

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

УДК 551.467.3

Анализ главных компонент полей концентрации морского льда в Баренцевом море

© 2017 Н.В. Михайлова, А.В. Юровский

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
E-mail: Nataly.Mikhailova@mail.ru, a_yurovsky@mail.ru

Поступила в редакцию 30.11.2016 г.

Исследуются особенности процессов взаимодействия в системе океан – морской лед – атмосфера, которые влияют на многолетнюю динамику ледяного покрова Баренцева моря. По результатам анализа главных компонент полей концентрации морского льда в Баренцевом море было выделено три моды межгодовой изменчивости. Показано, что первая мода описывает 65,4% суммарной дисперсии концентрации морского льда и характеризует многолетний тренд, вторая мода (10,8%) связана с вариациями притока тепла с течениями под действием атмосферной циркуляции, третья мода (7,8%) вызвана изменчивостью суммарного турбулентного потока тепла из океана в атмосферу в области границы кромки льда на севере Баренцева моря.

Ключевые слова: Баренцево море, концентрация морского льда, межгодовая изменчивость, суммарный турбулентный поток тепла, течения, ветер.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-2-12-20

Введение. Одним из важнейших районов мониторинга климатических изменений в Западной Арктике является Баренцево море [1, 2], которое относится к числу ледовитых, но в отличие от других морей Арктики никогда не покрывается льдом полностью. Льдообразование обычно наблюдается на севере, востоке (у берегов арх. Новая Земля) и на юго-востоке моря. В зависимости от гидрометеорологических условий длительность ледового периода составляет 6 – 10 мес [3]. Глобальный рост температуры воздуха, который наблюдается на протяжении последних десятилетий и особенно ярко выражен в Арктическом регионе («эффект полярного усиления»), уже привел к стремительному сокращению ледяного покрова. В настоящее время площадь льда в Баренцевом море уменьшается с наибольшей скоростью (примерно на 10,5% за 10 лет) по сравнению с другими морями Арктического бассейна, демонстрируя наибольший отрицательный тренд в зимний период [4 – 6].

Начиная с пионерской работы [7], главным фактором, определяющим климат морей Западной Арктики и в том числе межгодовую изменчивость площади ледяного покрова в Баренцевом море, считают адвекцию тепла Северо-Атлантическим течением [8 – 11]. С другой стороны, многие авторы подчеркивают важную роль атмосферных факторов, таких как крупномасштабная атмосферная циркуляция [12, 13], циклоническая активность [14, 15], потоки тепла из океана в атмосферу [16, 17] и особенно ветер. В частности, авторы работы [18] по результатам 465-летнего численного эксперимента сделали вывод, что межгодовая изменчивость площади льда Баренцева мо-

ря обусловлена главным образом импортом или экспортом льда под воздействием локального ветра, а перенос тепла течениями играет заметно меньшую роль. В работах [14, 19, 20] также указывается на важную роль интенсивных ветров северных или южных направлений в смещении границы льда в Баренцевом море.

Характерная черта ледового режима Баренцева моря – большая межгодовая и сезонная изменчивость его ледовитости [21, 22]. Поэтому несомненный интерес представляют особенности формирования и развития ледовых процессов в море различного временного масштаба. Поскольку наиболее значительные изменения наблюдаются в зимний период, цель работы состоит в исследовании межгодовой изменчивости площади ледяного покрова Баренцева моря зимой (декабрь – февраль), а также факторов, ее обуславливающих.

Исходные данные и методы исследования. В работе использовались: среднемесячные значения концентрации льда в Баренцевом море (1978 – 2016 гг.), полученные по данным пассивного микроволнового зондирования в *National Snow and Ice Data Center, USA (NSIDC)* и представленные на равномерной сетке 25×25 км (<http://nsidc.org/data/nsidc-0002.html>); среднемесячные значения приземной температуры воздуха, атмосферного давления на уровне моря, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, турбулентных потоков явного и скрытого тепла из массива реанализа *NASA MERRA* (1979 – 2016 гг.) на сетке с пространственным разрешением $0,5 \times 0,67^\circ$.

Для выделения мод межгодовой изменчивости концентрации морского льда использовался стандартный метод главных компонент. Дальнейшее исследование проводилось корреляционно-регрессионным методом.

Результаты и обсуждение. В режиме многолетней изменчивости концентрации морского льда (*Sea Ice Concentration – SIC*) можно выделить три моды, первая из которых описывает 65,4% изменчивости *SIC*, вторая 10,8%, третья 7,8%. Пространственная структура мод (PC_1 , PC_2 , PC_3) и соответствующие им временные коэффициенты разложения (K_1 , K_2 , K_3) показаны на рис. 1.

Пространственная структура первой моды (рис. 1, *a*) идентична пространственному распределению коэффициента линейного тренда *SIC* (рис. 2). Следовательно, доминирующий вклад в межгодовую изменчивость *SIC* зимой в Баренцевом море вносит тренд. Он отрицательный практически на всей акватории, т. е. концентрация льда и его площадь постепенно сокращаются. Область максимальных значений первой главной компоненты, расположенная вдоль 77° с. ш. на востоке Баренцева моря, соответствует области наиболее интенсивного сокращения ледяного покрова (в среднем концентрация льда здесь уменьшается на 21% за 10 лет).

Во временном ходе коэффициента разложения K_1 при первой моде (рис. 1, *б*) прослеживаются колебания с периодом ~ 5 лет. Таким образом, процесс сокращения является немонотонным.

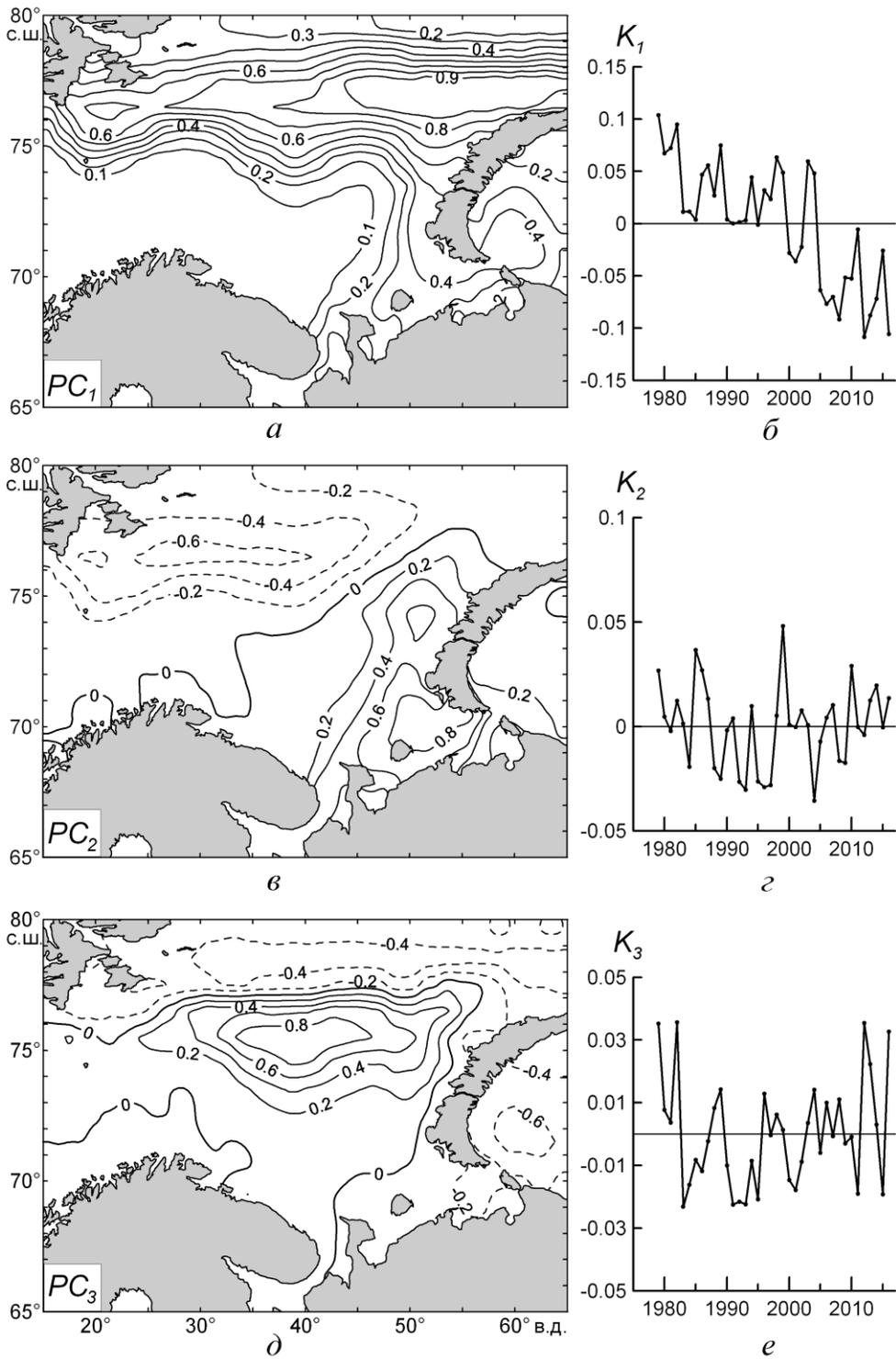


Рис. 1. Пространственная структура первых трех мод поля концентрации морского льда в Баренцевом море за декабрь – февраль 1978 – 2016 гг. и соответствующие им временные коэффициенты разложения

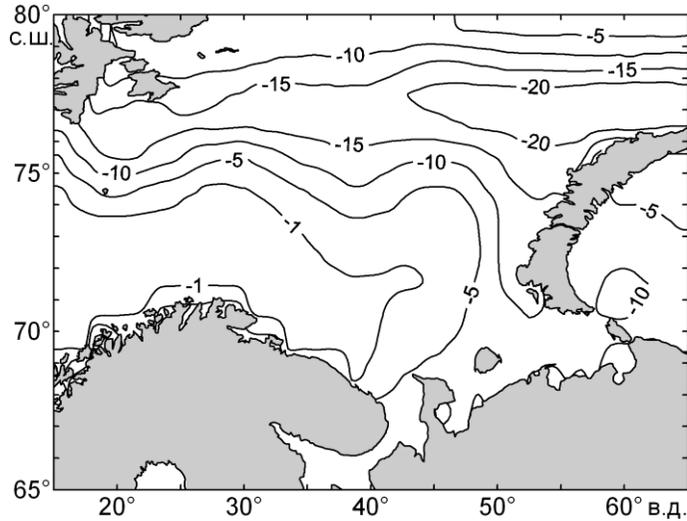


Рис. 2. Коэффициент линейного тренда ($\times 10^{-3}$) концентрации морского льда в Баренцевом море за период 1978 – 2016 гг.

Корреляционный анализ показал, что приземная температура воздуха (T_a) и меридиональная составляющая скорости ветра (V) являются основными факторами, регулирующими SIC в данном районе. Коэффициент корреляции между концентрацией морского льда, осредненной по району $76 - 78^\circ$ с. ш., $42 - 62^\circ$ в. д., и T_a составил $R = -0,94$; между SIC и меридиональной составляющей скорости ветра $R = -0,65$; между SIC и суммарным турбулентным потоком тепла (Q) $R = -0,67$. Также тесная связь обнаружена между временным коэффициентом K_1 и V с коэффициентом корреляции $R = -0,64$. Связь с атмосферным давлением на уровне моря и зональной составляющей скорости ветра (U) отсутствует.

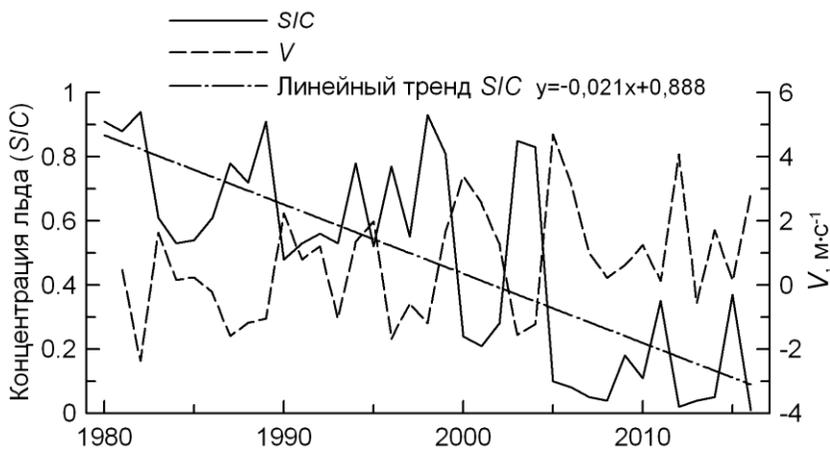


Рис. 3. Многолетний ход концентрации морского льда и меридиональной составляющей скорости ветра, осредненных по району $76 - 78^\circ$ с. ш., $42 - 62^\circ$ в. д.

Основная масса льда (95 – 97%) Баренцева моря представляет собой дрейфующий лед [3], который перемещается под действием ветра, морских течений или под давлением соседних ледовых полей. Как следует из рис. 3, ветер северных направлений (отрицательные значения V) способствует повышению SIC вследствие экспорта льда из внутренних районов Арктики и усиленному притоку холодных арктических вод из района между о. Шпицберген и арх. Земля Франца-Иосифа. Низкие температуры воды, дефицит тепла способствуют процессам льдообразования и сопровождаются положительными аномалиями SIC . Однако если в начале анализируемого периода ветры северных и южных направлений чередовались друг с другом, то начиная с 2005 г. в указанной области Баренцева моря устойчиво преобладают ветры южных направлений. По-видимому, это обусловлено изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции.

Вторая мода (рис. 1, в), вероятно, описывает синхронное изменение адвекции тепла с течениями на юго-востоке и северо-западе Баренцева моря. В области положительного центра второй моды ($69 - 71^\circ$ с. ш., $48 - 54^\circ$ в. д.) Колгуево-Печорское течение, которое является продолжением теплого Мурманского течения, сталкивается с холодным течением Литке, вытекающим из Карского моря. Под действием атмосферной циркуляции и ветра течения могут усиливаться, влияя таким образом на температурный режим моря в этом районе. На северо-востоке Баренцева моря холодные течения, распространяющиеся к югу от арх. Земля Франца-Иосифа и вдоль берега о. Шпицберген, усиливаются водами, поступающими из Арктического бассейна. Увеличение или уменьшение скорости течений на юго-востоке Баренцева моря (обычно это происходит при прохождении над ним атмосферных циклонов) приводит к ускорению или замедлению всей системы течений моря, которая образует циклонический круговорот [3].

Корреляционный анализ показал, что приземная температура воздуха и зональная составляющая скорости ветра являются основными факторами, регулирующими SIC на юго-востоке и северо-западе Баренцева моря. Коэффициент корреляции между концентрацией морского льда, осредненной по району $69 - 71^\circ$ с. ш., $48 - 54^\circ$ в. д., и T_a составил $R = -0,92$; между SIC и зональной составляющей скорости ветра $R = -0,61$; между SIC и суммарным турбулентным потоком тепла $R = -0,59$. Связь с атмосферным давлением на уровне моря и меридиональной составляющей скорости ветра отсутствует. Умеренная связь обнаружена между временным коэффициентом K_2 и U , $R = -0,58$. Заметим, что во временном ходе коэффициента разложения K_2 при второй моде (рис. 1, г) также присутствует периодичность (период колебаний составляет около трех лет).

Следовательно, при западном ветре возрастает скорость теплых течений (Мурманское, Колгуево-Печорское) и увеличивается приток тепла в юго-западную часть Баренцева моря, что способствует формированию отрицательных аномалий SIC , увеличению температуры воздуха и температуры поверхностного слоя моря, замедлению процессов льдообразования. При восточных ветрах, напротив, усиливается вынос холодных вод из Карского моря, с которыми через новоземельские проливы может поступать лед из юго-западной части моря. Поэтому концентрация льда в Баренцевом море возрастает (рис. 4).

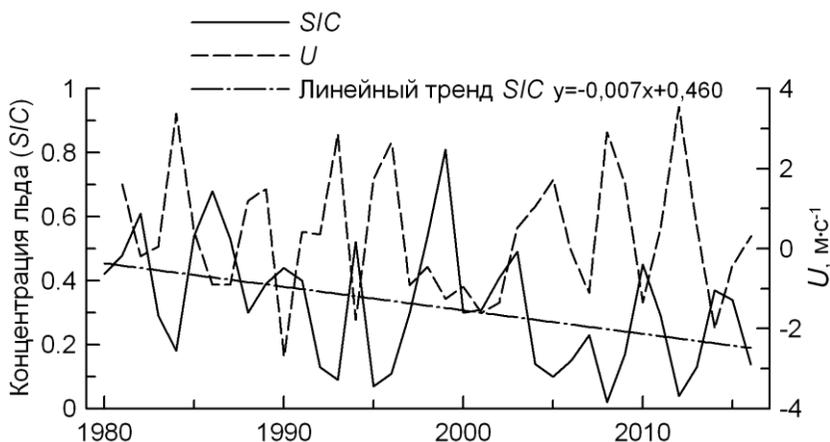


Рис. 4. Многолетний ход концентрации морского льда и зональной составляющей скорости ветра, осредненных по району $69 - 71^\circ$ с. ш., $48 - 54^\circ$ в. д.

Основному положительному центру третьей моды ($74 - 76^\circ$ с. ш., $35 - 45^\circ$ в. д.) (рис. 1, д) соответствует область наибольшей изменчивости границы кромки льда в зимние месяцы на севере Баренцева моря [23]. Положение кромки льда является одной из наиболее важных характеристик ледовых условий морской среды. Ее смещение влияет на перераспределение потоков тепла и импульса между океаном и атмосферой. Если лед в значительной степени блокирует турбулентный поток тепла из океана в атмосферу, то над участками открытой воды потери тепла океаном увеличиваются на порядок, что в дальнейшем приводит к модификации водных и воздушных масс на различных временных масштабах и влияет на термодинамику морского льда в прикромочной зоне. Кроме того, в высоких широтах в холодное время года в области кромки льда часто наблюдаются так называемые холодные вторжения, когда очень холодные арктические воздушные массы перемещаются на относительно теплую поверхность моря. В этих случаях энергообмен между океаном и атмосферой особенно интенсивный: мгновенный суммарный турбулентный поток тепла может достигать $500 - 1000 \text{ Вт/м}^2$. Поэтому третья мода, по мнению авторов, описывает изменение потоков тепла из океана в атмосферу при смещении границы ледяного покрова.

Наиболее тесно SIC в районе $74 - 76^\circ$ с. ш., $35 - 45^\circ$ в. д. связана с Q , $R = -0,58$ (рис. 5). Связь с другими атмосферными параметрами менее выражена: между SIC и T_a коэффициент корреляции $R = -0,50$; между SIC и V коэффициент корреляции $R = -0,38$. Атмосферное давление на уровне моря и зональная составляющая скорости ветра не оказывают какого-либо существенного влияния на изменчивость SIC в данном районе. Во временном ходе коэффициента разложения K_3 при третьей моде явная периодичность отсутствует (рис. 1, е).

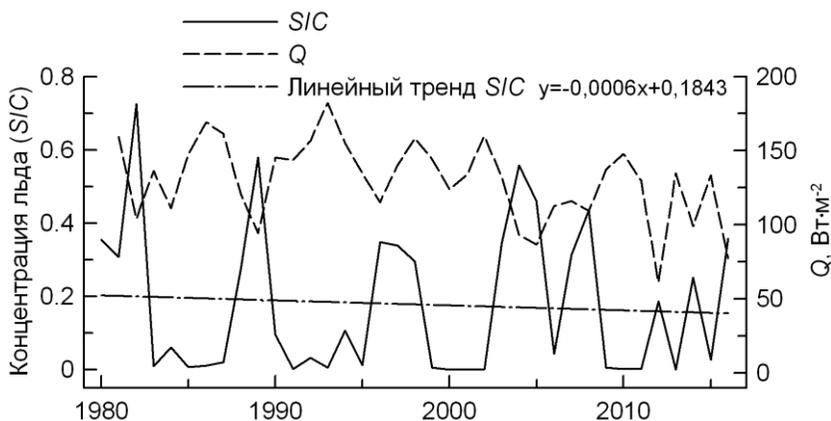


Рис. 5. Многолетний ход концентрации морского льда и суммарного турбулентного потока тепла, осредненных по району 74 – 76° с. ш., 35 – 45° в. д.

Заключение. Исследования многолетней изменчивости концентрации морского льда в Баренцевом море показали, что за последние три десятилетия наблюдается существенное уменьшение его ледовитости, особенно выраженное в северо-восточной части. В среднем сплоченность льда здесь уменьшается на 21% за 10 лет.

Анализ главных компонент поля концентрации морского льда позволил выделить три устойчивые моды, которые суммарно описывают 84% дисперсии концентрации морского льда. Каждая мода связана с процессами взаимодействия в системе океан – морской лед – атмосфера, которые и определяют пространственно-временную структуру концентрации льда Баренцева моря.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме №0827-2015-0001 «Фундаментальные исследования процессов в системе океан – атмосфера – литосфера, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды и климата глобального и регионального масштабов» (шифр «Климат»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Г.Г., Дженюк С.Л., Мусеев Д.В. и др. Климатические изменения морских экосистем Европейской Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2010. – № 3(86). – С. 7 – 21.
2. Smedsrud L.H., Esau I., Ingvaldsen R.B. et al. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system // Rev. Geophys. – 2013. – 51. – P. 415 – 449.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.1. Баренцево море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 280 с.
4. Screen J.A., Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification // Nature. – 2010. – 464. – P. 1334 – 1337.
5. Kern S., Kaleschke L., Spreen G. Climatology of the Nordic (Irminger, Greenland, Barents, Kara and White/Pechora) Seas ice cover based on 85 GHz satellite microwave radiometry: 1992 – 2008 // Tellus. – 2010. – 62A. – P. 411 – 434.

6. *Cavaliere D.J., Parkinson C.L.* Arctic sea ice variability and trends, 1979 – 2010 // *Cryosph.* – 2012. – 6, No. 4. – P. 881 – 889.
7. *Helland-Hansen B., Nansen F.* The Norwegian Sea // *Fiskdir. Skr. Ser. Havunders.* –1909. – 360 p.
8. *Polyakov I.V., Beszczynska A., Carmack E.C. et al.* One more step toward a warmer Arctic // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – 32. – L17605.
9. *Polyakov I.V., Timokhov L.A., Alexeev V.A. et al.* Arctic Ocean warming contributes to reduced polar ice cap // *J. Phys. Oceanogr.* – 2010. – 40. – P. 2743 – 2756.
10. *Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L.H. et al.* Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat // *J. Clim.* – 2012. – 25. – P. 4736 – 4743.
11. *Yashayaev I., Seidov D.* The role of the Atlantic Water in multidecadal ocean variability in the Nordic and Barents Seas // *Progr. Oceanogr.* – 2015. – 132. – P. 68 – 127.
12. *Zhang X., Sorteberg A., Zhang J. et al.* Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system // *Geophys. Res. Lett.* – 2008. – 35. – L22701.
13. *Жичкин А.П.* Особенности межгодовых и сезонных колебаний аномалий ледовитости Баренцева моря // *Метеорология и гидрология.* – 2015. – № 5. – С. 52 – 62.
14. *Sorteberg A., Kvingedal B.* Atmospheric forcing on the Barents Sea winter ice extent // *J. Clim.* – 2006. – 19. – P. 4772 – 4787.
15. *Simmonds I., Keay K.* Extraordinary September Arctic sea ice reductions and their relationships with storm behavior over 1979 – 2008 // *Geophys. Res. Lett.* – 2009. – 36. – L19715.
16. *Селиванова Ю.В., Тилинина Н.Д., Гулёв С.К. и др.* Влияние ледового покрова в Арктике на турбулентные потоки тепла между океаном и атмосферой // *Океанология.* – 2016. – 56, № 1. – С. 18 – 22.
17. *Sorokina S.A., Li C., Wettstein J.J. et al.* Observed atmospheric coupling between Barents Sea ice and the Warm-Arctic Cold-Siberian anomaly pattern // *J. Clim.* – 2016. – 29. – P. 495 – 511.
18. *Koenigk T., Mikolajewicz U., Jungclaus J.H. et al.* Sea ice in the Barents Sea: seasonal to interannual variability and climate feedbacks in a global coupled model // *Clim. Dynam.* – 2009. – 32, No. 7. – P. 1119 – 1138.
19. *Pavlova O., Pavlov V., Gerland S.* The impact of winds and sea surface temperatures on the Barents Sea ice extent, a statistical approach // *J. Mar. Syst.* – 2014. – 130. – P. 248 – 255.
20. *Herbaut C., Houssais M.-N., Close S. et al.* Two wind-driven modes of winter sea ice variability in the Barents Sea // *Deep-Sea Res. Part I: Oceanogr. Res. Pap.* – 2015. – 106. – P. 97 – 115.
21. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П. и др.* Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа // *Проблемы Арктики и Антарктики.* – 2007. – № 75. – С. 149 – 160.
22. *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 // *J. Clim.* – 2012. – 25. – P. 2561 – 2568.
23. *Бойцов В.Д.* Сезонная изменчивость положения кромки льда в Баренцевом море // *Вопросы промысловой океанологии.* – М.: ВНИРО, 2007. – Вып. 4. – С. 206 – 220.

Analysis of principal components of the sea ice concentration fields in the Barents Sea

N.V. Mikhailova, A.V. Yurovsky

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: Nataly.Mikhailova@mail.ru, a_yurovsky@mail.ru*

The processes of interaction within the ocean-sea ice-atmosphere system which influence a multiyear ice cover dynamics in the Barents Sea are investigated. Being analyzed, the principal components of the sea ice concentration fields in the Barents Sea make it possible to distinguish three modes of inter-annual variability of the sea ice concentration. It is shown that the first mode describes 65.4% of the sea ice concentration total variance and its multiyear trend. The second mode (10.8%) is related to variations of the heat inflow due to the sea currents governed by the atmospheric circulation. The third one (7.8%) is associated with variability of the total turbulent heat flux from the ocean to the atmosphere at the boundary of the ice edge in the northern Barents Sea.

Keywords: Barents Sea, sea ice concentration, inter-annual variability, total turbulent heat flux, currents, wind.