океанология

УДК 551.467

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-1-5-14

СЕЗОННЫЙ ПРОГНОЗ ЛЕДОВИТОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Н.И. ГЛОК, Г.В. АЛЕКСЕЕВ*, А.Е. ВЯЗИЛОВА

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*alexgv@aari.ru

SEASONAL FORECAST OF SEA ICE EXTENT IN THE BARENTS SEA

N.I. GLOK, G.V. ALEKSEEV*, A.E. VYAZILOVA

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*alexgv@aari.ru

Received December, 6, 2018

Keywords: Barents Sea, sea ice extent, seasonal forecast.

Summary

Earlier, the authors established a close relationship between the temperature of water coming from the North Atlantic and the sea ice extent (SIE) in the Barents Sea, which accounts for up to 75 % of the inter-annual variability of the monthly SIE from January to June. In turn, temperature variations of the incoming Atlantic water are affected from anomalies of sea surface temperature (SST) in the low latitudes of the North Atlantic. These dependences served as the basis for the development of a forecast method. The empirical orthogonal functions decomposition of the SIE set from January to June for 1979–2014 was used. The main component of decomposition reflects 83 % of the inter-annual variability of SIE from January to June. Regression model of forecast is based on the relation of the main component with SST anomalies taking into account the delay. Comparison of prognostic and actual values of the climatic component for each of the 6 months showed the correctness of forecasts with a lead time of 27 to 32 months is 83 %, and for the prediction of the initial values of SIE 79 %. Appealing to the second predictor — SST anomalies in the Norwegian Sea allowed to improve the quality of the forecast of the observed values of SIE. At the same time, the forecast advance time was reduced to 9–14 months.

Поступила 6 декабря 2018 г.

Принята к печати 4 февраля 2019 г.

Accepted February, 4, 2019

Ключевые слова: Баренцево море, ледовитость, сезонный прогноз.

Использован метод разложения по естественным ортогональным функциям набора значений площади льда с января по июнь за 1979–2014 гг. Главная компонента разложения отражает 83 % межгодовой изменчивости площади льда с января по июнь. Регрессионная про-

Citation: *Glok N.I., Alekseev G.V., Vyazilova A.E.* Seasonal forecast of sea ice extent in the Barents sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 1: 5–14. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-1-5-14.

гностическая модель построена на основе связи главной компоненты с аномалиями температуры воды на поверхности океана в низких широтах Северной Атлантики с учетом запаздывания. Сравнение прогностических и фактических значений климатической составляющей для каждого из шести месяцев показало оправдываемость прогнозов с заблаговременностью от 27 до 32 месяцев 83 %, а для прогноза исходных значений площади льда 79 %. Привлечение второго предиктора — аномалий температуры воды в Норвежском море позволило повысить качество прогноза наблюденных значений площади льда. При этом заблаговременность прогноза сократилась до 9–14 месяцев. Коэффициенты корреляции между прогнозными и фактическими значениями площади льда находятся в пределах 0,71–0,77.

введение

Изучению изменений ледовитости Баренцева моря, определяющих факторов и последствий для климата региона и за его пределами посвящено множество исследований [1–12]. В части из них основной причиной признается поступление в Баренцево море теплой и соленой атлантической воды (АВ) из Северной Атлантики через Фареро-Шетландский пролив и Норвежское море [1–3, 13–15]. В частности, еще В.Ю. Визе [2] определил, что потепление 1930-х гг. в Арктике тесно связано с усилением циркуляции атмосферы и увеличением поступления АВ в Норвежское и Баренцево моря. К такому же заключению позднее пришли авторы работы [15]. По результатам, полученным на глобальной модели климата [14] были сделаны выводы, что увеличение поступления АВ в Баренцево море оказывает сильное влияние на площадь морского льда в результате сокращения ледообразования и что океан влияет на изменения массы льда сильнее атмосферы.

В другой части исследований основная роль в изменениях ледовитости отводится атмосферной циркуляции, оказывающей непосредственное влияние на приток тепла к поверхности моря [7, 16, 17], либо через воздействие на приток AB и теплообмен между атмосферой и морем [4, 6, 18, 19]. В конечном итоге влиянием атмосферной циркуляции по данным глобального моделирования можно объяснить не более 25 % изменчивости ледовитости в Баренцевом море, при этом модели значительно переоценивают (более чем в Зраза) ледовитость в сентябре [20].

В работе [1] на основе корреляций выполнены сравнительные оценки влияния притока AB и атмосферной циркуляции на изменения ледовитости. Установлено, что колебания притока атлантической воды в Баренцево море, отражающиеся в изменениях температуры воды на разрезе по Кольскому меридиану, определяют до 75 % межгодовой изменчивости ежемесячной ледовитости с января по июнь, в то время как с индексами региональной атмосферной циркуляции связаны не более 20 % изменчивости ледовитости в эти месяцы.

Хотя новое поколение глобальных моделей СМІР5 лучше воспроизводит наблюдаемый климат, расхождения с наблюдениями в Баренцевом море остаются одними из самых значительных в Арктике [20, 21]. Глобальные модели успешно используются для перспективных оценок изменений климата, происходящих под влиянием роста антропогенного воздействия, но их применение для климатического прогнозирования на срок от нескольких месяцев до нескольких лет пока что проблематично. Альтернативный подход к климатическим прогнозам в регионе может быть основан на статистических моделях, построенных по данным наблюдений с учетом основных факторов и механизмов, определяющих межгодовую изменчивость ледовитости. В данном случае механизм влияния колебаний притока АВ в Баренцево море на изменчивость ледовитости является основой метода. Цель работы состоит в улучшении разработанного метода сезонного прогноза ледовитости на основе зависимости площади льда в Баренцевом море от температуры воды на Кольском меридиане и аномалий температуры поверхности океана (ТПО) в низких широтах Северной Атлантики, за счет привлечения аномалий ТПО в Норвежском море в качестве второго предиктора, что позволило повысить качество прогноза, при этом заблаговременность сократилась до 9–14 месяцев.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании использованы многолетние ряды измерений температуры воды на разрезе по Кольскому меридиану, представленные среднегодовыми значениями за 1900–2013 гг. и среднемесячными значениями за 1951–2013 гг. [22]. Температура воды определялась в слое 50–200 м на станциях 3–7 на разрезе, которые расположены в основном потоке атлантической воды.

Данные о температуре воды на поверхности океана в Атлантическом океане, Норвежском, Гренландском и Баренцевом морях взяты из архива HadISST [23] с пространственным разрешением 1°×1° за период с 1951 по 2017 г. Среднемесячная площадь и сплоченность морского льда в Баренцевом море представлены на сайте ААНИИ (http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/data/north/extent/bar).

Для анализа влияния притока AB на изменчивость характеристик климата в регионе применялись методы взаимно-корреляционного и взаимно-спектрального анализа временных рядов. Поиск и оценка дальних связей между изменчивостью ТПО в Северной Атлантике и характеристиками климата региона осуществлялись с помощью многомерного корреляционного анализа. Для разработки прогноза площади морского льда в регионе был использован метод разложения по естественным ортогональным функциям многолетнего ансамбля шестимесячных реализаций площади льда, а также метод линейной регрессии, эффективность которого оценивалась по стандартным статистическим методикам.

РЕЗУЛЬТАТЫ Обоснование метода

В качестве показателя притока AB в Баренцевоморский регион были использованы многолетние ряды среднегодовой и среднемесячной температуры воды в слое 50–200 м на разрезе (станции 3–7) по Кольскому меридиану (КМ). В табл. 1 приведены результаты корреляционного анализа для площади льда в Баренцевом море и температуры воды $T_{\rm KM}$. Наиболее тесная связь между изменениями температуры воды и площадью льда приходится на период с января по июнь, когда воздействия атмосферной циркуляции и летнего прогрева воды солнечной радиацией минимальны. После удаления трендовой составляющей коэффициенты корреляции для этих месяцев находятся в пределах от -0,61 до -0,79 и являются значимыми (при уровне значимости 0,05 критическое значение коэффициента корреляции 0,33). Применение скользящего осреднения по 3 года значительно увеличивает значения корреляции между температурой воды на разрезе по Кольскому меридиану и площадью морского льда.

Наибольшее значение коэффициента корреляции, равное 0,95, приходится на май и сохраняется на уровне 0,91 при запаздывании изменений площади, занятой морским льдом (ПМЛ), на год относительно изменений $T_{\rm KM}$. Полученные высокие коэффициенты корреляции в первой половине года дают возможность построения модели для сезонного прогноза.

Таблииа 1

V	Месяцы											
ларактеристики	Ι	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	Х	XI	XII
ПМЛ и Т _{км}	0,83	-0,82	-0,70	-0,78	-0,87	-0,83	-0,67	-0,48	-0,26	-0,28	-0,44	-0,70
ПМЛ и Т _{км} ,	-0,93	-0,89	-0,79	-0,88	-0,95	-0,90	-0,79	-0,63	-0,52	-0,45	-0,63	-0,80
сглаженные по 3 года												

Коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями температуры воды на Кольском разрезе и площади льда в Баренцевом море за 1979–2014 гг.

Определяющее влияние AB, поступающей в Баренцево море, на изменчивость ПМЛ позволяет предположить связь этой изменчивости с аномалиями характеристик AB в областях их формирования в низких широтах Северной Атлантики, механизм такой связи предложен в работе [24]. Анализ статистических связей ТПО в Северной Атлантике и средней температуры воды в слое 50–200 м на Кольском меридиане ($T_{\rm KM}$) с января по июнь при различных запаздываниях выявил области Атлантического океана, оказывающие максимальное влияние.

При синхронной корреляции максимальные оценки корреляции сосредоточены в прилегающих регионах Норвежского моря. При запаздывании Ткм относительно аномалий ТПО (АТПО) более года максимальные корреляции приходятся на приэкваториальную область Северной Атлантики (рис. 1), а наиболее тесная связь отмечается с АТПО в октябре, когда достигается максимум накопления тепла в низких широтах.



Рис. 1. Коэффициенты корреляции между ТПО в октябре и средней температурой воды в январе-июне в слое 50–200 м на Кольском разрезе через 2,5 года

Fig. 1. Correlation coefficients between SST in October and the average water temperature in January – June in the 50–200 m layer on the Kola section in 2.5 years

Для удобства расчетов средней ТПО по данным HadISST область была ограничена координатами 5–25° с.ш. и 60–10° з.д. Корреляции между средней ТПО по этой области в октябре и среднемесячной температурой воды на Кольском меридиане находится в пределах 0,68–0,75 (табл. 2). После удаления тренда коэффициенты корреляции остаются значимыми в пределах от 0,41 до 0,51.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями АТПО в октябре и температурой воды на Кольском разрезе (Т_{км}) в январе–июне через 27–32 месяца за 1979–2013 гг.

Месяц (запаздывание)	1(27)	2(28)	3(29)	4(30)	5(31)	6(32)		
АТПО (октябрь)	0,73	0,75	0,68	0,73	0,68	0,70		

Метод прогноза

Для выделения предсказуемой климатической составляющей в изменчивости площади, занятой морским льдом, с января по июнь использован метод разложения по естественным ортогональным функциям (ЕОФ). Разложение многолетнего ансамбля шестимесячных реализаций ПМЛ по ЕОФ позволяет получить многолетний ряд коэффициентов при главной компоненте:

$$X_{gm} = a_{1g} \cdot \varphi_{1m} + \overline{X}_m,$$

где X_{gm} — значение ПМЛ в g — году, m — месяце, a_{1g} — первый коэффициент ЕОФразложения, ϕ_{1m} — первый вектор ЕОФ-разложения, \overline{X}_m — среднее значение ПМЛ.

Применение метода ЕОФ-разложения показало, что первая главная компонента описывает 83,3 % межгодовой изменчивости ПМЛ Баренцева моря с января по июнь для периода 1979–2014 гг. и ее можно рассматривать в качестве климатической составляющей в изменениях ПМЛ.

Метод прогноза основан на линейной регрессии для первой главной компоненты разложения ПМЛ и АТПО приэкваториального района Атлантического океана в октябре, опережающей изменения площади льда на 2,5 года. Сравнение рассчитанных с заблаговременностью от 27 до 32 месяцев и фактических значений климатической составляющей для каждого из шести месяцев на зависимой выборке показало оправдываемость прогнозов 83 %, а при сравнении расчетов с исходными значениями площади льда оправдываемость составила 79 %.

Для улучшения качества прогноза был введен второй предиктор — аномалии ТПО в Норвежском море в апреле предыдущего года. При этом качество модели улучшилось, но заблаговременность прогноза сократилась до 9–14 месяцев. Прогностическая модель на основе линейной регрессии с двумя предикторами имеет вид:

$$\hat{X}_{1g} = -439T'_{1(g-3,X)} - 589T'_{2(g-1,IV)} + 14637$$

где \hat{X}_{1g} — прогнозное значение коэффициентов главной компоненты ЕОФ-разложения площади льда в Баренцевом море с января по июнь, g — год, T_1 — температура в экваториальной области в октябре (X), T_2 — температура в восточной части Норвежского моря в апреле (IV). Коэффициент детерминации модели составил 0,61. Прогностические значения климатической составляющей площади льда получаются на основе рассчитанного значения \hat{X}_{1g} и первой собственной функции ϕ_{1m} с добавлением среднего значения площади льда S_m в *m* месяце:

$$\widehat{S}_{1gm} = \widehat{S}_{1g} \times \varphi_{1m} + S_m.$$

Коэффициенты детерминации смоделированных оценок площади льда за исключением марта находятся в пределах 0,51–0,59 (табл. 3).

Таблица 3

Критерии качества модели площади морского льда Баренцева моря (коэффициент детерминации (R²) и ошибка модели) за 1979–2014 гг.

Характеристики		Месяцы							
		II	III	IV	V	VI			
R^2	0,51	0,59	0,31	0,51	0,53	0,57			
Ошибка модели (стандартное отклонение	118	121	145	126	142	129			
фактических данных), тыс. км ²	(169)	(190)	(175)	(182)	(210)	(199)			



Рис. 2. Площадь льда Баренцева моря:

a — январь, δ — февраль, s — март, c — апрель, d — май, e — июнь. Черным цветом показаны фактические данные, красным — модельные. Зависимый период построения модели 1979–2014 гг. Синими точками показаны фактические данные на независимом периоде с 2015 г.

Fig. 2.Sea ice extent of the Barents Sea:

a — January, δ — February, s — March, z — April, ∂ — May, e — June. Observations — black, model data — red. The dependent period of the model is 1979–2014. The blue dots are actual data on the independent period from 2015

Сопоставление ошибок модели со стандартным отклонением исходной выборки показало, что, за исключением марта, ошибки модели меньше 0,7·σ фактических данных (табл. 3). Сравнение результатов смоделированных оценок ПМЛ Баренцева моря с января по июнь с фактическими данными представлено на рис 2.

При проверке качества прогноза модели применялся метод отложенной выборки. В качестве независимых данных рассматривался период с 1965 по 1978 г. Оценки качества прогнозов, выполненные по ретроспективным данным при допустимой ошибке $\pm \sigma$, показали оправдываемость прогнозов в пределах 64–93 % (табл. 3). Самая низкая оправдываемость прогноза ПМЛ в июне, когда возрастает влияние атмосферы.

Таблица 3

Оправдываемость прогноза ПМЛ за период 1965-1978 гг.

Месяцы	Ι	II	III	IV	V	VI
Оправдываемость, %	86	93	93	79	71	64

выводы

Показана определяющая роль океанического влияния на изменчивость ледовитости Баренцева моря с января по июнь, и оценена связь температуры воды в Баренцевом море на Кольском меридиане с региональными и удаленными ТПО в Северной Атлантике.

Наибольшее воздействие оказывают аномалии ТПО в низких широтах (5– 25°с.ш. и 20–60°з.д) в октябре. Значимая связь (корреляция 0,68–0,75) найдена между АТПО в низких широтах в октябре и температурой воды на Кольском меридиане в январе–июне с запаздываниями 27–32 месяца.

Для выделения предсказуемой климатической составляющей в межгодовой изменчивости ПМЛ с января по июнь применен метод разложения по естественным ортогональным функциям многолетнего набора шестимесячных реализаций ПМЛ. Первая главная компонента, описывающая 83,3 % дисперсии набора, принята за климатическую составляющую межгодовой изменчивости.

Построена модель линейной регрессии для климатической составляющей с АТПО в низких широтах в качестве предиктора. Сравнение значений климатической составляющей для каждого из шести месяцев и рассчитанных по модели с заблаговременностью от 27 до 32 месяцев показало оправдываемость 83 %, а сравнение расчетов с исходными значениями площади льда 79 %.

Введение в модель второго предиктора — аномалий ТПО в Норвежском море в апреле предыдущего года улучшило оправдываемость прогноза, но заблаговременность сократилась до 9–14 месяцев.

Оценка качества такой модели показала, что коэффициенты детерминации прогнозных значений площади льда за исключением марта составляют 0,51–0,59, ошибки модели за 1979–2014 гг. меньше стандартного отклонения исходной выборки. На независимом периоде 2015–2018 гг. оправдываемость составила 88 %.

Благодарности. Работа выполнена с использованием результатов, полученных по гранту РФФИ 18-05-00334.

Acknowledgments. The article was prepared using the results of the RFBR grant 18-05-00334.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. Визе В.Ю. Причины потепления Арктики // Советская Арктика. 1937. Т. 1. С. 1-7.

3. Захаров В.Ф. Морские льды в климатической системе. СПб.: Гидрометеоиздат, 1996. 213 с.

4. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Михайлов А.Ю. Климатические вариации арктического фронта и ледовитости Баренцева моря зимой // Лед и снег. 2014. Т. 54. № 1. С. 85–90.

5. Миронов Е.У. Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: ААНИИ, 2004. 320 с.

6. 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 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 4. С. 403–421.

7. *Chen H.W., Zhang Q., Körnich H., Chen D.* The surface air temperature anomalies over the Barents Sea are closely associated with this mode of climate variability. Arctic: The Barents Oscillation // Geophys. Research Letters. 2013. V. 40. P. 2856–2861.

8. *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. V. 25. № 7. P. 2561–2568.

9. Levitus S., Matishov G., Seidov D., Smolyar I. Barents Sea multidecadal variability // Geophys. Research Letters. 2009. V. 36. No. L19604 P. 1–5.

10. *Liptak J., Strong C.* The winter atmospheric response to sea ice anomalies in the Barents sea // Journ. of Climate. 2014. V. 27. P. 914–924.

11. *Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T.* Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import // Nature Climate Change. 2018. V. 8. P. 634–639.

12. Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // Journ. of Geophysical Research: Atmospheres. 2010. V. 115. P. D21111.

13. Семенов В.А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // Доклады РАН. 2008. Т. 418. № 1. С. 106–109.

14. 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 Geophysical Research: Oceans. 2014. V. 119. № 3. P. 2095–2108.

15. 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.

16. *Ivanova D.P., McClean J.L., Hunke E.C.* Interaction of ocean temperature advection, surface heat fluxes and sea ice in the marginal ice zone during the North Atlantic Oscillation in the 1990s: A modeling study // Journ. of Geophysical Research: Oceans. 2012. V. 117. P. C02031.

17. *Schlichtholz P., Houssais M.N.* Forcing of oceanic heat anomalies by air-sea interactions in the Nordic Seas area // Journ. of Geophysical Research: Oceans. 2011. V. 116. P. C01006.

18. Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O.M. The early twentieth-century warming in the arctic – A possible mechanism // Journ. of Climate. 2004. V. 17. P. 4045–4057.

19. Semenov V.A., Martin T., Behrens L.K., Latif M. Arctic sea ice area in CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles — variability and change // The Cryosphere Discussions. 2015. V. 9. № 1. P. 1077–1131.

20. Семенов В.А., Мартин Т., Беренс Л.К., Латиф М., Астафьева Е.С. Изменения площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей СМІРЗ и СМІР5 // Лед и снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 77–107.

21. *Павлова Т.В., Катцов В.М., Мелешко В.П. и др.* Новое поколение климатических моделей // Труды ГГО. 2014. Т. 757. С. 5–64.

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

23. Met Office Hadley Centre observations datasets. Available at: https://www.metoffice.gov.uk/ hadobs/hadisst/ (accessed 24.07.2018)

24. Алексеев Г.В. Кузмина С.И., Глок Н.И., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике // Лед и снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 381–390.

REFERENCES

1. *AlekseevG.V., GlokN.I., SmirnovA.V., VyazilovaA.E.* The influence of the North Atlantic on climate variations in the Barents Sea and their predictability. *Meteorologiya i gidrologiya.* Meteorology and Hydrology. 2016, 8: 38–56. [In Russian].

2. Vise V.Iu. The reasons of Arctic warming. Sovetskaya Arktika. Soviet Arctic. 1937, 1: 1–7. [In Russian].

3. Zakharov V.F. Morskie l'dy v klimaticheskoj sisteme. Sea ice in the climate system. St. Petersburg: Gigrometeoizdat, 1996: 213 p. [In Russian].

4. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Mikhailov A.Y. Climatic variations of the Arctic front and the Barents sea ice cover in winter time. Led i sneg. Ice and Snow. 2014, 54, 1: 85–90. [In Russian].

5. *Mironov E.U. Ledovye uslovija v Grenlandskom i Barencevom moryah i ih dolgosrochnyj prognoz.* Ice conditions in the Greenland and Barents Seas and their long-range forecasting. St. Petersburg: AARI, 2004: 320 p. [In Russian].

6. *SemenovV.A., MokhovI.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].

7. *Chen H.W., Zhang Q., Körnich H., Chen D.* The surface air temperature anomalies over the Barents Sea are closely associated with this mode of climate variability. Arctic: The Barents Oscillation. Geophys. Research Letters. 2013, 40: 2856–2861.

8. *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, 7: 2561–2568.

9. Levitus S., Matishov G., Seidov D., Smolyar I. Barents Sea multidecadal variability. Geophys. Research Letters. 2009, 36 (L19604): 1–5.

10. *Liptak J., Strong C.* The Winter Atmospheric Response to Sea Ice Anomalies in the Barents Sea. Journ. of Climate. 2014, 27: 914–924.

11. *Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T.* Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import. Nature Climate Change. 2018, 8: 634–639.

12. *Petoukhov V., Semenov V.A.* A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. Journ. of Geophysical Research: Atmospheres. 2010, 115: D21111.

13. *Semenov V.A.* Influence of oceanic inflow to the Barents Sea on climate variability in the Arctic region. *Doklady Akademii Nauk.* Proc. of the Academy of Sciences. 2008, 418, 1: 106–109. [In Russian].

14. *Sandø A.B., Gao Y., Langehaug H.R.* Poleward ocean heat transports, sea ice processes, and Arctic sea ice variability in NorESM1-M simulations. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2014, 119, 3: 2095–2108.

15. 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, 51: 415–449.

16. *Ivanova D.P., McClean J.L., Hunke E.C.* Interaction of ocean temperature advection, surface heat fluxes and sea ice in the marginal ice zone during the North Atlantic Oscillation in the 1990s: A modeling study. Journ. of Geophysical Research: Oceans. 2012, 117: C02031.

17. Schlichtholz P., Houssais M.N. Forcing of oceanic heat anomalies by air-sea interactions in the Nordic Seas area. Journ. of Geophysical Research: Oceans. 2011, 116: C01006.

18. Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O.M. The early twentieth-century warming in the arctic — A possible mechanism. Journ. of Climate. 2004, 17: 4045–4057.

19. Semenov V.A., Martin T., Behrens L.K., Latif M. Arctic sea ice area in CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles – variability and change. The Cryosphere Discussions. 2015, 9, 1: 1077–1131.

20. Semenov V.A., Martin T., Behrens L.K., Latif M., Astafieva E.S. Arctic sea ice area changes in CMIP3 and CMIP5 climate models' ensembles. Led i sneg. Ice and Snow. 2017, 57, 1: 77–107. [In Russian].

21. Pavlova T.V., Katsov V.M., Meleshko V.P., Shkolnik I. M., Govorkova V.A., Nadezhina E.D. A new generation of climate models. *Trudy GGO im. A. I. Voeykova*. Proceedings of Voeikov Main Geophisical Observatory. 2014, 575: 5–64. [In Russian].

22. Karsakov A.L. Okeanograficheskie issledovanija na razreze «Kol'skij meridian» v Barencevom more za period 1900–2008 gg. Oceanographic Investigations along the Kola Section in the Barents Sea in 1900–2008. Murmansk: PINRO Press, 2009: 139 p. [In Russian].

23. Met Office Hadley Centre observations datasets. Available at: https://www.metoffice.gov.uk/ hadobs/hadisst/ (accessed 24.07.2018)

24. *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].