

## Пространственно-временная структура полей сплоченности морского льда в Баренцевом море по спутниковым данным

Н.В. Михайлова, А.В. Юровский

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия  
E-mail: Nataly.Mikhailova@mail.ru*

В работе по данным пассивного микроволнового зондирования морского ледового покрова Арктики (National Snow and Ice Data Center, 1978–2016) выполнено разложение полей сплоченности морского льда Баренцева моря методом главных компонент. Были выделены три главных компонента. Первая главная компонента описывает 65,4% суммарной дисперсии сплоченности морского льда и характеризует многолетний тренд. Вторая главная компонента (10,8%) связана с синхронным изменением адвекции тепла с течениями на юго-востоке и северо-западе Баренцева моря. Третья главная компонента (7,8%) сопряжена с изменчивостью суммарного потока тепла из океана в атмосферу в области границы кромки льда на севере Баренцева моря. Также рассматриваются особенности процессов взаимодействия в системе «океан – морской лед – атмосфера», которые влияют на многолетнюю динамику ледового покрова Баренцева моря. Наряду с температурой воздуха, которая регулирует процессы местного льдообразования, важную роль играет ветер. На севере Баренцева моря изменчивость сплоченности морского льда на 42% обусловлена изменчивостью меридиональной составляющей скорости ветра, а на юго-востоке моря на 37% – изменчивостью зональной составляющей скорости ветра. Показано, что после 2005 г. произошли существенные изменения в циркуляции атмосферы над Баренцевым морем.

**Ключевые слова:** Баренцево море, сплоченность морского льда, межгодовая изменчивость, анализ главных компонент, атмосферные характеристики

*Одобрена к печати: 27.02.2017*

*DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-246-254*

### Введение

Одним из важнейших районов мониторинга климатических изменений в Западной Арктике является Баренцево море (Матишов и др., 2010; Smedsrud et al., 2013). Баренцево море относится к числу ледовитых морей, но в отличие от других морей Арктики оно никогда не покрывается льдом полностью. Льдообразование обычно наблюдается на севере, востоке (у берегов Новой Земли) и на юго-востоке моря. В зависимости от гидрометеорологических условий длительность ледового периода составляет от 6 до 10 месяцев (Гидрометеорология..., 1990). Глобальный рост температуры воздуха, который наблюдается на протяжении последних десятилетий, особенно ярко выраженный 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 (около 10,5% за 10 лет) среди всех морей Арктического бассейна, демонстрируя наибольший отрицательный тренд в зимний период (Kern, Kaleschke, Spreen, 2010; Cavalieri, Parkinson, 2012).

Начиная с пионерской работы (Helland-Hansen, Nansen, 1909), 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 (Polyakov et al., 2010; Årthun et al., 2012; Yashayaev, Seidov, 2015). С другой стороны, многие авторы подчеркивают важную роль атмосферных факторов, таких как крупномасштабная атмосферная циркуляция (Zhang et al., 2008; Жичкин, 2015),

циклоническая активность (Sorteberg, Kvingedal, 2006; Simmonds, Keay, 2009), потоки тепла из океана в атмосферу (Селиванова и др., 2016, Sorokina et al., 2016) и особенно ветер. В частности, автор работы (Koenigk et al., 2009) по результатам 465-летнего численного эксперимента сделал вывод, что межгодовая изменчивость площади льда Баренцева моря обусловлена главным образом импортом или экспортом льда под воздействием локального ветра, а перенос тепла течениями играет заметно меньшую роль. В работах (Pavlova, Pavlov, Gerland, 2014; Herbaut et al., 2015) 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 (Фролов и др., 2007). Поэтому несомненный интерес представляют особенности формирования и развития ледовых процессов в Баренцевом море различного временного масштаба. Поскольку наиболее драматические изменения наблюдаются в зимний период, то цель работы состоит в исследовании межгодовой изменчивости площади ледяного покрова Баренцева моря зимой (декабрь–февраль) и факторов, ее обуславливающих.

### **Исходные данные и методы исследования**

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

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

### **Результаты и обсуждение**

В режиме многолетней изменчивости сплоченности морского льда (СМЛ) можно выделить три главных компоненты, первая из которых описывает 65,4% изменчивости СМЛ, вторая – 10,8%, третья – 7,8%. Пространственная структура первой главной компоненты (*рис. 1а*) идентична пространственному распределению коэффициента линейного тренда изменения СМЛ (*рис. 2*). Следовательно, доминирующий вклад в межгодовую изменчивость СМЛ зимой в Баренцевом море вносит многолетний тренд. Он отрицательный

практически на всей акватории Баренцева моря, т. е. сплоченность льда и его площадь постепенно сокращаются. Область максимальных значений первой главной компоненты, которая расположена вдоль 77° с. ш. на востоке Баренцева моря, соответствует области наиболее интенсивного сокращения ледяного покрова (в среднем сплоченность льда здесь уменьшается на 22,0% за 10 лет). Во временном ходе коэффициента разложения при первой главной компоненте  $K1$  (рис. 1б) прослеживаются колебания с периодом около пяти лет. Таким образом, процесс сокращения является немонотонным.

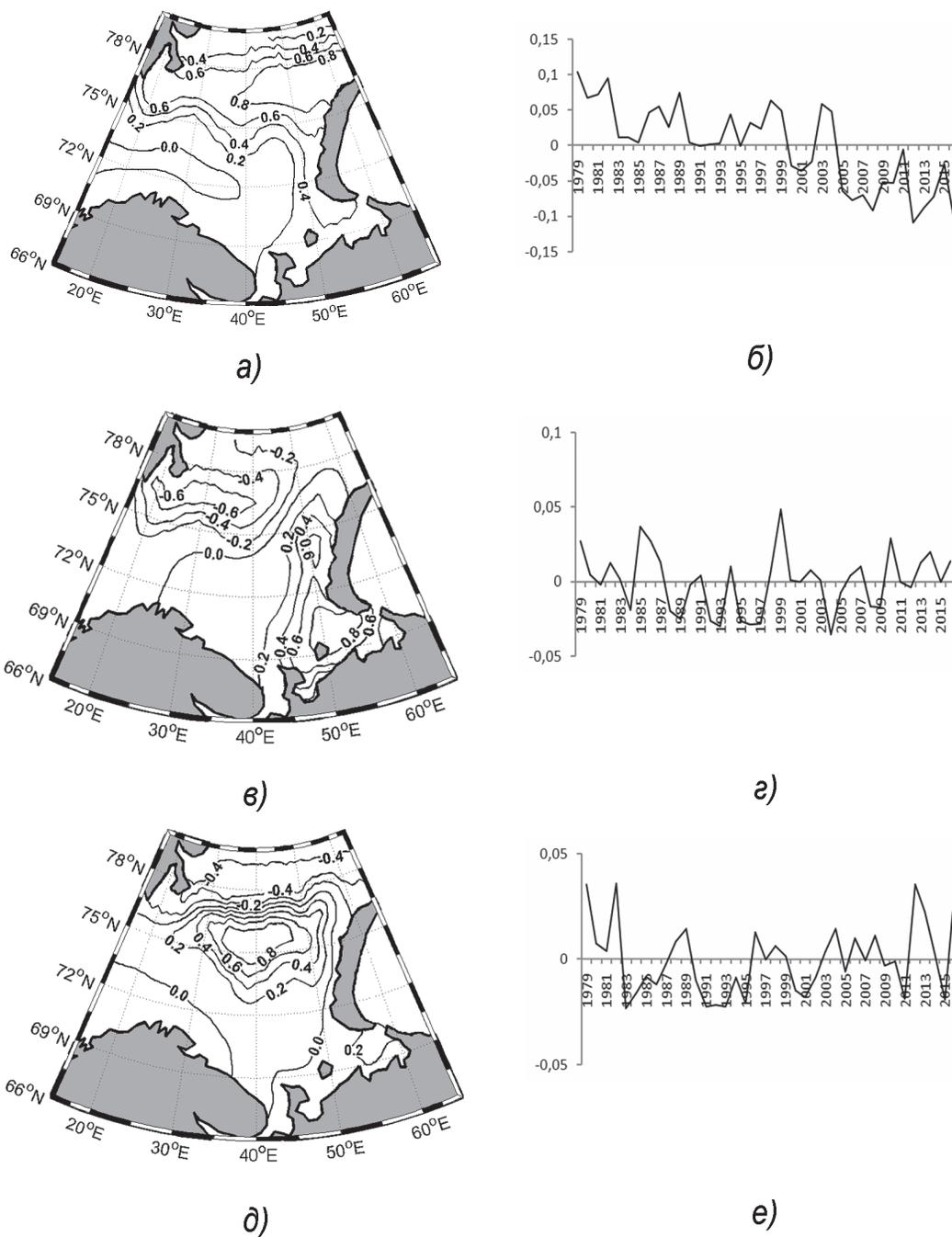


Рис. 1. Пространственная структура первых трех главных компонент поля сплоченности морского льда в Баренцевом море (декабрь–февраль 1978–2016 гг.): первая главная компонента PC1 (а), вторая главная компонента PC2 (в), третья главная компонента PC3 (д) и соответствующие им временные коэффициенты разложения  $K1$  (б),  $K2$  (е),  $K3$  (е)

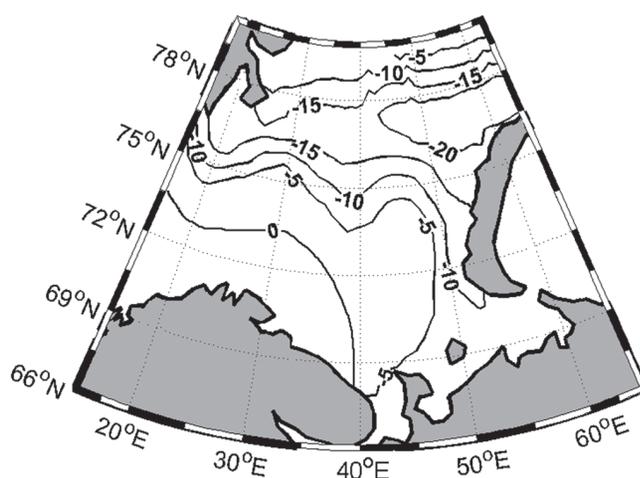


Рис. 2. Коэффициент линейного тренда ( $\times 10^{-3}$ ) изменения сплоченности морского льда в Баренцевом море за период 1978–2016 гг.

Корреляционный анализ показал, что температура воздуха и меридиональная составляющая ветра являются основными факторами, регулирующими СМЛ в данном районе. Обозначим сплоченность морского льда как  $SIC$  (*Sea Ice Concentration*), приземную температуру воздуха –  $T_a$ , зональную составляющую скорости ветра –  $U$ , меридиональную составляющую скорости ветра –  $V$ , сумму турбулентных потоков явного и скрытого тепла (суммарный турбулентный поток тепла на границе море-атмосфера) –  $Q$ . Коэффициент корреляции между СМЛ, осредненной по району ( $76\text{--}78^\circ$  с. ш.,  $42\text{--}62^\circ$  в. д.), и приземной температурой воздуха составил  $R(SIC, T_a) = -0,94$ ; между СМЛ и меридиональной составляющей скорости ветра –  $R(SIC, V) = -0,65$  (рис. 3); между СМЛ и суммарным турбулентным потоком тепла –  $R(SIC, Q) = -0,67$ . Также тесная связь обнаружена между временным коэффициентом  $KI$  и меридиональной составляющей скорости ветра  $R(KI, V) = -0,64$ . Связь с атмосферным давлением на уровне моря и зональной составляющей скорости ветра отсутствует.

Основная масса льда (95–97%) Баренцева моря представляет собой дрейфующий лед (Гидрометеорология..., 1990), который перемещается под действием ветра, морских течений или в результате давления соседних ледяных полей. Как следует из рис. 3, ветер северных направлений (отрицательные значения  $V$ ) способствует повышению СМЛ по причине экспорта льда из внутренних районов Арктики и усиленному притоку холодных арктических вод из района между Шпицбергом и Землей Франца-Иосифа. Низкие температуры воды, дефицит тепла способствуют процессам льдообразования и сопровождаются положительными аномалиями СМЛ. Однако, если в начале анализируемого периода ветры северных и южных направлений чередовались друг с другом, то, начиная с 2005 г., в этой области Баренцева моря устойчиво преобладают ветры южных направлений. По всей вероятности, это обусловлено изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции.

Вторая главная компонента (рис. 1в), по-видимому, описывает синхронное изменение адвекции тепла с течениями на юго-востоке и северо-западе Баренцева моря. В области

положительного центра второй главной компоненты ( $69-71^{\circ}$  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 интенсифицироваться, таким образом влияя на температурный режим моря в этом районе. На северо-востоке Баренцева моря холодные течения, распространяющиеся к югу от Земли Франца-Иосифа и вдоль берега Шпицбергена, усиливаются водами, поступающими из Арктического бассейна. Увеличение или уменьшение скорости течений на юго-востоке Баренцева моря (обычно это происходит при прохождении атмосферных циклонов над морем) приводит к ускорению или замедлению всей системы течений моря, которая образует циклонический круговорот (Гидрометеорология..., 1990).

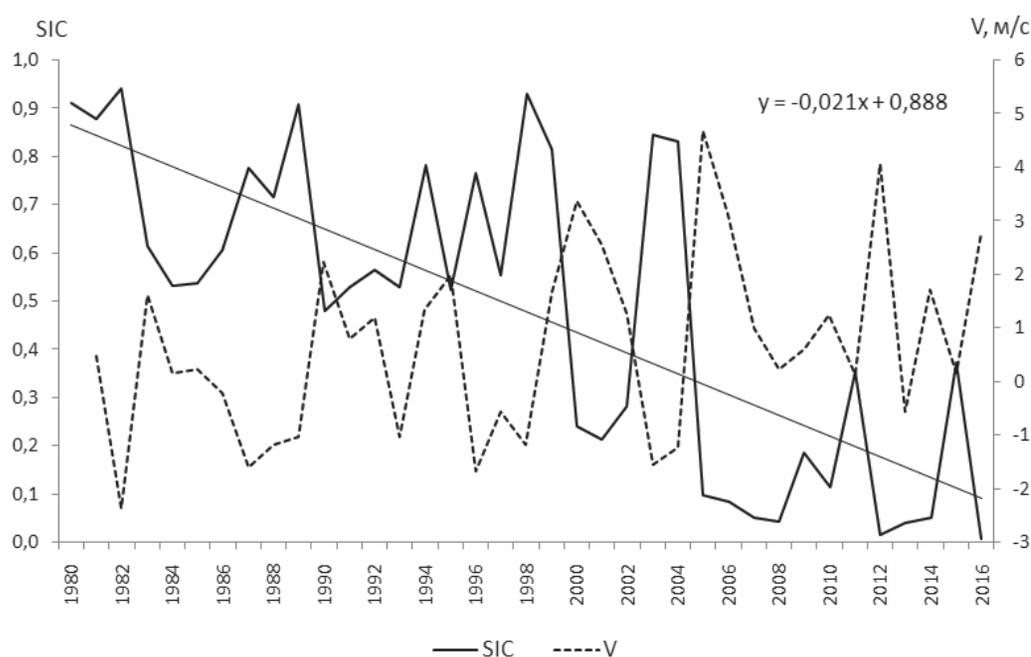


Рис. 3. Многолетний ход сплоченности морского льда и меридиональной составляющей скорости ветра, осредненные по району ( $76-78^{\circ}$  с. ш.,  $42-62^{\circ}$  в. д.)

Корреляционный анализ показал, что температура воздуха и зональная составляющая ветра являются основными факторами, регулируемыми СМЛ на юго-востоке и северо-западе Баренцева моря. Коэффициент корреляции между СМЛ, осредненной по району ( $69-71^{\circ}$  с. ш.,  $48-54^{\circ}$  в. д.), и приземной температурой воздуха составил  $R(SIC, T_a) = -0,92$ ; между СМЛ и зональной составляющей скорости ветра  $R(SIC, U) = -0,61$  (рис. 4); между СМЛ и суммарным турбулентным потоком тепла  $R(SIC, Q) = -0,59$ . Связь с атмосферным давлением на уровне моря и меридиональной составляющей скорости ветра отсутствует. Умеренная связь обнаружена между временным коэффициентом  $K_2$  и зональной составляющей скорости ветра  $R(K_2, U) = -0,58$ . Заметим, что во временном ходе коэффициента разложения при второй моде  $K_2$  (рис. 1г) также присутствует периодичность (период колебаний составляет около трех лет).

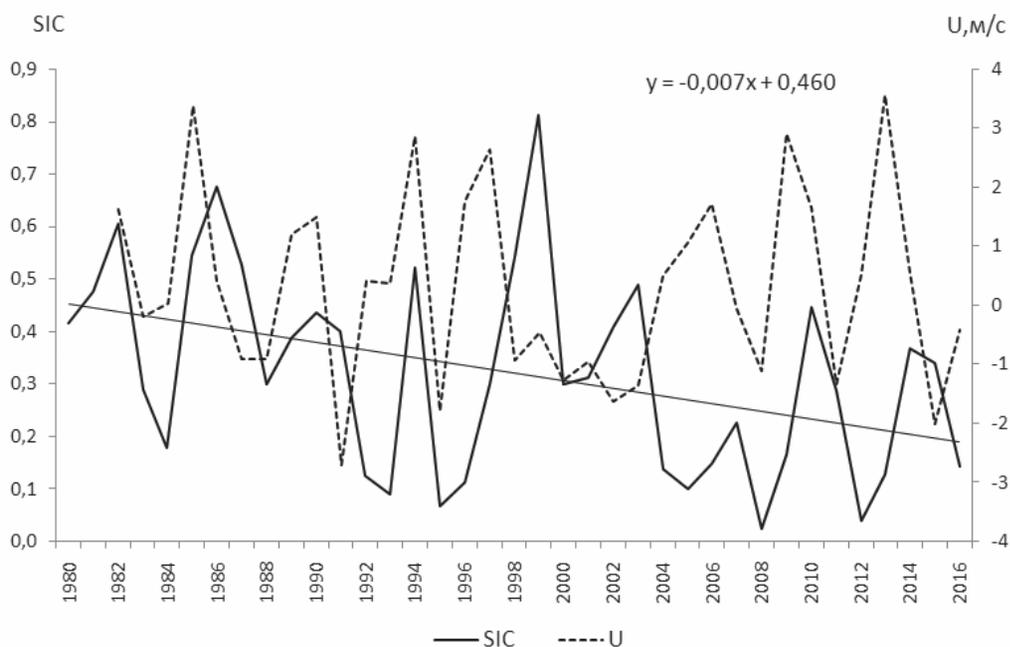


Рис. 4. Многолетний ход сплоченности морского льда и зональной составляющей скорости ветра, осредненные по району (69–71° с. ш., 48–54° в. д.)

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

Основному положительному центру третьей главной компоненты (74–76° с. ш., 35–45° в. д.) (рис. 1д) соответствует область наибольшей изменчивости границы кромки льда в зимние месяцы на севере Баренцева моря (Бойцов, 2007). 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: мгновенные суммарные турбулентные потоки тепла могут достигать 500–1000 Вт/м<sup>2</sup>. Поэтому третья мода, по мнению авторов, описывает изменение потоков тепла из океана в атмосферу при смещении границы ледяного покрова.

Наиболее тесно СМЛ в районе (74–76° с. ш., 35–45° в. д.) связана с суммарным потоком тепла  $R(SIC, Q) = -0,58$  (рис. 5). Связь с другими атмосферными параметрами менее выражена:  $R(SIC, Ta) = -0,50$ ;  $R(SIC, V) = -0,38$ . Атмосферное давление на уровне моря и зональная составляющая скорости ветра не оказывают какого-либо существенного влияния на изменчивость СМЛ в данном районе. Во временном ходе коэффициента разложения при третьей главной компоненте  $K3$  (рис. 1e) явная периодичность отсутствует.

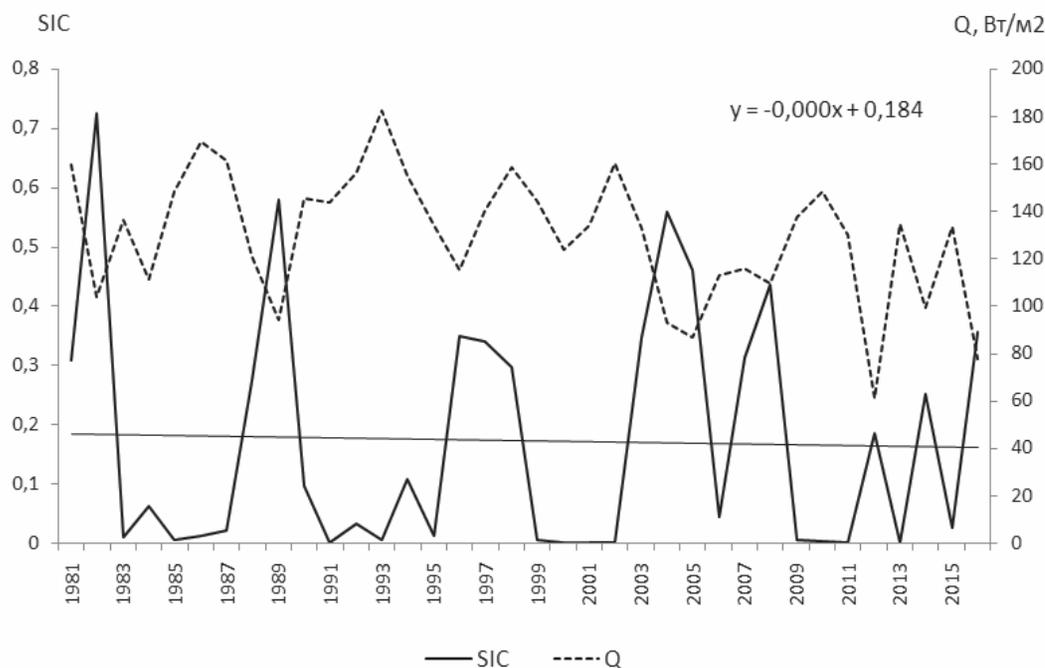


Рис. 5. Многолетний ход сплоченности морского льда и суммарного потока тепла, осредненные по району (74–76° с. ш., 35–45° в. д.)

### Заключение

Исследования многолетней изменчивости сплоченности морского льда в Баренцевом море показали, что за последние три десятилетия наблюдается существенное уменьшение ледовитости Баренцева моря, особенно выраженное в северо-восточной его части. В среднем сплоченность льда здесь уменьшается на 22,0% за 10 лет.

Анализ главных компонент поля сплоченности морского льда позволил выделить три устойчивые моды, которые суммарно описывают 84,0% дисперсии сплоченности морского льда. Каждая мода связана с определенными процессами взаимодействия в системе океан – морской лед – атмосфера, которые и определяют пространственно-временную структуру сплоченности ледового покрова Баренцева моря.

Работа выполнена в рамках научного проекта № 827-2015-0001 «Фундаментальные исследования процессов в системе океан – атмосфера – литосфера, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды и климата глобального и регионального масштабов» (шифр «Климат»).

## Литература

1. *Бойцов В.Д.* Сезонная изменчивость положения кромки льда в Баренцевом море // Вопросы промысловой океанологии. М.: Изд-во ВНИРО, 2007. Вып. 4. № 2. С. 206–220.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1. Баренцево море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280 с.
3. *Жичкин А.П.* Особенности межгодовых и сезонных колебаний аномалий ледовитости Баренцева моря // Метеорология и гидрология. 2015. № 5. С. 52–62.
4. *Матишов Г.Г., Дженюк С.Л., Моисеев Д.В., Жичкин А.П.* Климатические изменения морских экосистем Европейской Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 3 (86). С. 7–21.
5. *Селиванова Ю.В., Тилинина Н.Д., Гулёв С.К., Добролюбов С.А.* Влияние ледового покрова в Арктике на турбулентные потоки тепла между океаном и атмосферой // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 18–22.
6. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М.* Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 149–160.
7. *Arthun M., Eldevik T., Smedsrud L.H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R.B.* Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat // *J. Climate*. 2012. Vol. 25. P. 4736–4743.
8. *Cavalieri D.J., Parkinson C.L.* Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // *Cryosphere*. 2012. Vol. 6 (4). P. 881–889.
9. *Helland-Hansen B., Nansen F.* The Norwegian Sea // *Fiskdir. Skr. Ser. Havunders.* 1909. No. 2 (2). P. 1–360.
10. *Herbaut C., Houssais M.-N., Close S., Blaizot A.-C.* Two wind-driven modes of winter sea ice variability in the Barents Sea // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2015. Vol. 106. P. 97–115.
11. *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. Vol. 62A. P. 411–434.
12. *Koenigk T., Mikolajewicz U., Jungclaus J.H., Kroll A.* Sea ice in the Barents Sea: seasonal to interannual variability and climate feedbacks in a global coupled model // *Climate Dynamics*. 2009. Vol. 32. No. 7. P. 1119–1138.
13. *Pavlova O., Pavlov V., Gerland S.* The impact of winds and sea surface temperatures on the Barents Sea ice extent, a statistical approach // *Journal of Marine Systems*. 2014. Vol. 130. P. 248–255.
14. *Polyakov I.V., Timokhov L.A., Alexeev V.A., Bacon S., Dmitrenko I.A., Fortier L., Frolov I.E., Gascard J.-C., Hansen E., Ivanov V.V., Laxon S., Mauritzen C., Perovich D., Shimada K., Simmons H.L., Sokolov V.T., Steele M., Toole J.* Arctic Ocean warming contributes to reduced polar ice cap // *J. Phys. Oceanogr.* 2010. Vol. 40. P. 2743–2756.
15. *Simmonds I., Keay K.* Extraordinary September Arctic sea ice reductions and their relationships with storm behavior over 1979–2008 // *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36. L19715.
16. *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. Vol. 51. P. 415–449.
17. *Sorokina S.A., Li C., Wettstein J.J., Kvamstø N.G.* Observed atmospheric coupling between Barents Sea ice and the Warm-Arctic Cold-Siberian anomaly pattern // *J. Climate*. 2016. Vol. 29. P. 495–511.
18. *Sorteberg A., Kvingedal B.* Atmospheric Forcing on the Barents Sea Winter Ice Extent // *J. Climate*. 2006. Vol. 19. P. 4772–4787.
19. *Yashayaev I., Seidov D.* The role of the Atlantic Water in multidecadal ocean variability in the Nordic and Barents Seas // *Progress in Oceanography*. 2015. Vol. 132. P. 68–127.
20. *Zhang X., Sorteberg A., Zhang J., Gerdes R., Comiso J.C.* Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system // *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35. L22701.

## Spatiotemporal structure of sea ice concentration patterns in the Barents Sea from satellite data

N.V. Mikhailova, A.V. Yurovsky

*Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia  
E-mail: Nataly.Mikhailova@mail.ru*

The principal component analysis was applied to passive microwave sensing data of sea ice cover in the Arctic (National Snow and Ice Data Center, 1978–2016). Three principal components were distinguished. The first principal component is accounted for 65,4% of the sea ice concentration total variance and describes a long-term trend. The second principal component (10,8%) is related to variations in heat inflow with the sea currents under the influence of atmospheric circulation. The third principal component (7,8%) is associated with the variability of the total heat

flux from the ocean to the atmosphere at the boundary of the ice edge in the northern Barents Sea region. Processes in the ocean - sea ice - atmosphere system which affect long-term dynamics of the ice cover of the Barents Sea are also investigated. Along with the air temperature, which regulates the processes of local ice formation, wind plays an important role. In the northern Barents Sea region 42% of the sea ice concentration variability can be explained by the variability of the meridional component of the wind speed, in the southeast of the sea 37% of the sea ice concentration variability can be explained by the variability of the zonal component of the wind speed. It is shown that since 2005 there have been significant changes in the atmospheric circulation over the Barents Sea.

**Keywords:** sea ice concentration, the Barents Sea, interannual variability, principal component analysis, atmospheric characteristics

Accepted: 27.02.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-246-254

## References

1. Boitsov V.D., Sezonnaya izmenchivost' polozheniya kromki l'da v Barentsevom more (Seasonal variability of the ice edge location in the Barents Sea), *Voprosy promyslovoi okeanologii*, Moscow: Izd-vo VNIRO, 2007, Issue 4, No. 2, pp. 206–220.
2. *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei SSSR. Vol. 1. Barentsevo more. Iss. 1: Gidrometeorologicheskie usloviya* (Hydrometeorology and hydrochemistry of the USSR seas. Vol. 1. The Barents Sea. Iss. 1: Hydrometeorological conditions), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990, 280 p.
3. Zhichkin A.P., Osobennosti mezhgodovykh i sezonnykh kolebanii anomalii ledovitosti Barentseva morya (Peculiarities of interannual and seasonal variations of the Barents Sea ice coverage anomalies), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2015, No. 5, pp. 52–62.
4. Matishov G.G., Dzhenyuk S.L., Moiseev D.V., Zhichkin A.P., Klimaticheskie izmeneniya morskikh ekosistem Evropeiskoi Arktiki (Climatic changes of the European Arctic marine ecosystems), *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2010, No. 3 (86), pp. 7–21.
5. Selivanova Yu.V., Tilinina N.D., Gulev S.K., Dobrolyubov S.A., Vliyanie ledovogo pokrova v Arktike na turbulentnye potoki tepla mezhdru okeanom i atmosferoi (An impact of sea-ice cover on the ocean-atmosphere turbulent heat fluxes in the Arctic), *Okeanologiya*, 2016, Vol. 56, No. 1, pp. 18–22.
6. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolyanitskii V.M., Klimaticheskie izmeneniya ledovykh uslovii v arkticheskikh moryakh Evraziiskogo shel'fa (Climatic changes of ice conditions in the Arctic Seas of the Euroasian shelf), *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2007, No. 75, pp. 149–160.
7. Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L.H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R.B., Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat, *J. Climate*, 2012, Vol. 25, pp. 4736–4743.
8. Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010, *Cryosphere*, 2012, Vol. 6 (4), pp. 881–889.
9. Helland-Hansen B., Nansen F., The Norwegian Sea, *Fiskdir. Skr. Ser. Havunders*, 1909, No. 2 (2), pp. 1–360.
10. Herbaut C., Houssais M.-N., Close S., Blaizot A.-C., Two wind-driven modes of winter sea ice variability in the Barents Sea, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, Vol. 106, pp. 97–115.
11. 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, Vol. 62A, pp. 411–434.
12. Koenigk T., Mikolajewicz U., Jungclaus J.H., Kroll A., Sea ice in the Barents Sea: seasonal to interannual variability and climate feedbacks in a global coupled model, *Climate Dynamics*, 2009, Vol. 32, No. 7, pp. 1119–1138.
13. Pavlova O., Pavlov V., Gerland S., The impact of winds and sea surface temperatures on the Barents Sea ice extent, a statistical approach, *Journal of Marine Systems*, 2014, Vol. 130, pp. 248–255.
14. Polyakov I.V., Timokhov L.A., Alexeev V.A., Bacon S., Dmitrenko I.A., Fortier L., Frolov I.E., Gascard J.-C., Hansen E., Ivanov V.V., Laxon S., Mauritzen C., Perovich D., Shimada K., Simmons H.L., Sokolov V.T., Steele M., Toole J., Arctic Ocean warming contributes to reduced polar ice cap, *J. Phys. Oceanogr.*, 2010, Vol. 40, pp. 2743–2756.
15. Simmonds I., Keay K., Extraordinary September Arctic sea ice reductions and their relationships with storm behavior over 1979–2008, *Geophys. Res. Lett.*, 2009, Vol. 36, L19715.
16. 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, Vol. 51, pp. 415–449.
17. Sorokina S.A., Li C., Wettstein J.J., Kvamstø N.G., Observed atmospheric coupling between Barents Sea ice and the Warm-Arctic Cold-Siberian anomaly pattern, *J. Climate*, 2016, Vol. 29, pp. 495–511.
18. Sorteberg A., Kvingedal B., Atmospheric Forcing on the Barents Sea Winter Ice Extent, *J. Climate*, 2006, Vol. 19, pp. 4772–4787.
19. Yashayaev I., Seidov D., The role of the Atlantic Water in multidecadal ocean variability in the Nordic and Barents Seas, *Progress in Oceanography*, 2015, Vol. 132, pp. 68–127.
20. Zhang X., Sorteberg A., Zhang J., Gerdes R., Comiso J.C., Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system, *Geophys. Res. Lett.*, 2008, Vol. 35, L22701.