

ВЛИЯНИЕ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКЕАНА В НИЗКИХ ШИРОТАХ НА АТМОСФЕРНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛА В АРКТИКУ

Г.В. Алексеев¹⁾, С.И. Кузмина²⁾, Н.И. Глок¹⁾

¹⁾ ГНЦ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», РФ, 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38; alexgv@aari.ru

²⁾ Научный центр им. Нансена «Нансен-Центр», РФ, 199034, г. Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 14; Svetlana.Kuzmina@niersc.spb.ru

Резюме. Цель исследования – оценить влияние аномалий температуры поверхности океана (ТПО) в низких широтах Атлантического, Индийского и Тихого океанов на зимний меридиональный атмосферный перенос тепла (МАПТ) в Арктику на климатических масштабах времени и предложить объяснение механизма этого влияния. Для исследования использованы расчеты переносов явного и скрытого тепла в Арктику через «атлантические ворота» на 70° с.ш. в зимний период (декабрь-февраль) 1980-2015 гг., выполненные по данным реанализа ERA/Interim и данным о ТПО из архива HadISST. Метод – многомерный взаимнокорреляционный анализ. В каждом из океанов была определена область и месяц наибольших корреляций между ТПО и зимним МАПТ и соответствующее запаздывание МАПТ. Для выделенных областей построены ряды средних ТПО за каждый месяц 1982-2015 гг. и выполнены оценки их корреляционной связи с МАПТ. Коэффициенты корреляции варьировались от 0.42 до 0.57, а после удаления шума скользящим трехлетним осреднением – увеличились до 0.75 при запаздывании МАПТ от 27 до 30 месяцев. При этом в рядах ТПО и МАПТ помимо положительного тренда обнаружались 5-7-летние колебания. Предложено объяснение механизма передачи влияния аномалий ТПО в низких широтах океана на зимние МАПТ в Арктику, который включает взаимодействие атмосферных (циркуляции Хедли, Ферреля, Северо-Атлантическое колебание (САК) и океанических циркуляционных структур (Гольфстрим, Северо-Атлантическое, Норвежское течения). Для обоснования предложенного механизма приведены оценки связей между аномалиями ТПО, индекса САК и показателя притока атлантической воды в Баренцево море.

Ключевые слова. Арктика, меридиональный атмосферный перенос тепла, тропический океан, ТПО, дальние связи.

INFLUENCE OF TEMPERATURE ANOMALIES OF THE OCEAN SURFACE IN LOW LATITUDES ON THE ATMOSPHERIC HEAT TRANSPORT TO THE ARCTIC

G.V. Alekseev¹⁾, S.I. Kuzmina²⁾, N.I. Glok¹⁾

¹⁾ Arctic and Antarctic Research Institute, 38, Bering str., 199397, St. Petersburg, Russian Federation; alexgv@aari.ru

Summary. The purpose of the study is to assess the influence of anomalies of the ocean surface temperature (SST) in the low latitudes of Atlantic, Indian and Pacific oceans to climatic change in the winter atmospheric meridional heat transport (MAHT) to the Arctic and to propose the process-based explanation of this influence. Sensible and latent heat transport to the Arctic through the "Atlantic Gate" at 70° N in winter (December-February) for 1980-2015 was estimated on the basis of ERA / Interim reanalysis and monthly SST data from the HadISST archive.

Multi-dimensional cross-correlation analysis was applied. For each ocean, the area and month with maximal correlation between SST and winter MAHT, as well as respective lag, were found. For the areas selected and each month of 1982-2015, mean SST series were calculated and their correlations with MAHT were computed.

The correlation coefficients varied from 0.42 to 0.57 and after removing the noise had increased up to 0.75 with MAHT lag from 27 to 30 months. Besides positive trends, the SST and MAHT series showed 5-7 years cycling. A mechanism of the influence of SST anomalies in low latitudes on winter MAHT to the Arctic is proposed. It includes the interactions of atmospheric (Hadley and Ferrel circulations, NAO) and oceanic (Gulf Stream, the North Atlantic and the Norwegian currents) circulation patterns. For the justification of the proposed mechanism, relationships between SST anomalies, the NAO index, and the Atlantic water inflow to the Barents Sea were assessed.

Keywords. Arctic, meridional atmospheric heat transport, tropic ocean, SST, teleconnections.

Введение

Среди механизмов изменения климата Арктики и арктического усиления глобального потепления в результате растущего антропогенного влияния в ряде исследований выявлена роль меридионального атмосферного и океанического переноса тепла в Арктику (Алексеев и др., 2016а; Årthun, Eldevik, 2016; Sando et al., 2014). Выполненные в работе (Алексеев и др., 2016а) расчеты атмосферных переносов тепла и влаги на различных изобарических поверхностях по данным реанализа ERA/Interim за 1979-2014 гг., показали, что основной меридиональный атмосферный приток явного и скрытого тепла в высокоширотную Арктику в зимний период поступает через атлантическую часть (от 0° в.д до 80° в.д.) ее южной границы по 70° с.ш. в слое от поверхности до 750 гПа с максимумом на 1000 гПа. Вклад увеличения притока в изменения средней температуры воздуха зимой у поверхности в области 70-90° с.ш. составляет более 40%. Кроме совпадения трендов меридионального атмосферного притока тепла и средней приповерхностной температуры воздуха в их межгодовой изменчивости выделяются 5-7 летние согласованные по фазе колебания.

Очевидно, что причины межгодовой изменчивости меридиональных атмосферных переносов тепла (МАПТ) в Арктику связаны с изменениями циркуляции атмосферы в Северном полушарии. Однако эти изменения не могут быть проявлением только собственных колебаний циркуляции, временные масштабы которых не выходят за пределы нескольких дней (Голицын, 1973), а происходят под влиянием внешних воздействий на пространственно-временное распределение атмосферных циркуляционных структур. Наиболее вероятным внешним воздействием на циркуляцию и, следовательно, на меридиональный атмосферный перенос тепла (МАПТ) являются аномалии температуры воды на поверхности океана.

Влияние аномалий температуры воды на поверхности океана (ТПО) на атмосферную циркуляцию и аномалии погоды и климата в средних широтах Северного полушария установлено во многих работах, например (Марчук, Скиба, 1976; Николаев, 1981). Недавно в работе (Алексеев и др., 2016б) найдено влияние аномалий ТПО в низких широтах океана на морской лед и температуру воздуха в морской Арктике. Влияние ТПО в низких широтах океана связано с тем, что здесь запасается основная часть притока тепла сверху (Palmer et al., 2007; IPCC, 2014). Предлагаемые в настоящее время механизмы влияния аномалий ТПО в низких широтах на Арктику включают усиление конвекции в тропической атмосфере над областями аномального повышения температуры воды, сопровождающиеся интенсификацией и расширением циркуляционной ячейки Хедли. Адам (Adam et al., 2014) нашли, что циркуляция Хедли расширяется в последние десятилетия вслед за потеплением, как по данным наблюдений, так и по результатам глобального моделирования, но слабее. Garfinkel et al. (2015) подтвердили, что глобальные модели климата недооценивают расширения ячейки Хедли, выявляемое в данных наблюдений. Выполненное в работе исследование по результатам расчетов на моделях из ансамбля CMIP5 и по данным 6 реанализов за 1979-2012 гг. показало, что циркуляционная ячейка расширяется, когда средняя температура в тропиках растет.

Huang, McElroy (2014) установили на основе метеоданных за 1979-2010 гг., что за этот период мощность режима Хедли росла вместе с усилением циркуляции Ферреля. В результате конвективного усиления меридиональных ячеек циркуляции происходит сдвиг субтропического струйного течения к северу (Misios, Schmidt, 2013). Ранее (Lee et al., 2011) отметили, что арктическое усиление роста приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) может быть объяснено увеличением притоков тепла в Арктику в результате усиления конвекции в тропической атмосфере. Анализ в работе Park et al. (2015) показал, что росту притока влаги в Арктику предшествует усиление конвекции над тропиками в Индийском океане и на западе Тихого океана. He et al. (2014) подтвердили, что наиболее влияющие аномалии ТПО находятся в Индо-Тихоокеанской экваториальной области. Ранее Wang et al. (2008) предположили, что аномальный прогрев в тропической Атлантике (Atlantic warm pool) может вызвать изменения в переносе тепла и нестабильность в атмосфере.

Среди механизмов передачи влияния аномалий ТПО в низких широтах океана в Арктику наиболее часто указывают на усиление волн Россби и изменения режима атмосферных циркуляционных мод. Yoo et al. (2011) на основе данных ERA/Interim за 1979-2008 гг. нашли, что арктическое усиление за этот период связано с осцилляцией Маддена-Джулиана (МДО) – главной модой межсезонной изменчивости в тропиках. При этом положительное влияние оказывают фазы МДО, соответствующие увеличению локального нагревания в тропиках, после которых через 1-2 недели следует повышение температуры в Арктике. Механизм влияния МДО на ПТВ в Арктике исследован ими (Yoo et al., 2012) в экспериментах на идеализированной МОЦА. Повышению ПТВ соответствовало усиление распространения волн из тропиков к полюсу, а похолоданию – ослабление. Из экспериментов с трассером найдено, что при усилении волн повышается концентрация трассера в Арктике. Отсюда сделан вывод, что МДО усиливает перенос влаги и приток нисходящей длинноволновой радиации в Арктике.

Ye et al. (2015), рассматривая связь между аномалиями ПТВ и снежного покрова в Евразии и атмосферной циркуляцией, пришли к выводу, что причиной являются крупномасштабные волны в атмосферной циркуляции, вызванные повышением ТПО в экваториальной Атлантике. Аномалии ТПО усиливают конвекцию в экваториальной атмосфере и способствуют формированию волн в циркуляции над Евразией, что подтверждается в экспериментах с МОЦА. Wettstein, Deser (2014) отметили на основании результатов глобального моделирования, что тропики Тихого океана влияют на изменчивость площади морского льда (ПМЛ) в Арктике через механизм возбуждения волн Россби в атмосферной циркуляции. Goss et al. (2016) показали, что интенсивная конвекция в атмосфере над аномалиями ТПО в тропиках усиливает потепление в Арктике через механизм интерференции стационарных волн и движущихся вихрей, ослабляющих стратосферный полярный вихрь. В работе (Barrett et al., 2015) аномалии ПТВ и осадков на Северном полушарии объясняются влиянием конвекции в тропиках и связанной с ней МДО на перенос тепла и влаги распространяющимися к полюсу волнами Россби.

Влияние аномалий ТПО в тропиках на Арктику может, в частности, передаваться посредством их воздействия на Северо-Атлантическое колебание (САК). Хотя большое число работ посвящено исследованию связи между аномалиями ТПО и САК (например, в монографии (Нестеров, 2013) приведен обзор, включающий 225 источников), основная их часть посвящена взаимодействию САК и аномалий ТПО в Атлантике к северу от 20° с.ш. на синоптических и внутригодовых масштабах. Роль аномалий ТПО в тропиках чаще всего исследовалась в связи с явлением Эль-Ниньо – Южное колебание и его влиянием на циркуляцию атмосферы в атлантико-европейском регионе, включая САК (напр., Нестеров, 2000; Мохов, Смирнов, 2000).

Влияние аномалий ТПО в низких широтах Атлантического и Индийского океана на изменения САК исследовалось в работах (Hoerling et al., 2001), в которой найдено влияние из Индийского океана, и в работах (Robertson et al.,

2000; Sutton and Hodson, 2002), где также установлено влияние ТПО из экваториальной области Атлантики. Недавно (Yu, Lin, 2016) нашли на основе данных реанализа и модельных экспериментов, что связь между аномалиями нагревания в тропической области Северной Атлантики и зимним САК осуществляется через меридиональную циркуляцию над Атлантическим океаном.

Рассматривая меридиональные атмосферные и океанические переносы тепла Бьеркнесс (Bjerknes, 1964) выдвинул идею о компенсации меридиональных переносов в атмосфере и океане для сохранения радиационного равновесия на верхней границе атмосферы, названную «компенсация Бьеркнеса». Заметим, что В.Ю. Визе (Визе, 1937), изучавший первое потепление Арктики в период его развития, отметил одновременное усиление притока атлантической воды и атмосферных переносов в Арктику.

В недавних исследованиях, тем не менее, находят противоположное развитие атмосферных и океанических переносов тепла в Арктику. Jungclaus, Koenigk (2010) по результатам интегрирования глобальной модели института Макса Планка нашли, что аномалии атмосферного переноса противоположны аномалиям океанического переноса. В ансамбле расчетов на глобальной модели климата EC-Earth2.3 при сценарии RCP8.5 в работе (Koenigk et al., 2013) обнаружено увеличение притока атлантической воды в Баренцево море и его сильное влияние на лед и температуру воздуха в регионе, в то время как меридиональный перенос тепла в атмосфере в Арктику уменьшился. Taylor et al. (2013) получили, что перенос тепла океанической циркуляцией и накопление тепла океаном влияют отрицательно на полярное усиление, особенно над Южным океаном и Северной Атлантикой.

Рассмотренные исследования влияния аномалий ТПО в низких широтах океана на циркуляцию атмосферы и на аномалии в Арктике выполнены большей частью с использованием экспериментов на глобальных моделях климата, которые воспроизводят реакцию атмосферной циркуляции на аномалию ТПО и ее проявления в Арктике спустя от 1-2 недель до сезона. В то же время остается открытым вопрос о влиянии аномалий ТПО на наблюдаемые климатические изменения в Арктике, включая тренды и межгодовые колебания климатических характеристик.

В этой связи цель данной работы – оценить влияние аномалий ТПО в низких широтах на меридиональный атмосферный перенос тепла (МАПТ) в Арктику и на поступление воды из Атлантики в Баренцево море на климатических масштабах, а также рассмотреть механизмы влияния ТПО на межгодовые колебания переносов и приповерхностной температуры воздуха.

Материалы и методы исследования

Для исследования использованы расчеты переносов явного и скрытого тепла в Арктику через «атлантические ворота» на 70° с.ш. в зимний период (декабрь-февраль) 1980-2015 гг. (Алексеев и др., 2016а), выполненные по данным реанализа ERA/Interim (Dee et al., 2011). Аномалии ТПО оценивались по данным оке-

анического реанализа HadISST (<http://hadobs.metoffice.com.hadsst/>) с пространственным разрешением $1 \times 1^\circ$ за период с 1951 по 2015 гг., и по данным о среднемесячной температуре воды на поверхности океана в низкоширотных областях Мирового океана с сайта <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>. Колебания поступления воды из Атлантики в Баренцево море оценивались по температуре воды в слое 50–200 м на разрезе по Кольскому меридиану по данным ПИНРО (Карсаков, 2009), размещенным на сайте <http://www/pinro.ru/n22/index/phpstructure/labs/labhidro/>.

Основной метод исследования – многомерный взаимно-корреляционный анализ массивов и рядов данных при переменном запаздывании для локализации влияющих на МАПТ низкоширотных аномалий ТПО в Атлантическом, Индийском и Тихом океанах.

Результаты

Аномалии ТПО в Атлантическом, Индийском и Тихом океанах, влияющие на зимние меридиональные атмосферные переносы тепла в Арктику

Для локализации влияющих аномалий ТПО выполнен корреляционный анализ между рядами зимних МАПТ через «атлантические ворота» на 70° с.ш. и среднемесячными значениями ТПО в узлах сетки $1 \times 1^\circ$ в области от 40° ю.ш. до 40° с.ш. за каждый месяц, взятыми с упреждением от 0 до 5 лет за 1982–2015 гг. Были использованы ряды переносов явного тепла на уровне 1000 гПа, которые характеризуют максимальный меридиональный перенос через «атлантические ворота» (Алексеев и др., 2016а). В результате выделялась область наибольших корреляций при различных запаздываниях МАПТ относительно ТПО в разные месяцы.

В каждом из океанов выделилась область наибольших корреляций между ТПО и МАПТ, приходящаяся на октябрь для Атлантического, на февраль для Индийского и на июль для Тихого океанов с запаздываниями МАПТ, соответственно, на 27, 23 и 30 месяцев (рис. 1). Для дальнейшего анализа влияния аномалий ТПО построены ряды среднемесячных значений ТПО, осредненных в областях локализации наибольших корреляций. В Атлантическом океане средние ТПО рассчитаны в области $5\text{--}25^\circ$ с.ш., $60\text{--}20^\circ$ з.д., в Индийском океане в области 10° ю.ш.– 20° с.ш., $40\text{--}110^\circ$ в.д., в Тихом океане в области 10° ю.ш.– 10° с.ш., 160° в.д.– 80° з.д. Расчеты выполнены для каждого месяца за 1982–2015 гг.

Оценки влияния аномалий ТПО на меридиональный атмосферный приток тепла в Арктику

Среднемесячные значения аномалий ТПО, осредненные по областям с максимальными коэффициентами корреляции между ТПО в Атлантическом, Индийском и Тихом океанах и МАПТ, сопоставлялись с зимними МАПТ на 1000 гПа поверхности через «атлантические ворота» на 70° с.ш. Были использованы ряды за период наиболее надежных данных о ТПО с 1982 года, ограниченные 2015 годом, до которого выполнены расчеты МАПТ.

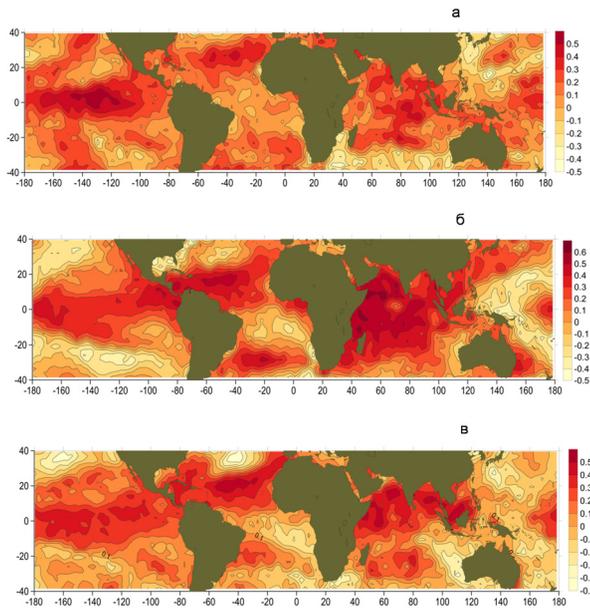


Рисунок 1. Корреляция между аномалиями ТПО в низкоширотной области 40° ю.ш. - 40° с.ш. Тихого, Индийского и Атлантического океанов и аномалиями меридионального атмосферного потока явного тепла (МАПТ) в декабре-феврале через «атлантические ворота» на 70° с.ш.
а – ТПО в июле и МАПТ спустя 30 месяцев; б – ТПО в феврале и МАПТ спустя 23 месяца; в – ТПО в октябре и МАПТ спустя 27 месяцев. Корреляция за 1982–2015 гг.

В табл. 1 приведены коэффициенты корреляции между выбранными рядами среднемесячных ТПО и зимними МАПТ. Выбор рядов ТПО выполнен на основе расчетов коэффициентов корреляции между среднемесячными значениями ТПО в каждой из областей и МАПТ при запаздываниях МАПТ от 0 до 5 лет:

$$\rho_{mk} = \frac{1}{N-k} \sum_{g=1}^{N-k} (T_{mg} \times M_{g+k})$$

где T, M – нормированные значения ТПО и МАПТ, $g = 1, 2, \dots, N$ – годы, N – длина ряда, $m = 1, 2, \dots, 12$ – месяцы, $k = 0, 1, 2, \dots$ – запаздывание (годы).

В табл. 1 показаны наибольшие коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями ТПО и МАПТ и соответствующие запаздывания МАПТ (в скобках) относительно ТПО в каждой из трех выделенных областей.

Совместное влияние аномалий ТПО во всех трех областях на МАПТ явного тепла оценивается множественным коэффициентом корреляции 0.60. Поскольку отличие максимальных корреляций ТПО в Индийском и Тихом океанов с МАПТ от корреляций МАПТ и ТПО в октябре незначимо, то в дальнейшем анализе используются аномалии ТПО во всех трех океанах в октябре. Средняя октябрьская ТПО в трех океанах коррелирована с зимними МАПТ с коэффициентами 0.57 и 0.42, соответственно, для явного и скрытого тепла при запаздывании МАПТ на 27 месяцев. ТПО в экваториальной области 10° с.ш.

- 10° ю.ш., представленные на сайте <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/> с 1982 года, показывают наибольшее влияние августовских аномалий ТПО на зимние МАПТ в Арктику с коэффициентами корреляции 0.54 и 0.45, соответственно, при запаздывании МАПТ в 29 месяцев.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между среднемесячными ТПО в приэкваториальных областях Атлантического (Атлант), Индийского (Инд) и Тихого (Тихоок) океанов в указанные в скобках месяцы и зимними меридиональными атмосферными переносами (МАПТ) явного и скрытого тепла в Арктику (через косую черту представлены корреляции для рядов с удаленным трендом) с указанным в скобках запаздыванием за 1982–2014 гг.

Среднее ТПО в области (месяц)	МАПТ, явное тепло (запад., месяцы)	МАПТ, скрытое тепло (запад., месяцы)
Атлант (10)	0.44/0.36 (27)	0.42/0.34 (27)
Инд (2)	0.51/0.49 (23)	0.41/0.36 (23)
Инд (10)	0.53/0.41 (27)	0.50/0.39 (27)
Тихоок (7)	0.39/0.40 (30)	0.19/0.19 (30)
Тихоок (10)	0.38/0.42 (27)	0.20/0.22 (27)
Все 3 области (10)	0.57/0.48 (27)	0.42/0.32 (27)
10° с.ш. - 10° ю.ш. (8)	0.54/0.52 (29)	0.45/0.40 (29)

Выполненный корреляционный анализ выявил значимое запаздывающее влияние аномалий ТПО в низких широтах Атлантического, Индийского и Тихого океанов на зимний меридиональный атмосферный перенос тепла, определяющий основную часть межгодовой изменчивости зимней приповерхностной температуры воздуха в Арктике к северу от 70° с.ш. в период современного потепления после 1980 г. Наибольшее влияние на аномалии МАПТ оказывают аномалии ТПО в Индийском океане по сравнению с аномалиями в Атлантическом и Тихом океанах. Совместное влияние аномалий во всех трех океанах возрастает относительно влияния аномалии в каждом их океанов (табл. 1).

Структура межгодовой изменчивости ТПО и МАПТ с учетом установленных связей и запаздываний представлена на совместных графиках временных рядов ТПО и МАПТ (рис. 2). Для удобства сопоставления на графики нанесены нормализованные значения аномалий ТПО и МАПТ. Чтобы ослабить влияние шумов в среднемесячных данных выполнялось скользящее сглаживание рядов с временным окном в 3 года.

На рис. 2 видны согласованные изменения аномалий ТПО в низких широтах Атлантического, Индийского и Тихого океанов и аномалий меридиональных атмосферных переносов тепла в Арктику зимой через «атлантические ворота» на 70° с.ш., включающие не только постепенный рост обеих аномалий, но и значительные 5-7 летние колебания. Эти колебания становятся более заметными после сглаживания рядов, что увеличивает корреляцию между аномалиями ТПО и МАПТ до 0.79.

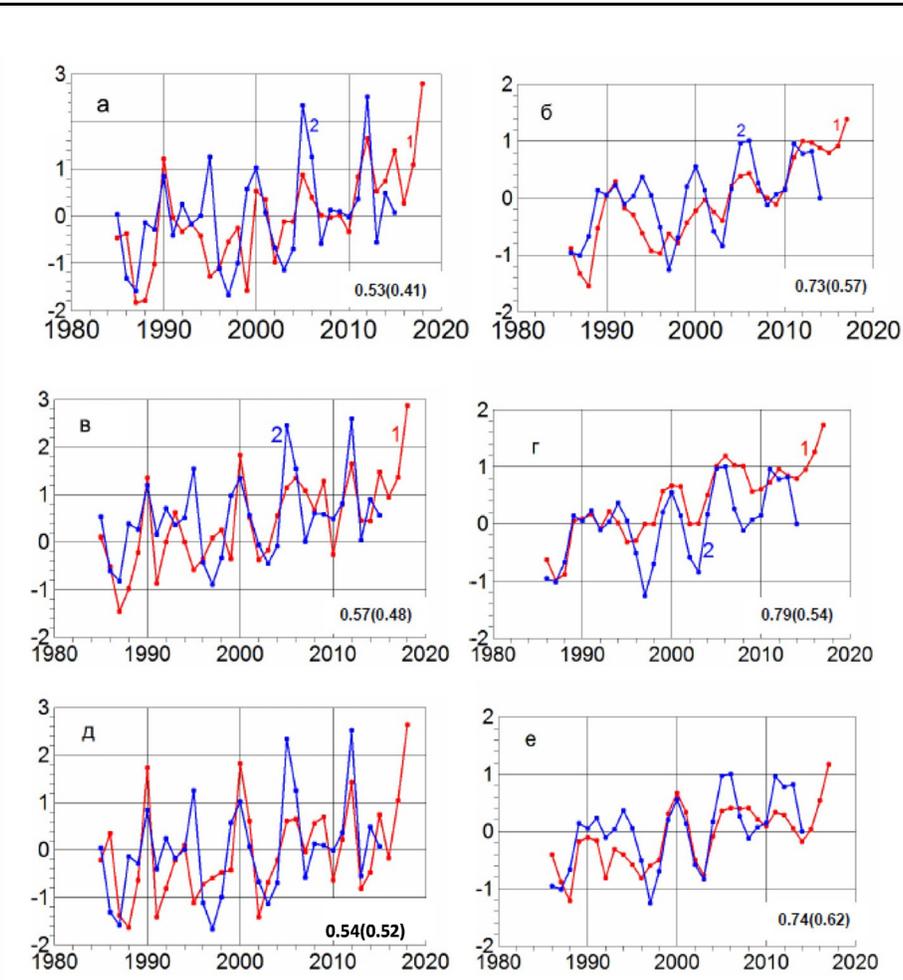


Рисунок 2. Межгодовые изменения нормированных аномалий ТПО (1- красная кривая) в выделенных низкоширотных областях: (а) – ТПО в октябре Индийском океане, (в) – средняя ТПО в трех выделенных областях в октябре, (д) – ТПО в тропической области 10° с.ш. – 10° ю.ш. в августе; (2- синяя кривая) – нормированные аномалии зимнего меридионального атмосферного переноса явного тепла через «атлантические ворота» на 70° с.ш. R – коэффициент корреляции между рядами (1) и (2), в скобках - коэффициент корреляции после удаления тренда. Временная шкала соответствует изменениям переноса, аномалии ТПО сдвинуты на три года вперед. Правая колонка графиков представляет сглаженные скользящим осреднением по 3 года ряды из левой колонки: а→б, в→г, д→е.

Запаздывание аномалий МАПТ относительно аномалий ТПО в октябре составляет 27 месяцев, считая от октября до января на 3-ем году, а относительно аномалии ТПО в августе – 29 месяцев. На графиках годы на оси абсцисс соответствуют значениям аномалий МАПТ. Аномалии ТПО опережают аномалии МАПТ на 3 года в соответствии с установленными запаздываниями ТПО. Поэтому последние три точки на графиках аномалий ТПО можно рассматривать как указание на значительный рост зимних МАПТ в ближайшие 3 года (2016-2018 гг.) и, соответственно, зимней приповерхностной температуры воздуха в Арктике.

Обсуждение

Зависимость межгодовых колебаний зимних атмосферных переносов тепла в Арктику от аномалий ТПО в низких широтах океана установлена при запаздываниях МАПТ до 2.5 лет (от 23 до 30 месяцев). Рассмотренные во введении результаты исследований влияния низкоширотных аномалий ТПО на Арктику предполагают в качестве основного механизма циркуляцию атмосферы. Аномалии ТПО влияют на атмосферные циркуляционные моды, переносящие тепло и влагу в высокие широты. При этом реакция характеристик погоды и климата в Арктике на аномалии ТПО наступает с запаздыванием от 1-2 недель для атмосферных характеристик (Yoo et al., 2011) до нескольких месяцев для летнего морского льда в Арктике (Wettstein, Deser, 2014).

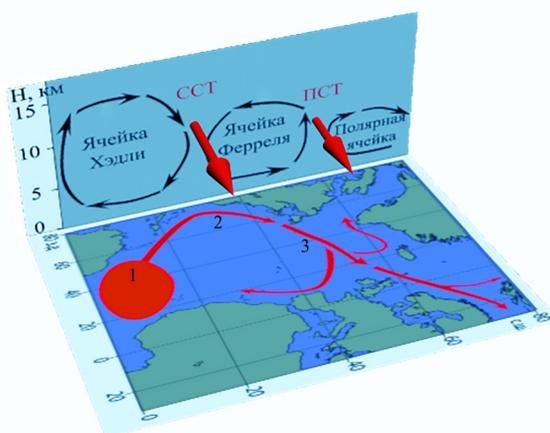


Рисунок 3. Схема передачи влияния аномалий ТПО в низких широтах Северной Атлантики в Арктику.

1 — аномалия ТПО, 2 — Гольфстрим, 3 — Северо-Атлантическое течение и его продолжение в виде Норвежского и Западно-Шпицбергенского течений, ССТ — субтропическое струйное течение в атмосфере, ПСС — полярное струйное течение

Запаздывания в несколько лет могут возникать лишь при участии океана в совместном механизме воздействия низкоширотных аномалий ТПО на Арктику включающем циркуляцию океана и атмосферы. Недавно нами были обнаружены влияние аномалий ТПО в низких широтах Северной Атлантики на колебания притока и площадь морских льдов в Баренцевом море (Алексеев и др., 2016б) и на площадь льдов в Северном Ледовитом океане (Алексеев, Глок, 2016) с запаздываниями до 4-х лет. Для объяснения механизма запаздывающего влияния была предложена схема передачи влияния аномалий ТПО с участием атмосферных и океанических циркуляционных мод (рис. 3).

По результатам выполненного исследования схема уточнена с учетом совместного влияния аномалий ТПО в низких широтах Атлантического,

Индийского и Тихого океанов на атмосферные циркуляционные моды и систему циркуляции в Северной Атлантике. Предполагается, что аномалии ТПО в низких широтах усиливают атмосферные циркуляционные ячейки Хедли и Ферреля, отражающие увеличение меридиональной атмосферной циркуляции, ослабляют Северо-Атлантическое колебание в атмосфере, что способствует уменьшению потерь тепла океаном и все это вместе увеличивает океанический перенос тепла в системе Гольфстрим, Северо-Атлантическое, Западно-Шпицбергенское и Норвежское течения. Конечное звено в схеме – усиление океанического притока тепла в Норвежское и Баренцево моря и атмосферных переносов в Арктику.

Оценим вначале влияние аномалий ТПО в низких широтах трех океанов на поступление атлантической воды (АВ) в Баренцево море с помощью корреляций между ТПО и температурой воды на разрезе по Кольскому меридиану (Ткм), являющейся репрезентативным показателем притока АВ (Карсаков, 2009). В табл. 2 приведены коэффициенты корреляции и в скобках соответствующие запаздывания Ткм относительно ТПО. На рис. 4 показаны графики рядов нормированных аномалий ТПО в низкоширотной области Северной Атлантики и Ткм, подтверждающие высокую степень согласия между их межгодовыми изменениями.

Таблица 2. Корреляция между аномалиями ТПО в низких широтах океанов и температурой воды в слое 50–200 м на разрезе по Кольскому меридиану (Ткм) в декабре-феврале (спустя “n” месяцев) за 1977–2014 гг.

Аномалия ТПО	Ткм (50-200м), ДЯФ
В Атлантическом океане, октябрь	0.76/0.46 (27)
В Индийском океане, октябрь	0.74/0.49 (27)
В Тихом океане, июль	0.15/0.11 (30)
В области 10° с.ш. - 10° ю.ш., август	0.55/0.34 (29)

Через косую черту указаны коэффициенты корреляции после удаления тренда

Из табл. 2 следует, что наибольшее влияние на приток атлантической воды в Баренцево море связано с аномалиями ТПО в Атлантическом и Индийском океанах, причем с одинаковым запаздыванием. Это означает, что влияние аномалий ТПО передается через одну и ту же атмосферную циркуляционную моду, влияющую на океанический перенос тепла в Северной Атлантике. Такой циркуляционной модой может быть Северо-Атлантическое колебание (САК), изменяющееся под влиянием аномалий ТПО в Атлантическом, Индийском и Тихом океанах (Нестеров, 2013; Robertson et al., 2000; Hoerling et al., 2001; Sutton, Hodson, 2002; и др.). В настоящей статье это подтверждается корреляционным анализом связи между аномалиями ТПО и индексами Северо-Атлантического колебания, который показал отрицательную корреляцию между ними для всех трех океанов.

Наиболее заметная корреляция отмечена между аномалиями средних за год значений атлантической ТПО и индекса САК, равная -0.68. Для аномалий среднегодовых ТПО в Индийском океане и САК коэффициент корреляции

составил -0.49 . Для Тихоокеанской области корреляция ТПО и САК также отрицательна, но незначима. Недавно в работе (Ding et al., 2014) было показано, что современное потепление в северо-восточной Канаде и Гренландии связано с отрицательным трендом САК, который, в свою очередь, отражает усиление волн Россби, берущих начало в тропической области Тихого океана. Отмечено, что в результатах экспериментов с глобальными моделями климата из CMIP5 с антропогенным форсингом не найдено аналогичных изменений в циркуляции и потеплении.

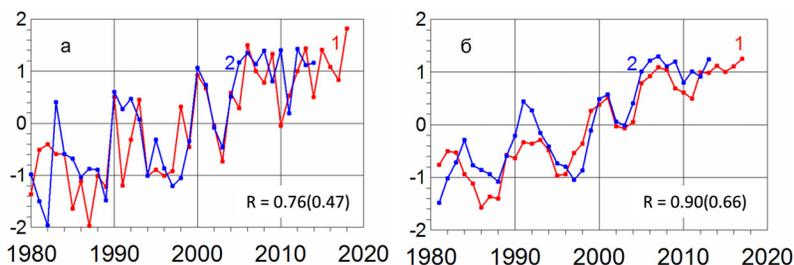


Рисунок 4. (а) – межгодовые изменения нормированных аномалий ТПО в низкоширотной области Северной Атлантики в октябре (1) и температуры воды в слое 50–200 м на ст. 3–7 на разрезе по Кольскому меридиану в декабре-феврале (2). (б) – то же после сглаживания рядов скользящим усреднением по 3 года.

R – коэффициент корреляции между рядами (1) и (2), в скобках – коэффициент корреляции после удаления тренда.

В работе (Hoerling et al., 2001) была отмечена отрицательная связь между аномалиями ТПО в низких широтах океана и индексом САК, а также отрицательная корреляция между САК и ТПО в Северной Атлантике выше 40° с.ш.. Такое соответствие между САК и ТПО особенно ярко проявляется при экстремально низком и высоким среднегодовых значениях САК. На рис. 5 показаны среднегодовые аномалии ТПО в 2010 году, когда было отмечено минимальное среднегодовое значение САК (-1.29), и аномалии ТПО в 1989 году при максимальном положительном среднегодовом значении САК (0.68) за 1950-2015 гг. Похожее распределение аномалий ТПО было найдено ранее в работе (Нестеров, 2013) для среднемесячных значений ТПО в сентябре, соответствующее отрицательным и положительным аномалиям САК в последующем январе.

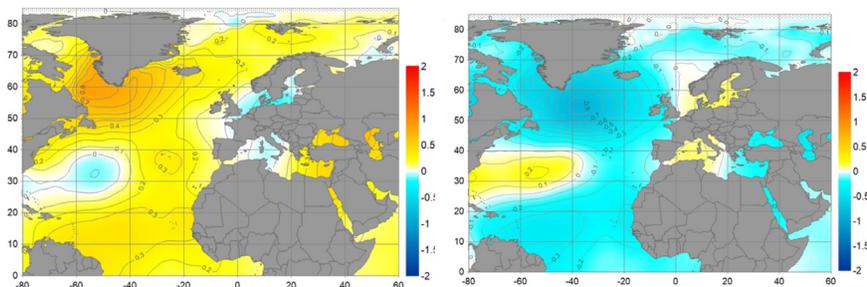


Рисунок 5. Среднегодовые аномалии ТПО при экстремальных среднегодовых значениях индекса САК за 1950-2015 гг.: (а) – при отрицательном САК в 2010 году, (б) – при положительном САК в 1989 году.

Из рис. 5 следует, что отрицательному индексу САК соответствует положительным аномалиям ТПО в низких широтах и в области севернее 50° с.ш., а при положительном индексе аномалии распределены противоположным образом. Такое соответствие сохраняется в межгодовой изменчивости САК и ТПО в 1980-2015 гг. (рис. 6). При отрицательной фазе САК зональная составляющая ветра над Северной Атлантикой ослаблена, а ее максимум находится южнее 40° с.ш. При положительном индексе САК зональный ветер усилен с максимумом севернее 50° с.ш., что способствует охлаждению океана и формированию отрицательной аномалии ТПО (см. рис. 5,б).

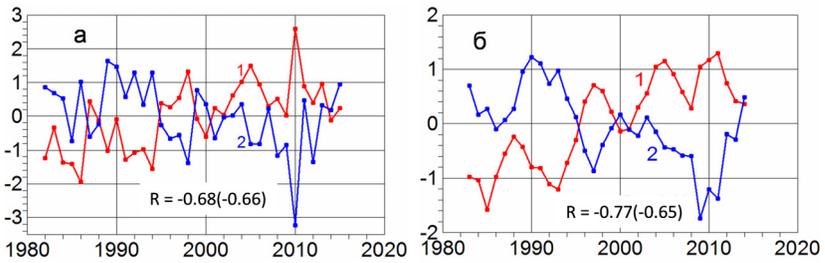


Рисунок 6. (а) – нормированные аномалии среднегодовой ТПО в низкоширотной области Северной Атлантики (1) и среднегодового индекса САК (2). (б) – то же после сглаживания скользящим средним по 3 года.

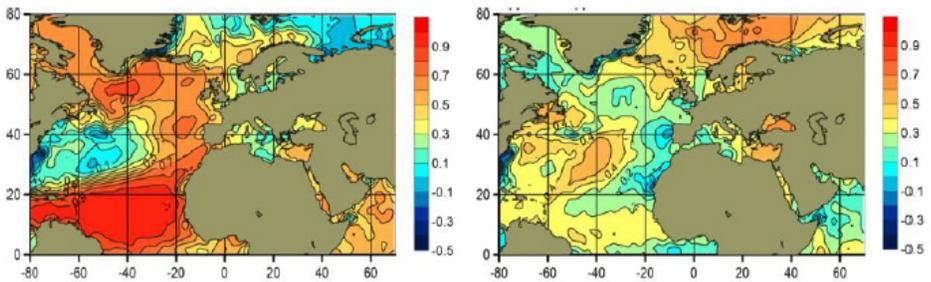


Рисунок 7. Поле корреляций между аномалией среднегодовой ТПО в тропической области Северной Атлантики и аномалиями среднегодовой ТПО на всей акватории в 1980-2015 гг. (а) – синхронная корреляция, (б) – с запаздыванием 3 года относительно ТПО в тропиках.

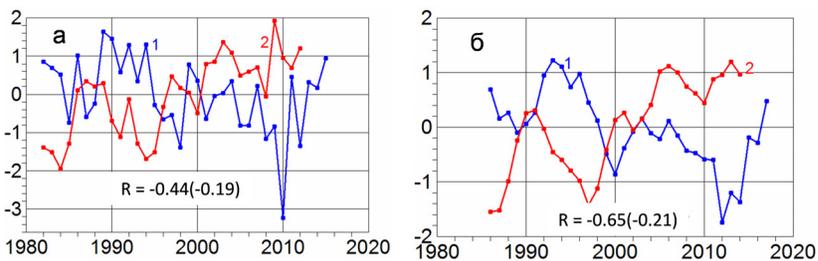


Рисунок 8. (а) – нормированные среднегодовые значения САК (1) и температуры воды на разрезе по Кольскому меридиану в слое 50–200м (2). (б) – то же после сглаживания по 3 года. *R* – коэффициент корреляции между (1) и (2), в скобках - коэффициент корреляции после удаления тренда. Временная шкала соответствует изменениям температуры, изменения САК сдвинуты на 3 года вперед.

Положительная аномалия ТПО в области севернее 40° с.ш., соответствующая положительной аномалии ТПО в тропиках Северной Атлантики и отрицательному индексу САК, через три года проявляется в Норвежском и Баренцевом морях (рис. 7), что согласуется с изменениями температуры АВ на Кольском меридиане в Баренцевом море, а также с изменениями среднегодового индекса САК (рис. 8).

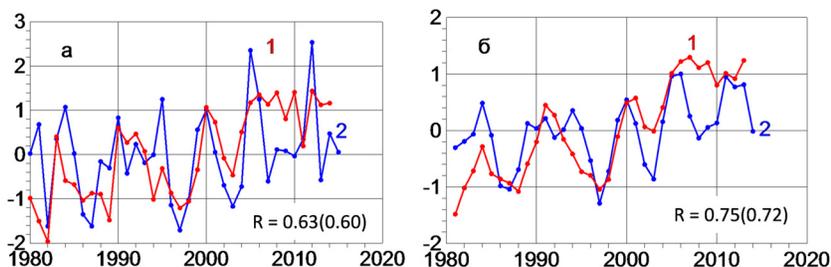


Рисунок 9. (а) – нормированные значения зимних атмосферных переносов тепла в Арктику на 1000 гПа через «атлантические ворота» на 70° с.ш. (1) и температура воды в слое 50–200м на разрезе по Кольскому меридиану в феврале (2). (б) – то же после сглаживания по 3 года. R – коэффициент корреляции между (1) и (2), в скобках – коэффициент корреляции после удаления тренда.

Судя по корреляции между переносом и температурой воды на Кольском меридиане, положительной аномалии ТПО в Норвежском и Баренцевом морях соответствует усиление зимних атмосферных переносов через «атлантические ворота» в Арктику (рис. 9). Максимум корреляции зимних атмосферных переносов явного тепла с температурой воды на Кольском меридиане приходится на февраль.

Выводы

Установлено запаздывающее влияние аномалий ТПО в низких широтах Атлантического, Индийского и Тихого океанов, располагающихся в областях так называемых «warm pools» в каждом из океанов, на зимний атмосферный перенос тепла в Арктику через «атлантические ворота» на 70° с.ш. (от 0° до 80° с.ш.). Эти же аномалии ТПО влияют на температуру воды, поступающей из Северной Атлантики в Баренцево море, являющуюся репрезентативным показателем притока АВ в Баренцево море.

Одинаковое запаздывание положительной реакции зимних атмосферных переносов на аномалии ТПО во всех трех океанах и такое же запаздывание реакции температуры АВ в Баренцевом море указывают на общий атмосферный механизм передачи влияния аномалий ТПО и на совпадение знака реакции атмосферного и океанического переносов тепла в Арктику через «атлантические ворота» на эти аномалии.

Значительное запаздывание (более 2-х лет) реакции атмосферного и океанического притоков тепла на аномалии ТПО в низких широтах, превышающее возможное запаздывание при атмосферном механизме передачи влияния

аномалий, означает участие океанического механизма. Иными словами, влияние низкоширотных аномалий ТПО на переносы тепла в Арктику осуществляется при взаимодействии океанических и атмосферных циркуляционных структур.

В атмосфере такой циркуляционной структурой является Северо-Атлантическое колебание (САК), отрицательно коррелированное с аномалиями низкоширотных ТПО во всех трех океанах. Отрицательной моде САК, преобладающей в течении года при положительной аномалии ТПО в низких широтах, соответствует положительная аномалия ТПО в высоких широтах Северной Атлантики, которая через три года проявляется в Норвежском и Баренцевом морях.

При положительной в среднем за год фазе САК на акватории Северной Атлантики преобладают отрицательные аномалии ТПО, а в атмосфере над океаном северу от 40° с.ш. усилен зональный перенос, способствующий охлаждению океана. Таким образом, САК участвует в передаче влияния низкоширотных аномалий ТПО через воздействие на ТПО к северу от 40° с.ш., которое при отрицательной фазе САК уменьшается, а при положительной фазе возрастает вследствие роста потока тепла из океана в атмосферу, переносимого затем на сушу.

Океаническая система циркуляции, включающая Гольфстрим, Северо-Атлантическое течение и его продолжения в Северо-Европейском бассейне, определяет распространение влияния аномалии ТПО из низких широт Северной Атлантики в Арктику, испытывающее при этом воздействие атмосферной циркуляции.

Начальным воздействием в системе влияния низкоширотных аномалий ТПО на Арктику является практически одновременное их формирование во всех трех океанах, вызывающее усиление меридиональных циркуляций и меридиональных переносов в атмосфере, а в Атлантическом океане – интенсификацию системы циркуляции и увеличение меридионального переноса тепла. На выходе через 2.25 года отмечается рост температуры воды в Баренцевом море и увеличение зимних атмосферных переносов тепла через «атлантические ворота» на 70° с.ш.

Статья подготовлена по результатам работы по гранту РФФИ 15-05-03512.

Благодарности

Авторы благодарны А.Е. Вязиловой за помощь в подготовке рисунков и рецензенту за полезные замечания, устранение которых способствовало более полному учету предшествующих исследований и уточнению полученных оценок.

Список литературы

Алексеев Г.В., Глок Н.И. 2016. Влияние приэкваториальной Северной Атлантики на потепление и сокращение площади морского льда в Арктике. – Проблемы Арктики и Антарктики, № 4, с. 80–87.

Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Уразгильдеева А.В., Бобылев Л.П. 2016а. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на усиление потепления в Арктике в зимний период. – *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 1, с. 43–63.

Алексеев Г.В., Глок Н.И., Смирнов А.В., Вязилова А.Е. 2016б. Влияние Северной Атлантики на колебания климата в Баренцевом море и их предсказуемость. – *Метеорология и гидрология*, т. 8, с. 38–56.

Визе В.Ю. 1937. Причины потепления Арктики. – *Советская Арктика*, т. 1, с. 1–7.

Голицын Г.С. 1973. Введение в динамику планетных атмосфер. – Л., Гидрометиздат, 103 с.

Карсаков А.Л. 2009. Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море за период 1900-2008 гг. – Мурманск, Изд-во ПИНРО, 2009, 139 с.

Марчук Г.И., Скиба Ю.Н. 1976. Численный расчет сопряженной задачи для моделей термического взаимодействия атмосферы с океаном и континентом. – *Изв. АН СССР, ФАО*, т. 12, № 5, с. 16–24.

Мохов И.И., Смирнов Д.А. 2006. Исследование взаимного влияния процессов Эль-Ниньо – Южное колебание и Северо-Атлантического и Арктического колебаний. – *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*, т. 42, № 5, с. 650–667.

Нестеров Е.С. 2000. Изменчивость характеристик атмосферы и океана в атлантико-европейском регионе в годы событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья. – *Метеорология и гидрология*, № 8, с. 74–83.

Нестеров Е.С. 2013. Северо-Атлантическое колебание: атмосфера и океан. – Москва, ГМЦ РФ, 127 с.

Николаев Ю.В. 1981. Крупномасштабное взаимодействие океана и атмосферы и формирование аномалий погоды. – Л., Гидрометеоздат, 51 с.

Adam O., Schneider T., Harnik N. 2014. Role of Changes in Mean Temperatures versus Temperature Gradients in the Recent Widening of the Hadley Circulation. – *J. Clim.*, vol. 27, No. 19, pp. 7450–7461.

Årthun M., Eldevik T. 2016. On Anomalous Ocean Heat Transport toward the Arctic and Associated Climate Predictability. – *J. Clim.*, vol. 29, No. 2, pp. 689–704.

Barrett B.S., Henderson G.R., Werling J.S. 2015. The Influence of the MJO on the Intraseasonal Variability of Northern Hemisphere Spring Snow Depth. – *J. Clim.*, vol. 28, No. 18, pp. 7250–7262.

Bjerknes J. 1964. Atlantic Air-Sea Interaction. – *Advances in Geophysics*, vol. 10, pp. 1–82.

Dee D.P. et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. – *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 137, pp. 553–597.

Ding Q., Wallace J.M., Battisti D.S., Steig E.J., Gallant A.J.E., Kim H-J., Geng L. 2014. Tropical forcing of the recent rapid Arctic warming in northeastern Canada and Greenland. – *Nature*, vol. 509, pp. 209–213.

Garfinkel C.I., Waugh D.W., Polvani L.M. 2015. Recent Hadley cell expansion: The role of internal atmospheric variability in reconciling modeled and observed trends. – *Geophys. Res. Lett.*, vol. 42, No. 24, pp. 10824–10831.

Goss M., Feldstein S.B., Lee S. 2016. Stationary Wave Interference and Its Relation to Tropical Convection and Arctic Warming. – *J. Clim.*, vol. 29, No. 4, pp. 1369–1389.

He J., Soden B.J., Kirtman B. 2014. The robustness of the atmospheric circulation and precipitation response to future anthropogenic surface warming. – *Geophys. Res. Lett.*, vol. 41, No. 7, pp. 2614–2622.

Held I.M. 2001. The Partitioning of the Poleward Energy Transport between the Tropical Ocean and Atmosphere. – *J. Atmos. Sci.*, vol. 58, No. 8, pp. 943–948.

Hoerling M.P., Hurrell J.W., Xu T. 2001. Tropical origins for recent North Atlantic climate change. – *Science*, vol. 292, pp. 90–92.

Huang J., McElroy M.B. 2014. Contributions of the Hadley and Ferrel Circulations to the Energetics of the Atmosphere over the Past 32 Years. – *J. Climate*, vol. 27, pp. 2656–2666.

IPCC 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* /eds. R.K. Pachauri, L.A. Meyer. – Geneva, Switzerland, 151 p.

Jungclaus J.H., Koenigk T. 2010. Low-frequency variability of the arctic climate: The role of oceanic and atmospheric heat transport variations. – *Clim. Dyn.*, vol. 34, pp. 265–279.

Koenigk T. et al. 2013. Arctic climate change in 21st century CMIP5 simulations with EC-Earth. – *Clim. Dyn.*, vol. 40, No. 11, pp. 2719–2743.

Lee S., Gong T., Johnson N., Feldstein S.B., Pollard D. 2011. On the possible link between tropical convection and the northern hemisphere arctic surface air temperature change between 1958 and 2001. – *J. Clim.*, vol. 24, pp. 4350–4367.

Misios S., Schmidt H. 2013. The role of the oceans in shaping the tropospheric response to the 11 year solar cycle. *Geophys. – Res. Lett.*, vol. 40, No. 24, pp. 6373–6377.

Palmer M.D., Haines K., Tett S.F.B., Ansell T.J. 2007. Isolating the signal of ocean global warming. – *Geophys. Res. Lett.*, vol. 34, L23610. doi: 10.1029/2007GL031712.

Park H.S., Lee S., Son S.W., Feldstein S.B., Kosaka Y. 2015. The impact of poleward moisture and sensible heat flux on arctic winter sea ice variability. – *J. Clim.*, vol. 28, No. 13, p. 5030–5040.

Robertson A.W., Mechoso C.R., Kim Y.-J. 2000. The influence of Atlantic sea surface temperature anomalies on the North Atlantic Oscillation. – J. Climate, vol. 13, No. 1, pp. 122–138.

Sandø A.B., Gao Y., Langehaug H.R. 2014. Poleward ocean heat transports, sea ice processes, and Arctic sea ice variability in NorESM1-M simulations. – J. Geophys. Res. Ocean., vol. 119, No. 3, pp. 2095–2108.

Sutton R.T., Hodson D.L.R. 2002. Influence of the ocean on North Atlantic climate variability 1871-1999. – J. Climate, vol.16, pp. 3296-3313.

Taylor P.C. et al. 2013. A decomposition of feedback contributions to polar warming amplification. – J. Clim., vol. 26, pp. 7023–7043.

Wang C., Lee S.K., Enfield D.B. 2008. Climate response to anomalously large and small Atlantic warm pools during the summer. – J. Clim., vol. 21, No. 2007, pp. 2437–2450.

Wettstein J.J., Deser C. 2014. Internal Variability in Projections of Twenty-First-Century Arctic Sea Ice Loss: Role of the Large-Scale Atmospheric Circulation. – J. Clim. vol. 27, No. 2, pp. 527–550.

Ye K., Wu R., Liu Y. 2015. Interdecadal change of Eurasian snow, surface temperature, and atmospheric circulation in the late 1980s. – J. Geophys. Res. Atmos., vol. 120, No. 7, pp. 2738–2753.

Yoo C., Feldstein S., Lee S. 2011. The impact of the Madden-Julian Oscillation trend on the Arctic amplification of surface air temperature during the 1979-2008 boreal winter. – Geophys. Res. Lett., vol. 38, No. 24. doi: 10.1029/2011GL049881.

Yoo C., Lee S., Feldstein S.B. 2012. Arctic Response to an MJO-Like Tropical Heating in an Idealized GCM. – J. Atmos. Sci., vol. 69, No. 8, pp. 2379–2393.

Yu B., Lin H. 2016. Tropical Atmospheric Forcing of the Wintertime North Atlantic Oscillation. – J. Clim., vol. 29, No. 5, pp. 1755–1772.

Статья поступила в редакцию: 25.01.2017

После переработки: 30.03.2017