ожидать в ближайшие годы полного таяния льда в летний сезон [54]. Представленные нами исследования изменений климатической системы в арктической области, важным элементом которой служит ледяной покров, не дают оснований для столь категоричных выводов.

Похолодание Арктики в 1950—1970-х годах также происходило при снижении интенсивности АМЦ в тот период. Начавшееся снижение интенсивности термохалинной циркуляции в Атлантике, выраженное в уменьшении индекса АМЦ в начале XXI в., указывает на возможность грядущего похолодания

в Арктике и соответствующего сокращения продолжительности навигационного периода Северного морского пути в ближайшие 10—20 лет. По крайней мере сценарий изменений ледовитости Арктики показывает это. В то же время начиная приблизительно с 2035 г. вплоть до 2070 г. опять начнется потепление, причем более стремительное, чем было в конце XX в.

Основная часть работы выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 15-05-03127, 15-05-07539, 16-05-00534. Численные эксперименты с моделью INMOM выполнены в ИВМ РАН при поддержке РНФ (грант № 14-27-00126). Расчет переноса влаги из Атлантики в Евразию выполнен в Институте водных проблем РАН при поддержке РНФ (грант № 14-17-00740).

Литература

1. Алексеев Г. В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундам. и прикладная климатология*. — 2015. — № 1. — С. 11—26.
2. Бышев В. И., Нейман В. Г., Романов Ю. А., Серых И. В. О глобальном характере явления Эль-Ниньо в климатической системе земли // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. — 2011. — Т. 8, № 4. — С. 200—208.
3. Володин Е. М., Галин В. Я., Грицун А. С. и др. Математическое моделирование Земной системы / Под ред. Н. Г. Яковлева. — М.: МАНС Пресс, 2016. — 328 с.
4. Володин Е. М., Дианский Н. А., Гусев А. В. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM 4.0 // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. — 2010. — Т. 46, № 4. — С. 448—466.
5. Володин Е. М., Дианский Н. А., Гусев А. В. Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX—XXI веках с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. — 2013. — Т. 49, № 4. — С. 379—400.
6. Выручалкина Т. Ю., Филатов Н. Н., Дианский Н. А., Гусев А. В. О прогнозе многолетних изменений уровня крупных озер // *Тр. Карел. науч. центра РАН*. — 2016. — № 9. — С. 3—16.
7. Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Рочева Э. В. Изменение климата на территории России: температура воздуха и атмосферные осадки // *Изменение окружающей среды и климата, природные и связанные с ними техногенные катастрофы*. — Т. 6. — М., 2008. — С. 11—23.
8. Гусев А. В., Дианский Н. А. Воспроизведение циркуляции Мирового океана и ее климатической изменчивости в 1948—2007 гг. с помощью модели INMOM // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. — 2014. — Т. 50, № 1. — С. 3—15.
9. Дианский Н. А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. — М.: Физматлит, 2013. — 272 с.
10. Дианский Н. А., Гусев А. В. Моделирование процесса изменения климата и современного замедления глобального потепления с помощью модели INMOM // *Фундам. и прикладная климатология*. — 2015. — № 1. — С. 96—118.
11. Катцов В. М., Порфирьев Б. Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // *Арктика: экология и экономика*. — 2012. — № 2 (6). — С. 66—79.
12. Кляшторин Л. Б., Любушин А. А. Циклические изменения климата и рыбопродуктивности. — М.: Изд-во ВНИРО, 2005. — 258 с.
13. Мохов И. И. Современные изменения климата в Арктике // *Вестн. РАН*. — 2015. — Т. 85, № 5—6. — С. 478—484.
14. Мохов И. И., Семенов В. А., Хон В. Ч. и др. 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.
15. Мохов И. И., Хон В. Ч. Продолжительность навигационного периода и ее изменения для Северного морского пути: модельные оценки // *Арктика: экология и экономика*. — 2015. — № 2 (18). — С. 88—95.
16. Мохов И. И., Хон В. Ч., Прокофьева М. А. Новые модельные оценки изменений продолжительности навигационного периода для Северного морского пути в XXI веке // *Докл. РАН*. — 2016. — Т. 468, № 6. — С. 699—704.
17. Панин Г. Н. Об изменениях климата в полярных зонах Земли в XX и XXI столетиях // *Докл. Акад. наук*. — 2009. — Т. 427. — С. 397—402.
18. Панин Г. Н., Выручалкина Т. Ю., Соломонова И. В. Вариации климата Северной Евразии в последней четверти XX века // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. — М., 2011. — С. 99—115.
19. Панин Г. Н., Выручалкина Т. Ю., Соломонова И. В. Климатические изменения в Арктике, Северной Атлантике, районе Каспия и их взаимосвязь // *Фундам. и прикладная климатология*. — 2015. — № 1. — С. 183—210.
20. Панин Г. Н., Дианский Н. А. Климатические изменения в Арктике, Северной Атлантике и Северный морской путь // *Докл. Акад. наук*. — 2015. — Т. 462, № 2. — С. 217—222.
21. Панин Г. Н., Соломонова И. В., Выручалкина Т. Ю. Климатические тенденции в средних и высоких широтах Северного полушария // *Вод. ресурсы*. — 2009. — Т. 36, № 6. — С. 743—756.
22. Попова В. В., Шмакин А. Б. Динамика климатических экстремумов в Северной Евразии в конце XX века // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. — 2006. — Т. 42, № 2. — С. 157—166.
23. Семенов В. А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // *Докл. РАН*. — 2008. — Т. 418, № 1. — С. 106—109.

24. 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.
25. Толстых М. А., Дианский Н. А., Гусев А. В., Киктев Д. Б. Воспроизведение сезонных аномалий атмосферной циркуляции при помощи совместной модели атмосферы и океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2014. — Т. 50, № 2. — С. 131—142.
26. Bekryaev R. V., Polyakov I. V., Alexeev V. A. Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming // *J. Climate*. — 2010. — Vol. 23. — P. 3888—3906.
27. Boykoff M. T. Media discourse on the climate slowdown // *Nature Climate Change*. — 2010. — Vol. 4. — P. 156—158.
28. Chen X., Tung K. K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration // *Science*. — 2014. — Vol. 345 (6199). — P. 897—903.
29. Climatic Research Unit. — URL: <http://www.cru.uea.ac.uk>.
30. Coupled Model Intercomparison Project. — URL: <http://cmip-pcmdi.llnl.gov>.
31. Cowtan K., Hausfather Z., Hawkins E. et al. Robust comparison of climate models with observations using blended land air and ocean sea surface temperatures // *Geophysical Research Letters*. — 2015. — Vol. 42, № 15. — P. 6526—6534.
32. Danabasoglu G., Yeager S. G., Kim W. M. et al. North Atlantic simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II) — Pt. I: Mean states // *Ocean Modelling*. — 2014. — Vol. 73. — P. 76—107.
33. Danabasoglu G., Yeager S. G., Kim W. M. et al. North Atlantic Simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II). — Pt. II: Inter-Annual to Decadal Variability // *Ocean Modelling*. — 2016. — Vol. 97. — P. 65—90.
34. Delworth T. L., Mann M. E. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere // *Climate Dynamics*. — 2000. — № 16 — P. 661—676.
35. Downes S. M., Farneti R., Uotila P. et al. An assessment of Southern Ocean water masses and sea ice during 1988—2007 in a suite of interannual CORE-II simulations // *Ocean Modelling*. — 2015. — Vol. 94. — P. 67—94.
36. Dufour A., Zolina O., Gulev S. K. Atmospheric moisture transport to the Arctic: assessment of reanalyses and analysis of transport components // *J. of Climate*. — 2016. — Vol. 29. — P. 5061—5081.
37. England M. H., McGregor S., Spence P. et al. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus // *Nature Climate Change*. — 2014. — Vol. 4. — P. 222—227.
38. Farneti R., Downes S. M., Griffies S. M. et al. An assessment of Antarctic Circumpolar Current and Southern Ocean Meridional Overturning Circulation during 1958—2007 in a suite of interannual CORE-II simulations // *Ocean Modelling*. — 2015. — Vol. 93. — P. 84—120.
39. Fyfe J. C., Gillett N. P., Zwiers F. W. Overestimated global warming over the past 20 years // *Nature Climate Change*. — 2013. — Vol. 3. — P. 767—769.
40. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. — URL: <http://data1.gfdl.noaa.gov/nomads/forms/core/COREv2.html>.
41. GISTEMP Team, 2017: GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP). NASA Goddard Institute for Space Studies. — Dataset accessed 20YY-MM-DD. — URL: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.
42. Guemas V., Doblas-Reyes F. J., Andreu-Burillo I., Asif M. Retrospective prediction of the global warming slowdown in the past decade // *Nature Climate Change*. — 2013. — Vol. 3. — P. 649—653.
43. Gulev S. K., Belyaev K. P. Probability distribution characteristics for surface air-sea turbulent heat fluxes over the global ocean // *J. of Climate*. — 2012. — Vol. 25. — P. 184—206.
44. Gulev S. K., Latif M., Keenlyside N. et al. North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales // *Nature*. — 2013. — Vol. 499. — P. 464—467.
45. Gulev S. K., Latif M. Ocean science: The origins of a climate oscillation // *Nature*. — 2015. — Vol. 521. — P. 428—430.
46. Hawkins E., Edwards T., McNeall D. Pause for thought // *Nature Climate Change*. — 2014. — Vol. 4. — P. 154—156.
47. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al (eds.)]. — Cambridge; New York: Cambridge Univ. Press, 2007.
48. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner et al (eds.)]. — Cambridge; New York: Cambridge Univ. Press, 2013. — 1535 p.
49. Johannessen O. M., Bengtsson L., Miles M. W. et al. Arctic climate change: observed and modeled temperature and sea-ice variability // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. — 2004. — Vol. 56. — P. 328—341.
50. Johnson M., Proshutinsky A., Aksenov Ye. et al. Evaluation of Arctic sea ice thickness simulated by Arctic Ocean Model Intercomparison Project models // *J. Geophys. Res.* — 2012. — Vol. 117, C00D13.
51. Karl T. R., Arguez A., Huang B. et al. Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus // *Science*. — 2015. — Vol. 348 (6242). — P. 1469—1472.
52. Kosaka Y., Xie S. P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling // *Nature*. — 2013. — Vol. 501. — P. 403—407.

53. Large W., Yeager S. The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set // *Clim Dyn.* — 2009. — Vol. 33. — P. 341—364.
54. Lenton T. M., Held H., Kriegler E. et al. Tipping elements in the Earth's climate system // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* — 2008. — Vol. 105 (6). — P. 1786—1793.
55. McCarthy G. D., Haigh I. D., Hirschi J. J.-M. et al. Ocean impact on decadal Atlantic climate variability revealed by sea-level observations // *Nature.* — 2015. — Vol. 521 (7553). — P. 508—510.
56. Meehl G. A., Arblaster J. M., Fasullo J. T. et al. Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods // *Nature Climate Change.* — 2011. — Vol. 1. — P. 360—364.
57. National Snow and Ice Data Center FTP Archives. — URL: <ftp://sidacs.colorado.edu/DATASETS/NOAA/G02135/>.
58. Otto A., Otto F. E. L., Boucher O., Church J. et al. Energy budget constraints on climate response // *Nature Geoscience.* — 2013. — Vol. 6. — P. 415—416.
59. Santer B. D., Bonfils C., Painter J. F. et al. Volcanic contribution to decadal changes in tropospheric temperature // *Nature Geoscience.* — 2014. — Vol. 7. — P. 185—189.
60. Schlesinger M. E., Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years // *Nature.* — 1994. — Vol. 367. — P. 723—726.
61. Semenov V. A., Latif M., Dommenges D. et al. The Impact of North Atlantic-Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature // *J. Climate.* — 2010. — Vol. 23. — P. 5668—5677.
62. Smith D. Oceanography: has global warming stalled? // *Nature Climate Change.* — 2013. — Vol. 3. — P. 618—619.
63. Trenberth K. E., Fasullo J. T. An apparent hiatus in global warming? // *Earth's Future.* — 2013. — Vol. 1. — P. 19—32.
64. Suo L., Ottera O. H., Bentsen M. et al. External forcing of the early 20th century Arctic warming // *Tellus.* — 2013. — Vol. 65. — P. 20578—20591.
65. URL: <http://woodfortrees.org>.

Информация об авторах

Выручалкина Татьяна Юрьевна, кандидат географических наук, научный сотрудник, Институт водных проблем РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: vyruchi@list.ru.

Гусев Анатолий Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт вычислительной математики РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 8), Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36), e-mail: anatoly.v.gusev@gmail.com.

Дианский Николай Ардальевич, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), ведущий научный сотрудник, Институт вычислительной математики РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 8), Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6), e-mail: nikolay.diansky@gmail.com.

Панин Геннадий Николаевич, доктор географических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт водных проблем РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3).

Соломонова Ирина Владимировна, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт водных проблем РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: _iren@mail.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Панин Г. Н., Дианский Н. А., Соломонова И. В. и др. Оценка климатических изменений в Арктике в XXI столетии на основе комбинированного прогностического сценария // *Арктика: экология и экономика.* — 2017. — № 2 (26). — С. 35—52.

ASSESSMENT OF CLIMATIC CHANGES IN THE ARCTIC IN THE 21st CENTURY BASED ON THE COMBINED FORECAST

Panin G. N.

Water Problems Institute RAS (Moscow, Russian Federation)

Diansky N. A.

Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation),
Institute of Numerical Mathematics RAS (Moscow, Russian Federation),
N. N. Zubov State Oceanographic Institute (Moscow, Russian Federation)

Solomonova I. V.

Water Problems Institute RAS (Moscow, Russian Federation)

Gusev A. V.

Institute of Numerical Mathematics RAS (Moscow, Russian Federation),
P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS (Moscow, Russian Federation)

Vyruchalkina T. Yu.

Water Problems Institute RAS (Moscow, Russian Federation)

Abstract

The investigation is made of interconnections amongst climatic processes in the North Atlantic and Arctic. It is shown that ice melting in the Arctic in 70's-90's of the 20th century is connected with climate variability in the North Atlantic well presented in the indexes of multidecadal oscillation and intensity of Atlantic meridional overturning circulation. As well, the latter reflects climatic changes in the heat and fresh water fluxes from the North Atlantic surface to the mid-latitude atmosphere. We suppose the physicostatistical scenario of climate change (the combined scenario) based on composition of the so-called "greenhouse" (external forcing) and "cyclic" (internal variability of climatic system) effects. The numerical simulations were performed with the ocean general circulation model for retrospective and prognostic reconstruction of thermohaline circulation and sea ice in the North Atlantic and Arctic Oceans. Analysis of the simulation results and investigation of their cyclic properties let us find a new approach to description of climatic variability of the Arctic and Northern sea route. This approach lets one describe temperature growth concerned with both greenhouse gas emission and climate variability (particularly, the observed cooling in 1950-1970 years). The proposed combined scenario of the climatic change presents the possible cooling in the Arctic and the corresponding decrease of the shipping season in the Northern sea route for the next 10-20 years. Overall, the aim of the research is to estimate how much the North Atlantic variability influences Eurasia climate variations, in order to allow for them by the following forecasting.

Keywords. *Arctic, Northern sea route, Atlantic, sea ice, forecast, climate changes, greenhouse effect, oscillations.*

The major part of the research was done under financial support of the RFBR, grants №15-05-03127, 15-05-07539, 16-05-00534. Numerical simulations with the model INMOM were performed in the INM RAS under support of RSF (grant № 14-27-00126). Computation of moisture transport from Atlantic to Eurasia was performed in the IWP RAS under support of RSF (grant № 14-17-00740).

References

1. Alekseyev G. V. Proyavleniye i usileniye globalnogo potepneniya v Arktike. [Development and amplification of global warming in the Arctic]. *Fundam. i prikladnaya klimatologiya*, 2015, no. 1, pp. 11—26. (In Russian).
2. Byshev V. I., Neyman V. G., Romanov Yu. A., Serykh I. V. O globalnom kharaktere yavleniya El-Nino v klimaticheskoy sisteme zemli. [On Planetary Nature of El Niño Events in the Earth's Climatic System]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, vol. 8, no. 4, pp. 200—208. (In Russian).
3. Volodin E. M., Galin V. Ya., Gritsun A. S. i dr. Matematicheskoye modelirovaniye Zemnoy sistemy. [Mathematical Modeling of the Earth System]. Pod red. N. G. Yakovleva. M.: MAKS Press, 2016. 328 p. (In Russian).
4. Volodin E. M., Dianskiy N. A., Gusev A. V. Vosproizvedeniye sovremennogo klimata s pomoshchyu sovmennoy modeli obshchey tsirkulyatsii atmosfery i okeana INMCM 4.0. [Simulating present-day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2010, vol. 46, no. 4, pp. 448—466. (In Russian).
5. Volodin E. M., Dianskiy N. A., Gusev A. V. Vosproizvedeniye i prognoz klimaticheskikh izmeneniy v XIX—XXI vekakh s pomoshchyu modeli zemnoy klimaticheskoy sistemy IVM RAN. [Simulation and prediction of climate changes in the 19th to 21st centuries with the

- Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, model of the Earth's climate system]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2013, vol. 49, no. 4, pp. 379—400. (In Russian).
6. *Vyruchalkina T. Yu., Filatov N. N., Dianskiy N. A., Gusev A. V.* O prognoze mnogoletnikh izmeneniy urovnya krupnykh ozer. [On forecasting long-term variations of water level in large lakes]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2016, no. 9, pp. 3—16. (In Russian).
7. *Gruza G. V., Rankova E. Ya., Rocheva E. V.* Izmeneniya klimata na territorii Rossii: temperatura vozdukhа i atmosferynye osadki. [Climate change at Russian territory: air temperature and atmospheric precipitation]. *Izmeneniye okruzhayushchey sredy i klimata. prirodnyye i svyazannyye s nimi tekhnogennyye katastrofy*. M., 2008, vol. 6, pp. 11—23. (In Russian).
8. *Gusev A. V., Dianskiy N. A.* Vosproizvedeniye tsirkulyatsii Mirovogo okeana i eye klimaticheskoy izmenchivosti v 1948—2007 gg. s pomoshchyu modeli INMOM. [Numerical simulation of the world ocean circulation and its climatic variability for 1948—2007 using the INMOM]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 3—15. (In Russian).
9. *Dianskiy N. A.* Modelirovaniye tsirkulyatsii okeana i issledovaniye ego reaktsii na korotkoperiodnyye i dolgoperiodnyye atmosferynye vozdeystviya. [Modelling of ocean circulation and its response to short- and long-range atmospheric forcing]. M., Fizmatlit, 2013, 272 p. (In Russian).
10. *Dianskiy N. A., Gusev A. V.* Modelirovaniye protsessa izmeneniya klimata i sovremennogo zamedleniya globalnogo potepeniya s pomoshchyu modeli INMOM. [Simulation of the climate change process and the present global warming deceleration with INMOM]. *Fundam. i prikladnaya klimatologiya*, 2015, no. 1, pp. 96—118. (In Russian).
11. *Kattsov V. M., Porfiryev B. N.* Klimaticheskkiye izmeneniya v Arktike: posledstviya dlya okruzhayushchey sredy i ekonomiki. [Climate Changes in the Arctic: Impact on Environment and Economy]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2012, no. 2 (6), pp. 66—79. (In Russian).
12. *Klyashtorin L. B., Lyubushin A. A.* Tsiklicheskiye izmeneniya klimata i ryboproduktivnosti. [Cyclic climate changes and fish productivity]. M., Izd-vo VNIRO, 2005, 258 p. (In Russian).
13. *Mokhov I. I.* Sovremennyye izmeneniya klimata v Arktike. [Contemporary climate changes in the Arctic]. *Vestn. RAN*, 2015, vol. 85, no. 5—6, pp. 478—484. (In Russian).
14. *Mokhov I. I., Semenov V. A., Khon V. Ch. i dr.* Svyaz anomalii klimata Evrazii i Severnoy Atlantiki s estestvennymi variatsiyami Atlanticheskoy termokhalinnoy tsirkulyatsii po dolgoperiodnym modelnym raschetam. [Connection between Eurasian and North Atlantic climate anomalies and natural variations in the Atlantic thermohaline circulation based on long-term model calculations]. *Dokl. RAN*, 2008, vol. 419, no. 5, pp. 687—690. (In Russian).
15. *Mokhov I. I., Khon V. Ch.* Prodolzhitelnost navigatsionnogo perioda i eye izmeneniya dlya Severnogo morskogo puti: modelnyye otsenki. [The duration of the navigation period and changes for the Northern Sea Route: model estimates]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2015, no. 2 (18), pp. 88—95. (In Russian).
16. *Mokhov I. I., Khon V. Ch., Prokofyeva M. A.* Novyye modelnyye otsenki izmeneniy prodolzhitelnosti navigatsionnogo perioda dlya Severnogo morskogo puti v XXI veke. [New model estimates of changes in the duration of the navigation period for the Northern sea route in the 21st century]. *Dokl. RAN*, 2016, vol. 468, no. 6, pp. 699—704. (In Russian).
17. *Panin G. N.* Ob izmeneniyakh klimata v polyarnykh zonakh Zemli v XX i XXI stoletiyakh. [On climate changes in polar zones of the earth in the twentieth and twenty-first centuries]. *Dokl. Akad. nauk*, 2009, vol. 427, pp. 397—402. (In Russian).
18. *Panin G. N., Vyruchalkina T. Yu., Solomonova I. V.* Variatsii klimata Severnoy Evrazii v posledney chetverti KhKh veka. [Variations of climate of Northern Eurasia in the last quarter of the 20th century]. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. M., 2011, pp. 99—115. (In Russian).
19. *Panin G. N., Vyruchalkina T. Yu., Solomonova I. V.* Klimaticheskkiye izmeneniya v Arktike. Severnoy Atlantike. rayone Kaspiya i ikh vzaimosvyaz. [Climatic changes in the Arctic, North Atlantic, the Caspian sea region, and their relationships]. *Fundam. i prikladnaya klimatologiya*, 2015, no. 1, pp. 183—210. (In Russian).
20. *Panin G. N., Dianskiy N. A.* Klimaticheskkiye izmeneniya v Arktike. Severnoy Atlantike i Severnyy morskoy put. [Climatic variations in the Arctic, North Atlantic, and the Northern sea route]. *Dokl. Akad. nauk*, 2015, vol. 462, no. 2, pp. 217—222. (In Russian).
21. *Panin G. N., Solomonova I. V., Vyruchalkina T. Yu.* Klimaticheskkiye tendentsii v srednikh i vysokikh shirotakh Severnogo polushariya. [Climatic trends in the middle and high latitudes of the Northern Hemisphere]. *Vod. resursy*, 2009, vol. 36, no. 6, pp. 743—756. (In Russian).
22. *Popova V. V., Shmakina A. B.* Dinamika klimaticheskikh ekstremumov v Severnoy Evrazii v kontse KhKh veka. [Dynamics of climate extremes in Northern Eurasia in the late 20th century]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2006, vol. 42, no. 2, pp. 157—166. (In Russian).
23. *Semenov V. A.* Vliyaniye okeanicheskogo pritoka v Barentsevo more na izmenchivost klimata v Arktike. [Influence of oceanic inflow to the Barents Sea on climate variability in the Arctic region]. *Dokl. RAN*, 2008, vol. 418, no. 1, pp. 106—109.
24. *Semenov V. A., Mokhov I. I., Latif M.* Vliyaniye temperatury poverkhnosti okeana i granits morskogo lda na izmeneniye regionalnogo klimata v Evrazii za posledniye desyatiletiya. [Influence of the ocean surface temperature and sea ice concentration on regional climate changes in eurasia in recent decades]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2012, vol. 48, no. 4, pp. 403—421. (In Russian).

25. Tolstykh M. A., Dianskiy N. A., Gusev A. V., Kiktev D. B. Vosproizvedeniye sezonnykh anomalii atmosfery i okeana. [Simulation of seasonal anomalies of atmospheric circulation using coupled atmosphere-ocean model]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2014, vol. 50, no. 2, pp. 131—142. (In Russian).
26. Bekryaev R. V., Polyakov I. V., Alexeev V. A. Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming. *J. Climate*, 2010, vol. 23, pp. 3888—3906.
27. Boykoff M. T. Media discourse on the climate slowdown. *Nature Climate Change*, 2010, vol. 4, pp. 156—158.
28. Chen X., Tung K. K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration. *Science*, 2014, vol. 345 (6199), pp. 897—903.
29. Climatic Research Unit. Available at: <http://www.cru.uea.ac.uk>.
30. Coupled Model Intercomparison Project. Available at: <http://cmip-pcmdi.llnl.gov>.
31. Cowtan K., Hausfather Z., Hawkins E. et al. Robust comparison of climate models with observations using blended land air and ocean sea surface temperatures. *Geophysical Research Letters*, 2015, vol. 42, no. 15, pp. 6526—6534.
32. Danabasoglu G., Yeager S. G., Kim W. M. et al. North Atlantic simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II) — Pt. I: Mean states. *Ocean Modelling*, 2014, vol. 73, pp. 76—107.
33. Danabasoglu G., Yeager S. G., Kim W. M. et al. North Atlantic Simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II). Pt. II: Inter-Annual to Decadal Variability. *Ocean Modelling*, 2016, vol. 97, pp. 65—90.
34. Delworth T. L., Mann M. E. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere. *Climate Dynamics*, 2000, no. 16, pp. 661—676.
35. Downes S. M., Farneti R., Uotila P. et al. An assessment of Southern Ocean water masses and sea ice during 1988—2007 in a suite of interannual CORE-II simulations. *Ocean Modelling*, 2015, vol. 94, pp. 67—94.
36. Dufour A., Zolina O., Gulev S. K. Atmospheric moisture transport to the Arctic: assessment of reanalyses and analysis of transport components. *J. of Climate*, 2016, vol. 29, pp. 5061—5081.
37. England M. H., McGregor S., Spence P. et al. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nature Climate Change*, 2014, vol. 4, pp. 222—227.
38. Farneti R., Downes S. M., Griffies S. M. et al. An assessment of Antarctic Circumpolar Current and Southern Ocean Meridional Overturning Circulation during 1958—2007 in a suite of interannual CORE-II simulations. *Ocean Modelling*, 2015, vol. 93, pp. 84—120.
39. Fyfe J. C., Gillett N. P., Zwiers F. W. Overestimated global warming over the past 20 years. *Nature Climate Change*, 2013, vol. 3, pp. 767—769.
40. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. Available at: <http://data1.gfdl.noaa.gov/nomads/forms/core/COREv2.html>.
41. GISTEMP Team, 2017: GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP). NASA Goddard Institute for Space Studies. Dataset accessed 20YY-MM-DD. Available at: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.
42. Guemas V., Doblas-Reyes F. J., Andreu-Burillo I., Asif M. Retrospective prediction of the global warming slowdown in the past decade. *Nature Climate Change*, 2013, vol. 3, pp. 649—653.
43. Gulev S. K., Belyaev K. P. Probability distribution characteristics for surface air-sea turbulent heat fluxes over the global ocean. *J. of Climate*, 2012, vol. 25, pp. 184—206.
44. Gulev S. K., Latif M., Keenlyside N. et al. North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales. *Nature*, 2013, vol. 499, pp. 464—467.
45. Gulev S. K., Latif M. Ocean science: The origins of a climate oscillation. *Nature*, 2015, vol. 521, pp. 428—430.
46. Hawkins E., Edwards T., McNeall D. Pause for thought. *Nature Climate Change*, 2014, vol. 4, pp. 154—156.
47. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al (eds.)]. Cambridge; New York: Cambridge Univ. Press, 2007.
48. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner et al (eds.)]. Cambridge; New York: Cambridge Univ. Press, 2013, 1535 p.
49. Johannessen O. M., Bengtsson L., Miles M. W. et al. Arctic climate change: observed and modeled temperature and sea-ice variability. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2004, vol. 56, pp. 328—341.
50. Johnson M., Proshutinsky A., Aksenov Ye. et al. Evaluation of Arctic sea ice thickness simulated by Arctic Ocean Model Intercomparison Project models. *J. Geophys. Res.*, 2012, vol. 117, C00D13.
51. Karl T. R., Arguez A., Huang B. et al. Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus. *Science*, 2015, vol. 348 (6242), pp. 1469—1472.
52. Kosaka Y., Xie S. P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 2013, vol. 501, pp. 403—407.
53. Large W., Yeager S. The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set. *Clim Dyn.*, 2009, vol. 33, pp. 341—364.
54. Lenton T. M., Held H., Kriegler E. et al. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, vol. 105 (6), pp. 1786—1793.

55. McCarthy G. D., Haigh I. D., Hirschi J. J.-M. et al. Ocean impact on decadal Atlantic climate variability revealed by sea-level observations. *Nature*, 2015, vol. 521 (7553), pp. 508—510.
56. Meehl G. A., Arblaster J. M., Fasullo J. T. et al. Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods. *Nature Climate Change*, 2011, vol. 1, pp. 360—364.
57. National Snow and Ice Data Center FTP Archives. URL: <ftp://sidads.colorado.edu/DATASETS/NOAA/G02135/>.
58. Otto A., Otto F. E. L., Boucher O., Church J. et al. Energy budget constraints on climate response. *Nature Geoscience*, 2013, vol. 6, pp. 415—416.
59. Santer B. D., Bonfils C., Painter J. F. et al. volcanic contribution to decadal changes in tropospheric temperature. *Nature Geoscience*, 2014, vol. 7, pp. 185—189.
60. Schlesinger M. E., Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. *Nature*, 1994, vol. 367, pp. 723—726.
61. Semenov V. A., Latif M., Dommenges D. et al. The Impact of North Atlantic-Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature. *J. Climate*, 2010, vol. 23, pp. 5668—5677.
62. Smith D. Oceanography: has global warming stalled?. *Nature Climate Change*, 2013, vol. 3, pp. 618—619.
63. Trenberth K. E., Fasullo J. T. An apparent hiatus in global warming?. *Earth's Future*, 2013, vol. 1, pp. 19—32.
64. Suo L., Ottera O. H., Bentsen M. et al. External forcing of the early 20th century Arctic warming. *Tellus*, 2013, vol. 65, pp. 20578—20591.
65. Available at: <http://woodfortrees.org>.

Information about the authors

Vyruchalkina Tatiana Yuryevna, PhD, researcher, Water Problems Institute RAS (3, Gubkina st., Moscow, 119333, Russia), e-mail: vyruchi@list.ru.

Gusev Anatoliy Vladimirovich, PhD, senior researcher, Institute of Numerical Mathematics RAS, (8, Gubkina st., Moscow, 119333, Russia); P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS (36, Nakhimovski prosp., Moscow, 117997, Russia), e-mail: anatoly.v.gusev@gmail.com.

Diansky Nikolay Ardalianovich, Doctor of Sciences, associate Professor, Chief Researcher, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia); leading researcher, Institute of Numerical Mathematics RAS, (8, Gubkina st., Moscow, 119333, Russia); N. N. Zubov State Oceanographic Institute (6, Kropotkinsky per., Moscow, 119034, Russia), e-mail: nikolay.diansky@gmail.com.

Panin Gennadiy Nikolayevich, Doctor of Sciences, professor, Head of laboratory, Water Problems Institute RAS (3, Gubkina st., Moscow, 119333, Russia).

Solomonova Irina Vladimirovna, PhD, researcher, Water Problems Institute RAS (3, Gubkina st., Moscow, 119333, Russia), e-mail: _iren@mail.ru.

Bibliographic description

Panin G. N., Diansky N. A., Solomonova I. V. et al. Assessment of climatic changes in the Arctic in the 21st century based on the combined forecast. *The Arctic: ecology and economy*, 2017, no. 2 (26), pp. 35—52. (In Russian).

© Panin G. N., Diansky N. A., Solomonova I. V., Gusev A. V., Vyruchalkina T. Yu., 2017