

# Морские, речные и озёрные льды

УДК551.46

doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-381-390

## Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике

© 2017 г. Г.В. Алексеев<sup>1</sup>, С.И. Кузмина<sup>2</sup>, Н.И. Глок<sup>1</sup>, А.Е. Вязилова<sup>1</sup>, Н. Е. Иванов<sup>1</sup>, А.В. Смирнов<sup>1</sup><sup>1</sup>Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия;<sup>2</sup>Научный центр им. Нансена «Нансен-Центр», Санкт-Петербург, Россия

alexgv@aari.ru

### Influence of Atlantic on the warming and reduction of sea ice in the Arctic

G.V. Alekseev<sup>1</sup>, S.I. Kuzmina<sup>2</sup>, N.I. Glok<sup>1</sup>, A.E. Vyazilova<sup>1</sup>, N.E. Ivanov<sup>1</sup>, A.V. Smirnov<sup>1</sup><sup>1</sup>Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia, <sup>2</sup>Nansen Centre, St. Petersburg, St. Petersburg, Russia

alexgv@aari.ru

Received February 16, 2017

Accepted April 27, 2017

Keywords: Arctic, Atlantic, sea ice, SST anomalies.

#### Summary

Influence of anomalies of the sea surface temperature (SST) in low latitudes of the North Atlantic on the sea ice cover and the near-surface air temperature in the marine Arctic is discussed in the article. Data on the SST in the Atlantic Ocean from the HadISST dataset, climatic series of the water temperature at the section along the Kola meridian together with mean monthly data on the sea ice extent and the air surface temperature in the Maritime Arctic and the Northern hemisphere were analyzed. Multivariate cross-correlation analysis was applied to determine the maximum correlation coefficients between the SST anomalies, climate characteristics and their corresponding delays within time limits of 33 to 38 months. Existence of intimate link had been found between changes of the Atlantic SST in low latitudes and the sea ice extent in the Arctic with correlation coefficients up to 0.90 and delays up to 3 years. A mechanism of formation of the remote influence of low-latitude SST anomalies on the sea ice anomalies in the Arctic Ocean is proposed. The interpretation of this mechanism includes into consideration the interaction between atmospheric and oceanic circulation modes.

**Citation:** Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glok N.I., Vyazilova A.E., Ivanov N.E., Smirnov A.V. Influence of Atlantic on the warming and reduction of sea ice in the Arctic. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017. 57 (3): 381–390. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-381-390

Поступила 16 февраля 2017 г.

Принята к печати 27 апреля 2017 г.

**Ключевые слова:** аномалии температуры поверхности океана, Арктика, Атлантика, морской лёд.

Установлена связь между аномалиями температуры поверхности океана в приэкваториальной области Северной Атлантики и аномалиями приповерхностной температуры воздуха и площадью морского льда в Северном Ледовитом океане в разные месяцы. Механизм формирования удалённого влияния аномалий температуры поверхности океана на аномалии в Северном Ледовитом океане связан с системой взаимодействий между циркуляцией атмосферы и океана, переносящих тепло в высокие широты.

#### Введение

Проблемы изменений климата Арктики, причин и механизмов его усиления, взаимодействия с другими частями глобальной климатической системы, предсказуемости изменений и их последствий постоянно привлекают внимание научного сообщества, вовлечённого в исследования проблем глобальных и региональных климатических изменений. Работы, начатые в 1930-е годы, показали важную роль атмосферной циркуляции в разви-

тии потепления Арктики в 1930–40-е годы [1–3]. В настоящее время интерес к роли переноса тепла и влаги в атмосфере возрос в связи с проблемой глобального потепления и его усиления в Арктике (арктическое усиление). Расчёты меридиональных атмосферных переносов тепла и влаги на различных изобарических поверхностях по данным реанализа ERA-Interim, приведённые в работе [4], показали, что основной приток явного и скрытого тепла в высокоширотную Арктику в зимний период поступает через атлантическую часть её южной

границы по 70° с.ш. (от 0° до 80° в.д.) в слое от поверхности до 750 гПа с максимумом на 1000 гПа. Вклад этого притока в тренд средней зимней температуры воздуха на поверхности в области 70–90° с.ш. составляет более 40% за период наибольшего роста температуры в Арктике в 1997–2014 гг.

Во многих работах, выполненных по результатам глобального моделирования климата, установлено влияние арктического усиления и связанного с ним сокращения площади морского льда на циркуляцию атмосферы [5–10] и аномалии климата [10, 11] в средних широтах. Однако в ряде недавних работ, в основу которых также положены результаты глобального моделирования климата [12–15], этого не обнаружено, а предполагается, что основная роль принадлежит аномалиям температуры воды на поверхности океана. Воздействие аномалий температуры поверхности океана и меридионального переноса тепла в океане на колебания климата Арктики исследовалось многими учёными. Отмечается связь аномалий температуры поверхности океана в низких широтах и поступления тепла с циркуляцией океана на морской лёд и в атмосферу в Арктике [16–20]. Важная климатообразующая роль температуры поверхности океана в низких широтах океана связана с тем, что здесь сосредоточена основная часть притока тепла при потеплении [21] из 93% притока, приходящегося на океан [22].

Приток воды из Атлантики в Северо-Европейский бассейн влияет на распространение морских льдов зимой и на изменение площади открытой воды и температуры воздуха в этом регионе Арктики. На остальной акватории, к которой относятся Арктический бассейн и арктические моря на амеразийском шельфе, покрытые зимой льдом, прямое воздействие притока воды из Атлантики на площадь морского ледяного покрова и температуру воздуха зимой отсутствует. Однако из Северной Атлантики сюда поступают тёплые и влажные воздушные массы, которые повышают приповерхностную температуру воздуха и замедляют нарастание льда в зимний период. Анализ материалов наблюдений подтвердил [16], что изменения притока атлантической воды определяют основную часть межгодовой изменчивости площади льда, температуры воды и температуры воздуха в Баренцевом море в холодный период года. При этом обнаружена связь аномалий температуры воды в экваториальной области Северной

Атлантики и характеристик климата Баренцева моря, реакция которых отстаёт от соответствующих аномалий на срок до нескольких лет.

В настоящей работе выполнен обзор и дополнены материалы недавних исследований роли аномалий температуры поверхности океана в низких широтах Северной Атлантики в потеплении и сокращении площади льда в морской области Арктики.

### Материалы и методы исследования

Исследования океанического влияния на сокращение морского ледяного покрова и потепление в Арктике основаны на материалах реанализов и наблюдений за характеристиками океана, морского льда и атмосферы. Использованы данные о температуре воды на поверхности Атлантического океана из архива HadISST [23] с пространственным разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$  за период с 1951 по 2015 г., а также ряды среднемесячной температуры воды на поверхности океана в низкоширотных областях Мирового океана с сайта <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>. Среднемесячная приповерхностная температура воздуха в морской части Арктики определена по данным наблюдений на 41 станции [24]. Данные о среднемесячной площади морского льда в Северном Ледовитом океане подготовлены в ААНИИ В.М. Смоляницким и помещены на сайте <http://www.aari.ru/datasets> [25]. Среднемесячная площадь морского ледяного покрова в Северном полушарии взята на сайте [http://nsidc.org/data/seaice\\_index/](http://nsidc.org/data/seaice_index/). 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 [26], размещённым на сайте <http://www.pinro.ru/n22/index/phpstructure/labs/labhidro/>.

Инструментом количественной оценки связи между аномалиями температуры поверхности океана, площадью морского льда и приповерхностной температурой воздуха послужил многомерный взаимно-корреляционный анализ использованных рядов для определения максимальных коэффициентов корреляции  $\rho_{mk}$  между аномалиями температуры поверхности океана, характеристиками климата и соответствующих им запаздываний. Расчёты коэффициентов

корреляции выполнялись при запаздываниях от нуля до пяти лет:

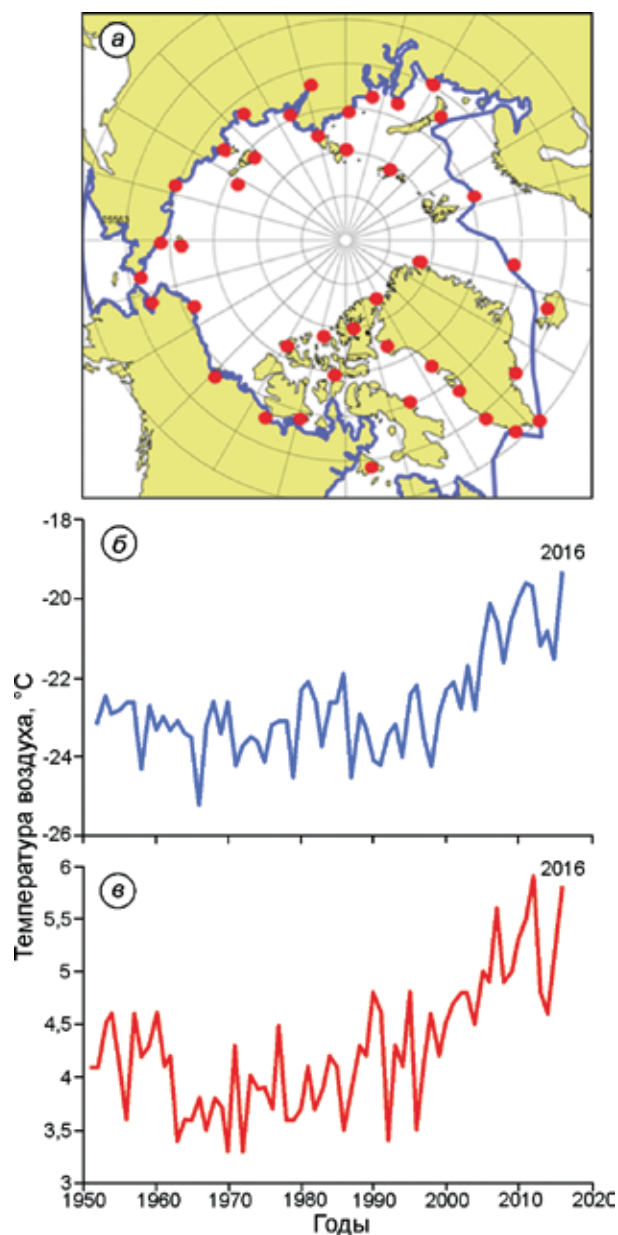
$$\rho_{mk} = \frac{1}{N-k} \sum_{g=1}^{N-k} (T_{mg} \times M_{g+k}),$$

где  $T$ ,  $M$  – нормированные значения температуры поверхности океана и меридионального атмосферного переноса тепла (МАПТ);  $g = 1, 2, \dots, N$  – годы;  $N$  – длина ряда;  $m = 1, 2, \dots, 12$  – месяцы;  $k = 0, 1, 2, \dots$  – запаздывание (годы).

### Потепление и сокращение площади льда в морской Арктике в 2016 г.

В области морской Арктики 2016 г также оказался самым тёплым за период наблюдений с 1951 г., превзойдя на  $0,7$  °C самый тёплый до этого 2012 г. Средняя приповерхностная температура воздуха зимой в этой области в 2016 г. по данным 41 станции составила  $-19,3$  °C (рис. 1, б), что на  $3,4$  °C выше средней зимней температуры за 1951–2016 гг. Летом средние температуры 2016 и 2012 гг. различались всего на  $0,1$  °C (см. рис. 1, в), что отодвинуло 2016 г. на второе место в ряду тёплых летних сезонов. Средняя температура воздуха весной 2016 г. одинакова со средней приповерхностной температурой воздуха самой тёплой весны 2012 г. Осень 2016 г. стала самой тёплой с начала наблюдений в 1951 г. Положительные аномалии температуры воздуха зимой 2016 г. достигли наибольших значений в северной части Баренцева и Карского морей (рис. 2, а). В значительной степени это вызвано усилением меридионального атмосферного переноса тепла через приатлантическую часть от 0 до  $80^\circ$  в.д. на  $70^\circ$  с.ш. (атлантические «ворота») в высокоширотную Арктику [4]. Усиление притока (см. рис. 2, в) сопровождается положительными аномалиями приповерхностной температуры воздуха в районе Баренцева и особенно Карского морей (см. рис. 2, а), а ослабление – отрицательными аномалиями приповерхностной температуры воздуха (см. рис. 2, б).

Зимнее потепление 2016 г. повлияло на сезонное разрастание площади морского льда в Арктике, которое происходило медленнее, чем обычно с начала спутниковых наблюдений в 1978 г. В результате в марте, когда наблюдается максимум площади льдов, он оказался самым низким за период наблюдений. В дальнейшем, с началом та-

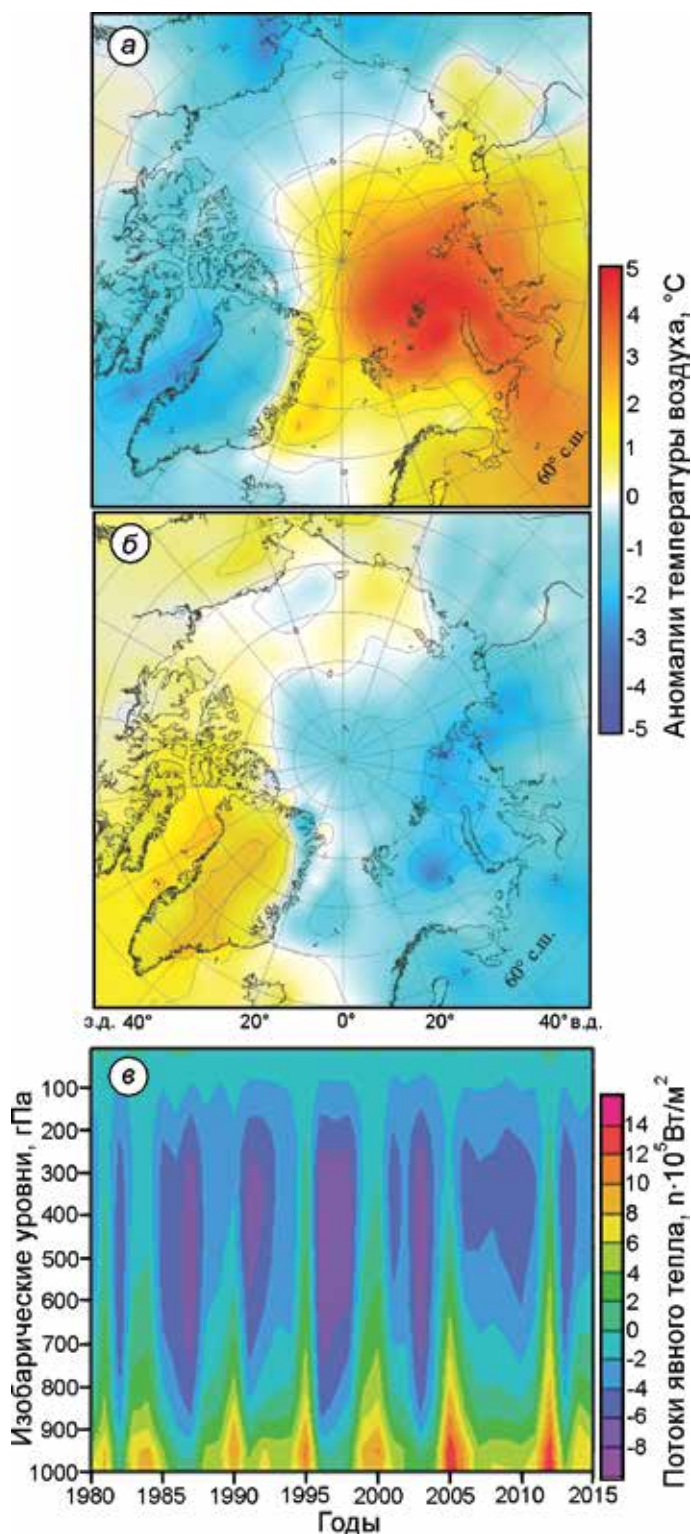


**Рис. 1.** Средняя за декабрь–февраль (б) и за июнь–август (в) приповерхностная температура воздуха на 41 станции в морской Арктике (а) в 1951–2016 гг. Точки на карте – положение станций

**Fig. 1.** The average surface air temperature for December–February (б) and June–August (в) at 41 stations in the marine Arctic (а) in 1951–2016.

Points on the map – the position of the stations

яния льдов, летнее сокращение площади также замедлилось и наступивший в сентябре минимум площади льда в Северном Ледовитом океане, по данным ААНИИ [25], достиг  $4,45$  млн км<sup>2</sup>, что, однако, было лишь четвёртым минимальным значением площади льда в сентябре за период



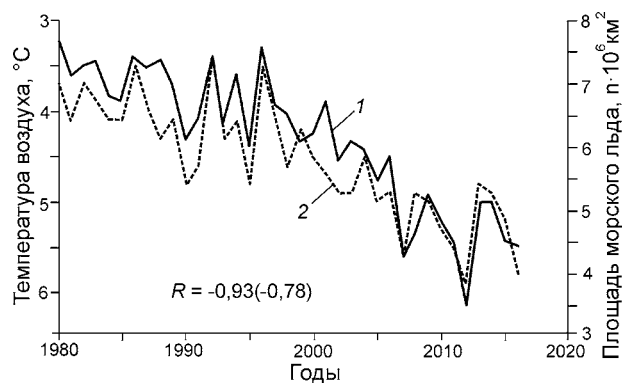
**Рис. 2.** Влияние аномалий меридионального атмосферного переноса тепла на приповерхностную температуру воздуха в Арктике: *a* – средние аномалии зимней приповерхностной температуры воздуха в года больших значений меридионального атмосферного переноса тепла (МАПТ); *б* – то же в года с малыми значениями меридионального атмосферного переноса тепла. Аномалии приповерхностной температуры воздуха рассчитаны по данным реанализа Interim [32] относительно среднего за 1979–2015 гг.; *в* – распределение средних за зиму осреднённых на участке 0–80° в.д. МАПТ на изобарических уровнях за 1980–2015 гг. [4]

**Fig. 2.** Influence of meridional atmospheric heat transport anomalies on surface air temperature in the Arctic: *a* – the average winter surface air temperature anomaly in the years of higher of meridional atmospheric heat transport; *b* – in the years with low of meridional atmospheric heat transport. anomalies calculated from reanalysis Interim data [32] relative to the average for 1979–2015; *c* – surface air temperature distribution of average winter of meridional atmospheric heat transport trough 0–80° E at pressure levels in 1980–2015 [4]

наблюдений. При этом площади льда в сентябре находятся в тесном соответствии с летними температурами воздуха в морской Арктике (рис. 3).

Недавно выполненные в ААНИИ исследования показали связь межгодовых изменений при-

поверхностной температуры воздуха и площади льда в Северном Ледовитом океане с аномалиями температуры воды на поверхности океана в низких широтах Северной Атлантики [16, 27]. Аномалии температуры поверхности океана в эквато-



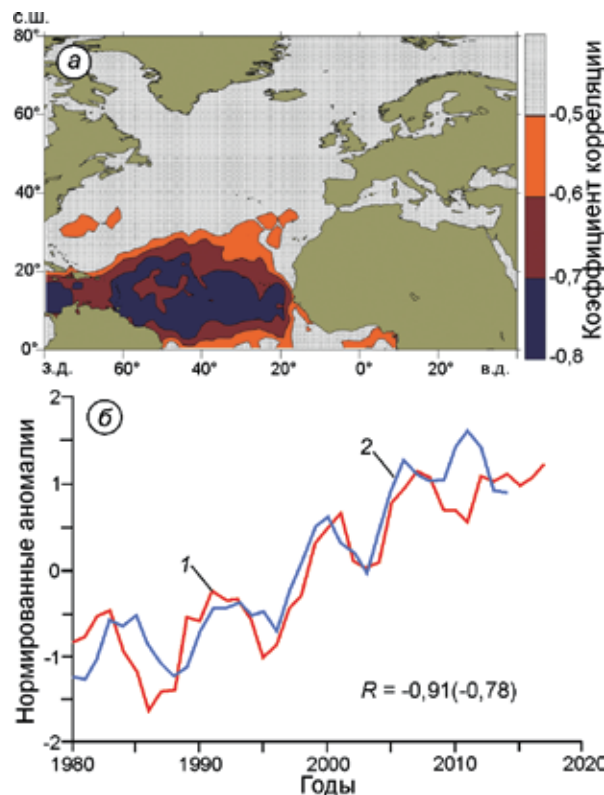
**Рис. 3.** Средняя площадь морского льда в сентябре в Северном Ледовитом океане (1) по данным ААНИИ [25] и летняя приповерхностная температура воздуха в морской Арктике (2) в 1980–2016 гг.

Шкала температуры перевёрнута.  $R$  – коэффициент корреляции между площадью льда и температурой воздуха. В скобках – то же для отклонений от квадратичного тренда  
**Fig. 3.** The average September sea ice extent (1) in the Arctic according to AARI data [25] and summer surface air temperature in the marine Arctic (2) in 1980–2016. Temperature scale is reversed.  $R$  – correlation coefficient between sea ice extent and air temperature. In brackets – for deviations from the quadratic trend

риальной области Северной Атлантики (рис. 4, а) сильнее всего влияют на площадь льда в Северном Ледовитом океане в декабре (см. рис. 4, б). Приведённые на рисунке оценки корреляции показывают, что 83% межгодовой изменчивости площади морских льдов в Северном Ледовитом океане в декабре (60% после удаления тренда) связаны с аномалиями температуры поверхности океана в низких широтах Северной Атлантики.

### Обсуждение

Механизм влияния аномалий температуры поверхности океана в низких широтах Северной Атлантики на климатические аномалии в Арктике включает в себя взаимодействие циркуляции океана и атмосферы, с помощью которого климатический импульс от аномалий температуры поверхности океана воздействует на Арктику (рис. 5). Предполагается [27], что аномалии температуры поверхности океана в низких широтах океанов усиливают атмосферные циркуляционные ячейки Хедли и Ферреля, отражающие увеличение меридиональной атмосферной циркуляции, ослабляют Северо-Атлантическое колебание (САК) в атмо-



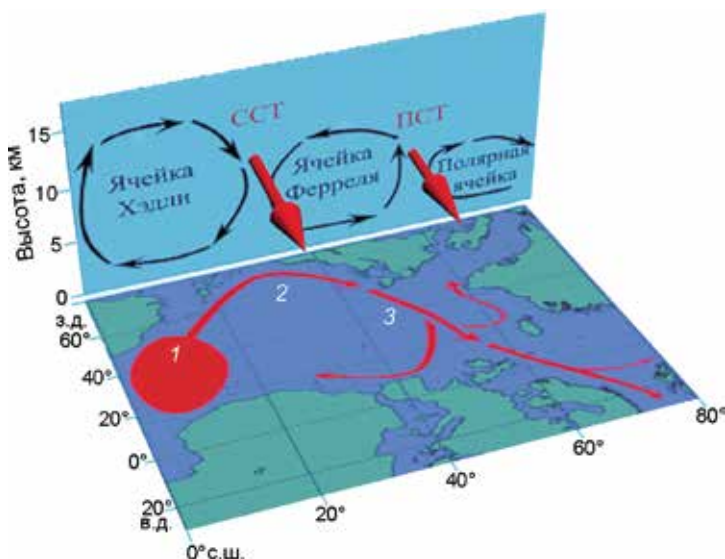
**Рис. 4.** Связь между аномалиями температуры поверхности океана в Северной Атлантике и площадью льда в Северном Ледовитом океане:

а – область в Северной Атлантике, октябрьские аномалии температуры поверхности океана в которой коррелированы с площадью льда в Северном Ледовитом океане в декабре спустя 38 месяцев; б – нормированные аномалии температуры воды на поверхности океана (1) и площади льда (2), сглаженные скользящим усреднением по три года. Знак аномалий площади льда изменён на обратный. Годы соответствуют аномалиям площади льда, температура воды на поверхности океана опережает их на три года.  $R$  – коэффициент корреляции между (1) и (2), в скобках – коэффициент для отклонений от тренда. Данные о температуре воды на поверхности океана взяты из HadISST [23], о площади льда в Северном Ледовитом океане – из [25]

**Fig. 4.** Influence of SST in the North Atlantic on sea ice extent in the Arctic:

а – area of North Atlantic with high correlations between October sea surface temperature anomalies and December Arctic sea ice extent after 38 months; б – sea surface temperature normalized anomalies (1) and sea ice extent (2), smoothed with 3 years window. Sign of sea ice extent is reversed. Years correspond to the sea ice extent anomalies, SST leads at 3 years.  $R$  – coefficient of correlation between (1) and (2), in brackets the same after trend removing. sea surface temperature data taken from HadISST [23], sea ice extent in the Arctic Ocean taken from [25]

фере, что способствует уменьшению потерь тепла океаном. Всё это вместе увеличивает океанический перенос тепла в системе Гольфстрим, Северо-Ат-



**Рис. 5.** Схема передачи влияния аномалий температуры поверхности океана в низких широтах Северной Атлантики в Арктику.

1 – аномалия температуры поверхности океана; 2 – Гольфстрим; 3 – Северо-Атлантическое течение и его продолжение в виде Норвежского и Западно-Шпицбергенского течений; ССТ – субтропическое струйное течение в атмосфере; ПСТ – полярное струйное течение

**Fig. 5.** Impact transfer scheme of SST anomalies in low latitudes in the North Atlantic to the Arctic. 1 – sea surface temperature anomaly; 2 – Gulfstream; 3 – North Atlantic, Norwegian and West Spitsbergen currents; CCT (SJ) – Subtropical jet, ПСТ (PJ) – polar jet

Коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями температуры воды в слое 50–200 м на разрезе по Кольскому меридиану [26] и площадью льда в Северном Ледовитом океане [25] за 1979–2013 гг.

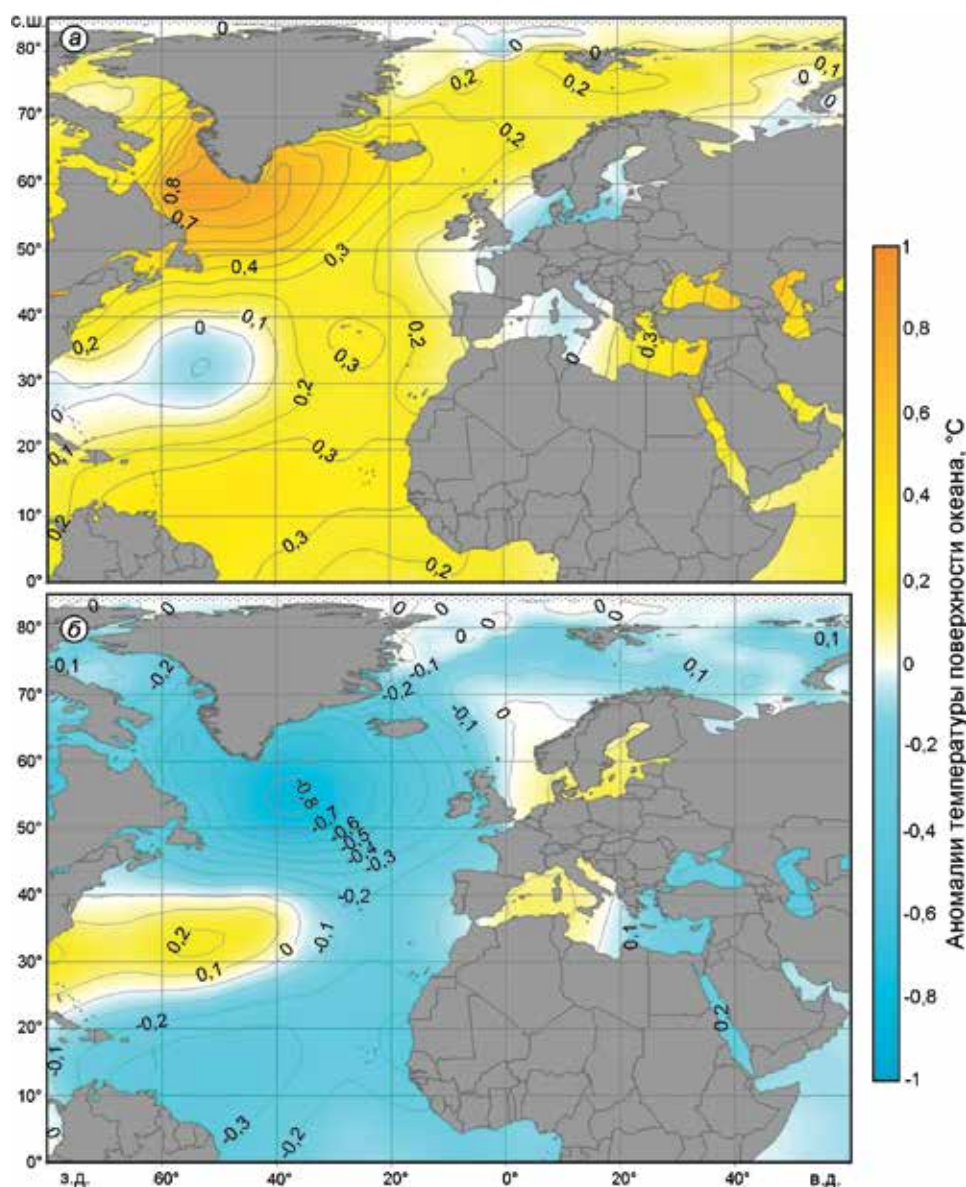
Показатели	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Исходные ряды	-0,76	-0,91	-0,89	-0,85	-0,84	-0,92	-0,79
Отклонения от тренда	-0,36	-0,80	-0,78	-0,69	-0,68	-0,83	-0,52

лантическое, Западно-Шпицбергенское и Норвежское течения. Конечное звено в схеме – усиление океанического притока тепла в Норвежское и Баренцево моря и атмосферных переносов в Арктику.

Из рис. 6 следует, что отрицательным индексам САК соответствуют положительные аномалии температуры поверхности океана в низких широтах и в области севернее 50° с.ш., а при положительных индексах аномалии температуры поверхности океана в области севернее 40° с.ш. отрицательны. Положительная аномалия температуры поверхности океана в области севернее 40° с.ш., соответствующая положительной аномалии температуры поверхности океана в тропиках Северной Атлантики и отрицательному индексу САК, через три года проявляется в Норвежском и Баренцевом морях (рис. 7). Заметим, что большое число работ посвящено исследованию связи между аномалиями температуры поверхности океана и САК (например, в монографии [28] приведён обзор, содержащий 225 источников). Основная их часть посвящена взаимодействию САК и аномалий температуры поверхности океана в Атлантике к северу от 20° с.ш. на синоптических и внутригодовых масштабах. Роль аномалий температуры поверхности океана в низких широтах Атлантического океана в измене-

ниях САК исследовалась ранее в работах [29–31], в которых также была обнаружена реакция САК на аномалии температуры поверхности океана.

Начальный импульс в системе воздействия низкоширотных аномалий температуры поверхности океана на Арктику – это их формирование, которое вызывает усиление меридиональных циркуляций и меридиональных переносов в атмосфере, а в Атлантическом океане – интенсификацию системы циркуляции и увеличение меридионального переноса тепла. В результате через 2,25 года отмечаются рост температуры воды в Норвежском и Баренцевом морях, повышение зимней температуры воздуха и сокращение площади морского льда в Арктике. Данные таблицы подтверждают высокий уровень корреляции между притоком воды из Атлантики и площадью морского льда в Арктике в период от установления до начала таяния морского ледяного покрова. Приведённые оценки показывают, что от 58 до 85% межгодовой изменчивости среднемесячной площади морских льдов в Северном Ледовитом океане (13–69% после удаления тренда) в период от установления до начала таяния льда связано с колебаниями притока воды из Атлантики. Данные о температуре воды в слое 50–200 м, в котором проходит поток атлантической



**Рис. 6.** Композиты среднегодовых аномалий температуры поверхности океана при аномальных ( $> \sigma$ ) среднегодовых значениях индекса Северо-Атлантического колебания (САК) в 1950–2015 гг.:

*a* – при отрицательных индексах САК; *б* – при положительных индексах САК

**Fig. 6.** Composites of annual SST anomalies for large ( $> \sigma$ ) annual NAO index in 1950–2015:

*a* – for negative NAO index; *b* – for positive NAO index

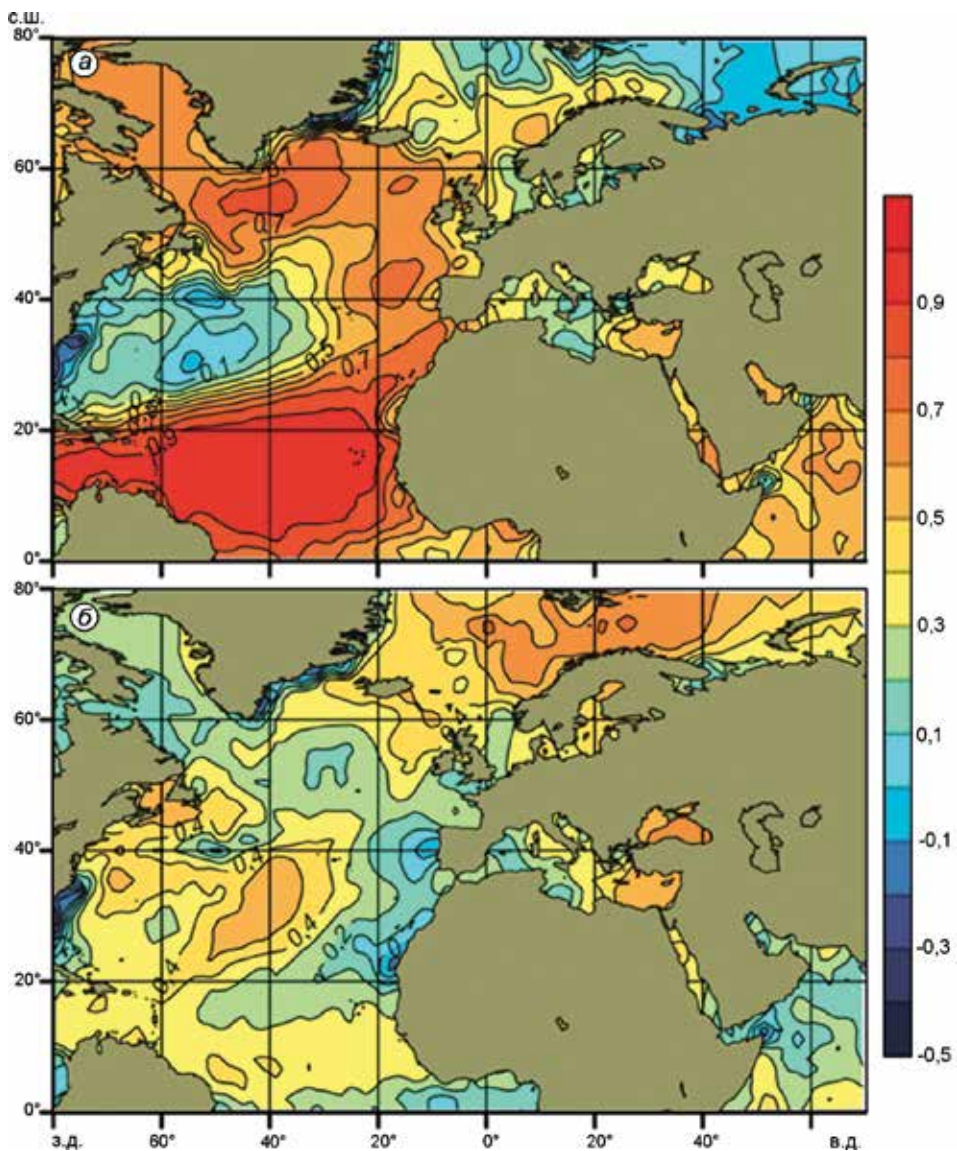
воды через разрез по Кольскому меридиану [26], относятся к репрезентативным показателям интенсивности океанического притока тепла не только в Баренцево море, но и в Северо-Европейский бассейн. Распространяясь по его акватории, тёплая и солёная вода из Атлантики ограничивает зимнее разрастание морского ледяного покрова [32].

### Выводы

Установлена связь между аномалиями температуры поверхности океана в низких широтах Атлантического океана и площадью морского льда в Северном Ледовитом океане. Запаздывания ано-

малий в Северном Ледовитом океане относительно аномалий температуры поверхности океана составляют 33–38 месяцев. Эта зависимость объясняет до 83% межгодовой изменчивости площади морских льдов в Северном Ледовитом океане в декабре (60% после удаления тренда). Механизм удалённого влияния аномалий температуры поверхности океана в низких широтах Северной Атлантики на аномалии в Северном Ледовитом океане связан с системой взаимодействий между циркуляционными структурами в атмосфере и океане, переносящими тепло в высокие широты.

В атмосфере к таким структурам относятся циркуляционные ячейки Хедли и Ферреля, которые усиливаются при положительных аномалиях



**Рис. 7.** Поле корреляций между аномалией среднегодовой температуры поверхности океана в тропической области Северной Атлантики и аномалиями среднегодовой температуры поверхности океана на всей акватории в 1980–2015 гг. *а* – синхронная корреляция; *б* – с запаздыванием три года относительно температуры поверхности океана в тропиках

**Fig. 7.** Pattern of correlation between anomalies of annual sea surface temperature in low latitudes and in whole area of the North Atlantic for period 1980–2015: *a* – timed correlation; *b* – three years lag of sea surface temperature in the whole area

температуры поверхности океана, и Северо-Атлантическое колебание, отрицательно коррелированное с аномалиями температуры поверхности океана. Положительной аномалии температуры поверхности океана в низких широтах соответствует отрицательный индекс САК и положительная аномалия температуры поверхности океана в Северной Атлантике севернее 40° с.ш., которая через три года проявляется в Норвежском и Баренцевом морях. Океаническая система циркуляции, включающая Гольфстрим, Северо-Атлантическое течение и его продолжения в Северо-Европейском бассейне, определяет распространение аномалии температуры поверхности океана из низких широт Северной Атлантики в Арктику, испытывающей при этом воздействие атмосферной циркуляции.

Начальный импульс – формирование низкоширотной аномалии температуры поверхности океана, которая вызывает перестройку циркуляции в атмосфере и увеличение океанического переноса тепла, приток которого в Северо-Европейский бассейн объясняет от 58 до 85% межгодовой изменчивости среднемесячной площади морских льдов в Северном Ледовитом океане (13–69% после удаления тренда) в период от установления до начала таяния льда с декабря по июнь.

**Благодарности.** В статье использованы результаты работы по гранту РФФИ 15-05-03512.

**Acknowledgements.** Results of RFBR grant 15-05-03512 is used in this paper.



## Литература

## References

1. Визе В.Ю. Причины потепления Арктики // Советская Арктика. 1937. Т. 1. С. 1–7.
2. Виттельс Л.А. Циклоны северных морей и потепление Арктики // Метеорология и гидрология. 1946. № 5. С. 32–40.
3. Дзердзеевский Б.Л. К вопросу о потеплении Арктики // Изв. АН СССР. Сер. геофизическая и географическая. 1943. № 2. С. 60–69.
4. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Уразгильдеева А.В., Бобылев Л.П. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на усиление потепления в Арктике в зимний период // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 43–63.
5. Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М. Роль границ морского льда и температуры поверхности океана в изменениях регионального климата в Евразии за последние десятилетия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 4. С. 403–421.
6. Barnes E.A., Polvani L.M. CMIP5 projections of arctic amplification, of the North American/North Atlantic circulation, and of their relationship // Journ. of Climate. 2015. V. 28. № 13. P. 5254–5271.
7. Blüthgen J., Gerdes R., Werner M. Atmospheric response to the extreme Arctic sea ice conditions in 2007 // Geophys. Research Letters. 2012. V. 39. № 2. doi: 10.1029/2011GL050486.
8. Francis J.A., Vavrus S.J. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in the mid-latitudes // Geophys. Research Letters. 2012. V. 39. L06801. doi: 10.1029/2012GL051000
9. Pedersen R.A., Cvijanovic I., Langen P.L., Vinther B.M. The impact of regional Arctic Sea ice loss on atmospheric circulation and the NAO // Journ. of Climate. 2016. V. 29. № 2. P. 889–902.
10. Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // Journ. of Geophys. Research. Atmosphere. 2010. T. 115. № 21. D21111. doi:10.1029/2009JD013568.
11. Inoue J., Hori M.E., Takaya K. The Role of Barents Sea Ice in the Wintertime Cyclone Track and Emergence of a Warm-Arctic Cold-Siberian Anomaly // Journ. of Climate. 2012. № 25. P. 2561–2568. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00449.1.
12. Байдин А.В., Мелешко В.П. Реакция атмосферы высоких и умеренных широт на сокращение площади морского льда и повышение температуры поверхности океанов // Метеорология и гидрология. 2014. № 6. С. 5–8.
13. Мелешко В.П., Байдин А.В. Реакция климата атмосферы на сокращение площади льда в Арктике и на другие внешние воздействия за последние десятилетия // Тр. ГГО. 2013. № 568. С. 80–113.
14. Meleshko V.P., Johannessen O.M., Baidin A.V., Pavlova T.V., Govorkova V.A. Arctic amplification: does it impact the polar jet stream // Tellus A. 2016. V. 68. 32330. <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v68.32330>.
15. Perlwitz J., Hoerling M., Dole R. Arctic tropospheric warming: causes and linkages to lower latitudes // Journ. of Climate. 2015. V. 28. P. 2154–2167.
1. Vise V.Yu. The reason of the Arctic warming. *Sovetskaya Arktika*. Soviet Arctic. 1937, 1: 1–7. [In Russian].
2. Vittels L.A. Cyclones of the northern seas and the Arctic warming. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 1946, 5: 32–40. [In Russian].
3. Dzerdziejewskiy B.L. On the issue of warming in the Arctic. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Ser. geofizicheskaya i geograficheskaya*. Proc. of USSR Academy of Sciences. Geophys. and Geogr. Series. 1943, 2: 60–69. [In Russian].
4. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Urazgildeeva A.V., Bobylev L.P. The influence of atmospheric transport of heat and moisture to enhance the warming in the Arctic in winter. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2016, 1: 43–63. [In Russian].
5. Semenov V.A., Mokhov I.I., Latif M. The role of the boundaries of sea ice and sea surface temperature in regional climate changes in Eurasia over the last decade. *Izvestiya Akademii Nauk. Fizika atmosfery i okeana*. Proc. of the Russian Academy of Sciences. Physics of Atmosphere and Ocean. 2012, 48 (4): 403–421. [In Russian].
6. Barnes E.A., Polvani L.M. CMIP5 projections of arctic amplification, of the North American/North Atlantic circulation, and of their relationship. *Journ. of Climate*. 2015, 28 (13): 5254–5271.
7. Blüthgen J., Gerdes R., Werner M. Atmospheric response to the extreme Arctic sea ice conditions in 2007. *Geophys. Research Letters*. 2012, 39 (2). doi: 10.1029/2011GL050486.
8. Francis J.A., Vavrus S.J. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in the mid-latitudes. *Geophys. Research Letters*. 2012, 39. L06801. doi:10.1029/2012GL051000.
9. Pedersen R.A., Cvijanovic I., Langen P.L., Vinther B.M. The impact of regional Arctic Sea ice loss on atmospheric circulation and the NAO. *Journ. of Climate*. 2016, 29 (2): 889–902.
10. Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. *Journ. of Geophys. Research. Atmosphere*. 2010, 115 (21). D21111. doi:10.1029/2009JD013568.
11. Inoue J., Hori M.E., Takaya K. The role of Barents sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a warm-Arctic cold-Siberian anomaly. *Journ. of Climate*. 2012, 25: 2561–2568. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00449.1.
12. Baidin A.V., Meleshko V.P. Response of the atmosphere at high and middle latitudes to the reduction of sea ice area and the rise of sea surface temperature. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2014, 6: 5–8. [In Russian].
13. Meleshko V.P., Baidin A.V. Response of the atmosphere climate to reduction of Arctic sea ice and other external actions in the last decade. *Trudy GGO*. Proc. of the Main Geophys. Observatory. 2013, 568: 80–113. [In Russian].
14. Meleshko V.P., Johannessen O.M., Baidin A.V., Pavlova T.V., Govorkova V.A. Arctic amplification: does it impact the polar jet stream. *Tellus A*. 2016, 68: 32330. <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v68.32330>.
15. Perlwitz J., Hoerling M., Dole R. Arctic tropospheric warming: causes and linkages to lower latitudes. *Journ. of Climate*. 2015, 28: 2154–2167.
16. Alekseev G.V., Glok N.I., Smirnov A.V., Vyazilova A.E. The influence of the North Atlantic on climate varia-

16. Алексеев Г.В., Глок Н.И., Смирнов А.В., Вязилова А.Е. Влияние Северной Атлантики на колебания климата в Баренцевом море и их предсказуемость // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 8. С. 38–56.
17. *Arthur M., Eldevik T.* On anomalous ocean heat transport toward the Arctic and associated climate predictability // *Journ. of Climate*. 2016. V. 29. № 2. P. 689–704.
18. *Sandø A.B., Gao Y., Langehaug H.R.* Poleward ocean heat transports, sea ice processes, and Arctic sea ice variability in NorESM1-M simulations // *Journ. of Geophys. Research. Ocean*. 2014. V. 19. № 3. P. 2095–2108. doi: 10.1002/2013JC009435.
19. *Smedsrud L.H., Esau I., Ingvaldsen R.B., Eldevik T., Haugan P.M., Li C., Lien V.S., Olsen A., Omar A.M., Risebrobakken B., Sandø A.B., Semenov V.A., Sorokina S.A.* The role of the Barents Sea in the Arctic climate system // *Reviews of Geophysics*. 2013. V. 51. P. 415–449. doi: 10.1002/rog.20017.
20. *Wang C., Lee S.K., Enfield D.B.* Climate response to anomalously large and small Atlantic warm pools during the summer // *Journ. of Climate*. 2008. V. 21. № 2007. P. 2437–2450.
21. *Palmer M.D., Haines K., Tett S.F.B., Ansell T.J.* Isolating the signal of ocean global warming // *Geophys. Research Letters*. 2007. V. 34. № L23610. P. 1–6.
22. IPCC: 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, 2014. 151 p.
23. Met Office Hadley Centre observations datasets. <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/>
24. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е. Климатические изменения в Арктике и северной полярной области // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2010. № 1 (84). С. 67–80.
25. Электронный ресурс <http://www.aari.ru/datasets>
26. *Карсаков А.Л.* Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море за период 1900–2008 гг. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2009. 139 с.
27. Алексеев Г.В., Глок Н.И. Влияние приэкваториальной Северной Атлантики на потепление и сокращение площади морского льда в Арктике // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2016. Т. 4. С. 80–87.
28. *Нестеров Е.С.* Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: изд. Гидрометцентра РФ, 2013. 144 с.
29. *Hoerling M.P., Hurrell J.W., Xu T.* Tropical origins for recent North Atlantic climate change // *Science*. 2001. 292. P. 90–92.
30. *Robertson A.W., Mechoso C.R., Kim Y.-J.* The influence of Atlantic Sea surface temperature anomalies on the North Atlantic Oscillation // *Journ. of Climate*. 2000. V. 13. № 1. P. 122–138.
31. *Sutton R.T., Hodson D.L.R.* Influence of the ocean on North Atlantic climate variability 1871–1999 // *Journ. of Climate*. 2003. V. 16. № 20. P. 3296–3313.
32. *Захаров В.Ф.* Льды Арктики и современные природные процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 136 с.
- tions in the Barents Sea and their predictability. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2016, 8: 38–56. [In Russian].
17. *Arthur M., Eldevik T.* On anomalous ocean heat transport toward the Arctic and associated climate predictability. *Journ. of Climate*. 2016, 29 (2): 689–704.
18. *Sandø A.B., Gao Y., Langehaug H.R.* Poleward ocean heat transports, sea ice processes, and Arctic sea ice variability in NorESM1-M simulations. *Journ. of Geophys. Research. Ocean*. 2014, 19 (3): 2095–2108. doi: 10.1002/2013JC009435.
19. *Smedsrud L.H., Esau I., Ingvaldsen R.B., Eldevik T., Haugan P.M., Li C., Lien V.S., Olsen A., Omar A.M., Otterå O.H., Risebrobakken B., Sandø A.B., Semenov V.A., Sorokina S.A.* The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Reviews of Geophysics*. 2013, 51: 415–449. doi: 10.1002/rog.20017.
20. *Wang C., Lee S.K., Enfield D.B.* Climate response to anomalously large and small Atlantic warm pools during the summer. *Journ. of Climate*. 2008, 21 (2007): 2437–2450.
21. *Palmer M.D., Haines K., Tett S.F.B., Ansell T.J.* Isolating the signal of ocean global warming. *Geophys. Research Letters*. 2007, 34. L23610: 1–6.
22. IPCC: 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, 2014. 151 p.
23. Met Office Hadley Centre observations datasets. <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/>
24. *Alekseev G.V., Radionov V.F., Aleksandrov E.I., Ivanov N.E., Kharlanenkova N.E.* Climate change in the Arctic and the Northern polar region. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Problems. 2010, 1 (84): 67–80. [In Russian].
25. <http://www.aari.ru/datasets>
26. *Karsakov A.L.* *Okeanograficheskie issledovaniya na razreze «Kol'skiy meridian» v Barenzevom more za period 1900–2008 gg.* Oceanographic research on the «Kola» section in the Barents Sea for the period 1900–2008. Murmansk: PINRO. 2009: 139 p. [In Russian].
27. *Alekseev G.V., Glok N.I.* Influence of equatorial Northern Atlantic on warming and sea ice shrinking in the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Problems. 2016, 4: 80–87. [In Russian].
28. *Nesterov E.S.* *Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean.* North Atlantic oscillation: atmosphere and ocean. Moscow: Hydrometeocenter Edition, 2013: 144 p. [In Russian].
29. *Hoerling M.P., Hurrell J.W., Xu T.* Tropical origins for recent North Atlantic climate change. *Science*. 2001, 292: 90–92.
30. *Robertson A.W., Mechoso C.R., Kim Y.-J.* The influence of Atlantic Sea surface temperature anomalies on the North Atlantic Oscillation. *Journ. of Climate*. 2000, 13 (1): 122–138.
31. *Sutton R.T., Hodson D.L.R.* Influence of the ocean on North Atlantic climate variability 1871–1999. *Journ. of Climate*. 2003, 16 (20): 3296–3313.
32. *Zakharov V.F.* *L'dy Arktiki i sovremennye prirodnye protsessy.* The Arctic sea ice and recent natural processes. Leningrad: Gigrometeoizdat, 1981. 136 p. [In Russian].