

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

УДК 551.326.7(292.2)

Отклик воздействия внутренних и внешних факторов в широтном смещении кромки морского льда в Арктическом бассейне

© 2016 А.Е. Букатов, А.А. Букатов, М.В. Бабий

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
E-mail: newisland@list.ru

Поступила в редакцию 16.08.2016 г.

Выполнено исследование внутригодовой климатической реакции широтного смещения кромки морского льда в Арктике на изменчивость крупномасштабной атмосферной циркуляции Арктическое колебание и Североатлантическое колебание, а также положения северной границы теплого течения Гольфстрим и солнечной активности за период 1969 – 2012 гг. Показано, что в зависимости от долготного сектора отклик географического положения кромки на изменения индексов атмосферной циркуляции и индекса Гольфстрим может проявляться как квазисинхронно, так и с запаздыванием или опережением. Дана оценка корреляционной связи широтного смещения кромки вдоль ее периметра с изменением чисел Вольфа.

Ключевые слова: Арктика, морской лед, кромка морского льда, динамика положения кромки.

Введение. Морской ледяной покров представляет собой важную компоненту глобальной климатической системы. Динамика его состояния в Северном Ледовитом океане является ключевым фактором и индикатором климатических изменений в Арктике [1]. Это состояние определяется площадью льда, его толщиной, сплоченностью и другими характеристиками, подверженными воздействию процессов в атмосфере и гидросфере, обусловленных влиянием как внутренних, так и внешних факторов. К внутренним факторам можно отнести гидрометеорологические процессы, вызванные воздействием атмосферной циркуляции, к внешним – колебания солнечной активности, определяемые процессами внутри Солнца и сопровождающиеся изменениями ультрафиолетового излучения, корпускулярных потоков и магнитного поля Солнца [2].

Колебания площади морского льда в Арктике связаны с изменением положения его кромки [3]. Поэтому в настоящей работе выполнено исследование реакции широтного смещения кромки льда на Арктическое (АК) и Североатлантическое (САК) колебания, а также на динамику положения северной границы теплого течения Гольфстрим и изменения чисел Вольфа солнечной активности.

Исходные данные и методика исследований. В работе использованы массивы *BADC* [4] (1969 – 1981 гг.) и *NCEP* [5] (1982 – 2012 гг.) среднемесячных данных о сплоченности морского льда (отношение площади льдин в зоне, где они распределены, к общей площади этой зоны) в процентах балль-

ности от 0 до 100% в узлах одноградусных сеток. На их основе для каждого градуса долготы сформирован ряд значений сплоченности льда с 1969 по 2012 г.

Для исследования динамики кромки морского льда (первое появление льда со сплоченностью $\geq 15\%$) составлен ряд среднемесячных значений широты ее расположения для каждого градуса долготы от о. Гренландия до Северной Америки вдоль северных берегов Евразии. По этим данным определена внутригодовая изменчивость положения кромки. Дана оценка корреляционной связи широтного смещения кромки с индексами атмосферной циркуляции Арктическое колебание и Североатлантическое колебание, а также с индексом Гольфстрим и числами Вольфа солнечной активности.

Внутригодовая динамика положения кромки льда. Региональное распределение полученных среднемесячных климатических положений кромки морского льда от о. Гренландия до Северной Америки вдоль берега Евразии ($21 - 126^\circ$ з. д. против часовой стрелки) иллюстрируют цветные линии на рис. 1. Видно, что положение кромки зависит не только от сезона, но и от района океана. Наиболее значительные смещения кромки в широтном направлении во внутригодовом цикле наблюдаются западнее Новой Земли ($20 - 55^\circ$ в. д.) и в районе Берингова пролива. Эти районы находятся в зонах, граничащих с открытым океаном (Атлантическим и Тихим). В районе $\sim 42^\circ$ в. д. кромка может сместиться на север до 82° с. ш. Отметим, что перемещение кромки столь далеко на север наблюдалось и ранее в истории Арктики. В частности, похожее значительное смещение на север в августе отмечалось в работе [6].

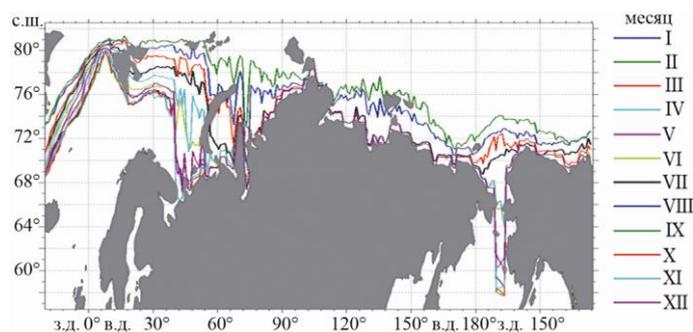


Рис. 1. Среднемесячные климатические положения кромки морского льда

Корреляционная связь положения кромки льда и индексов атмосферной циркуляции Арктическое колебание и Североатлантическое колебание. Для оценки корреляционной связи между положением кромки морского льда и индексами атмосферной циркуляции АК и САК построены соответствующие взаимно-корреляционные функции $F(t)$ по предварительно сглаженным скользящим средним с последующим детрендированием исходных данных за период 1969 – 2012 гг. Полученные ансамбли взаимно-корреляционных функций для районов морей: Лаптевых ($113 - 120^\circ$ в. д.),

Восточно-Сибирское (159 – 164° в. д.), Чукотское – Берингов пролив (170 – 167° з. д.), Чукотское и Бофорта (165 – 157° з. д.), Бофорта (150 – 130° з. д.), Дейвиса (65 – 55° з. д.), Гренландское и Норвежское (12° з. д. – 2° в. д.), Баренцево (24 – 29° в. д., 45 – 52° в. д.), Карское (79 – 85° в. д.) – изображены на рис. 2, *a* – *и* для Арктического колебания, на рис. 3, *a* – *и* для Североатлантического.

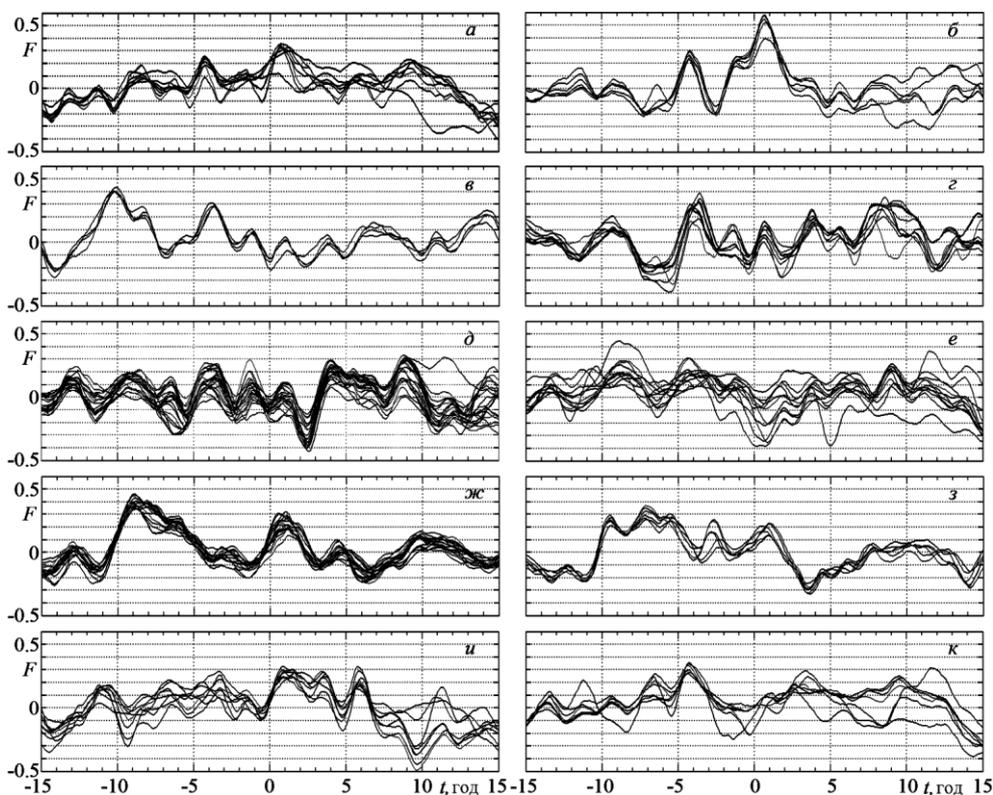


Рис. 2. Ансамбль взаимно-корреляционных функций, связывающих широтное смещение кромки льда с индексом Арктическое колебание

Анализ этих графических зависимостей показывает, что в западной части моря Лаптевых (рис. 2, *a*) реакция кромки на изменение индекса АК проявляется примерно через год с коэффициентом корреляции 0,35. На изменение САК кромка реагирует здесь квазисинхронно с коэффициентом 0,4 (рис. 3, *a*).

В Восточно-Сибирском море отклик положения кромки на индекс АК проявляется с коэффициентом 0,59 через 8 мес (рис. 2, *б*), а коэффициент корреляции положения кромки и индекса САК не превосходит 0,4 (рис. 3, *б*). При этом реакция событий с максимальным значением коэффициента квазисинхронная.

В районе Чукотское море – Берингов пролив квазисинхронная согласованность динамики кромки и АК (рис. 2, *в*) фиксируется только на уровне коэффициента – 0,21, а согласованность со сдвигом 4 года проявляется с коэффициентом 0,3. На таком же временном сдвиге проявляется и реакция кромки на САК (рис. 3, *в*) с коэффициентом 0,4.

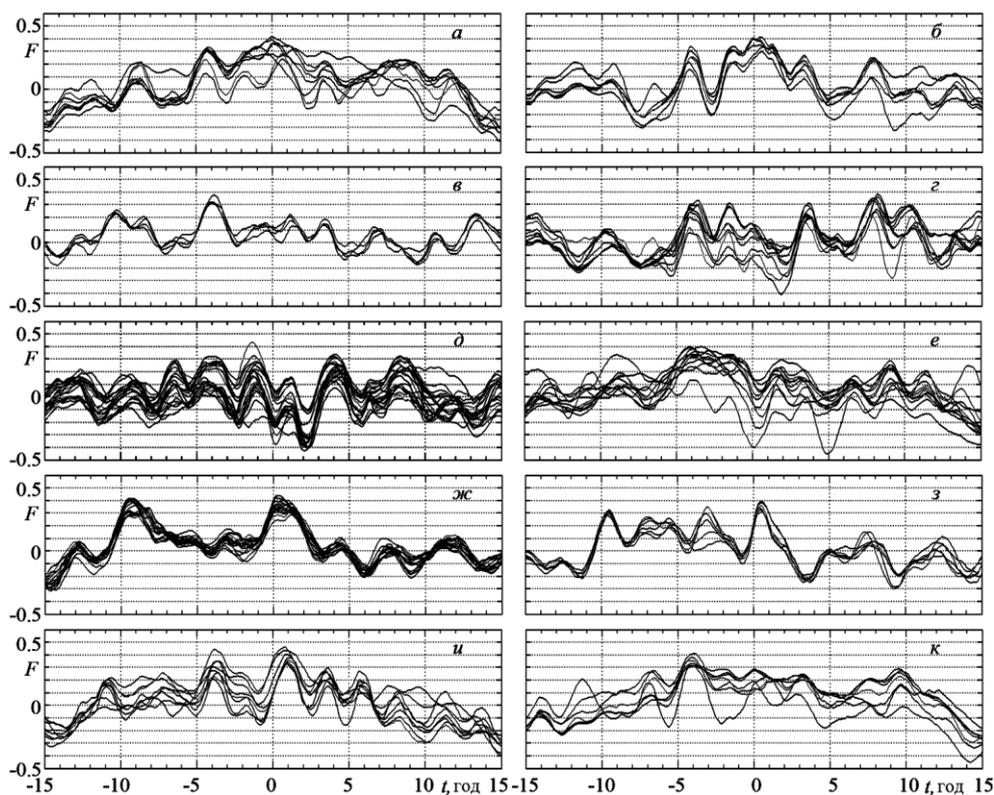


Рис. 3. Ансамбль взаимно-корреляционных функций, связывающих широтное смещение кромки льда с индексом Североатлантического колебание

Взаимно-корреляционные функции, иллюстрирующие связь положения кромки в области $165 - 157^\circ$ з. д. (восточная часть Чукотского моря – западная часть моря Бофорта) с индексами АК и САК, представлены на рис. 2, *г* и 3, *з* соответственно. Видно, что проявление смещений кромки опережает отклик в изменении индекса АК на 3,5 года. При этом коэффициент корреляции равен 0,4. Что касается САК, то отклик на него в положении кромки проявляется через 2 года с коэффициентом корреляции $-0,4$. Величины указанных коэффициентов являются максимальными по рассматриваемому здесь региону.

Для моря Бофорта поведение взаимно-корреляционных функций, связывающих смещение кромки и изменение индексов АК и САК, качественно похоже (рис. 2, *д* и 3, *д*). В обоих случаях реакция кромки проявляется с запаздыванием примерно на 2,5 года, а коэффициент корреляции отрицательный и по модулю не превышает 0,41.

Для большинства долгот в проливе Дэвиса графики взаимно-корреляционных функций имеют качественно похожую структуру. Максимальное значение по модулю коэффициента взаимной корреляции положения кромки с индексом АК (рис. 2, *е*), достигаемое на полугодовом и 5-летнем сдвиге, равно 0,39. Коэффициент взаимной корреляции с САК равен $-0,4$ при нулевом сдвиге и $-0,45$ при отклике в положении кромки через 5 лет (рис. 3, *е*).

В районе 12° з. д. – 2° в. д. распределения взаимно-корреляционных функций, связывающих положение кромки с АК (рис. 2, ж) и САК (рис. 3, ж), для всех долгот имеют минимальные отличия по сравнению с распределениями в других районах Арктики. При этом реакция кромки на изменение индекса АК фиксируется с коэффициентом 0,31 на сдвиге около года, а отклик в положении кромки на САК проявляется с коэффициентом 0,42 через 6 мес.

В западной части Баренцева моря кромка реагирует на изменение индекса АК через 3,5 года (рис. 2, з), на изменение индекса САК – с запаздыванием на 6 мес (рис. 3, з). При этом коэффициенты корреляции равны $-0,31$ и $0,4$ соответственно. В восточной части моря (рис. 2, и; 3, и) реакция кромки на АК и САК проявляется через год с коэффициентами корреляции $0,31$ и $0,45$ соответственно.

Взаимно-корреляционные функции для Карского моря в районе $79 - 87^\circ$ в. д. показывают, что изменения смещений кромки опережают изменения индексов АК и САК примерно на 4 года. Коэффициенты взаимной корреляции при этом равны $0,35$ для АК (рис. 2, к) и $0,4$ для САК (рис. 3, к).

Корреляционная связь изменений положения кромки льда и индекса Гольфстрим. Взаимно-корреляционные функции, характеризующие связь изменений широтного положения ледовой кромки для каждой долготы вдоль ее периметра и индекса Гольфстрим (ИГ), изображены на рис. 4. Анализ поведения представленных графиков показывает, что в диапазоне рассматриваемых долгот в западной части моря Лаптевых (рис. 4, а) реакция положения кромки происходит квазисинхронно или с полугодовым сдвигом. При этом коэффициент корреляции находится в пределах $0,2 - 0,51$.

В Восточно-Сибирском море практически на всех рассматриваемых долготах кромка реагирует на изменение ИГ через год (рис. 4, б) с коэффициентом корреляции, изменяющимся в пределах $0,3 - 0,5$. Двухлетний временной сдвиг реакции кромки льда на ИГ имеет место и в районе Чукотское море – Берингов пролив (рис. 4, в) с коэффициентом корреляции, не превышающим $0,29$.

В восточной части Чукотского моря и в западной части моря Бофорта (рис. 4, з), а также в море Бофорта (рис. 4, д) кромка квазисинхронно реагирует на ИГ. Коэффициент корреляции изменяется при этом в диапазоне $0,1 \dots -0,5$.

В проливе Дейвиса положение кромки среагирует на изменение ИГ через полгода (рис. 4, е) с коэффициентом, достигающим значения $0,5$.

В районе Гренландского и Норвежского морей (рис. 4, ж), а также в западной части Баренцева моря (рис. 4, з) изменению ИГ предшествует смещение кромки. Временной интервал опережения составляет около года, а коэффициент корреляции не превышает $0,55$. В восточной части Баренцева моря (рис. 4, и) реакция кромки на изменение ИГ запаздывает на 6 мес с максимальным для рассматриваемого района коэффициентом корреляции $0,61$.

В восточной части Карского моря (рис. 4, к) отклик в положении льда на изменение ИГ фиксируется на временном сдвиге от полугода до двух лет, а коэффициент корреляции не превышает $0,5$.

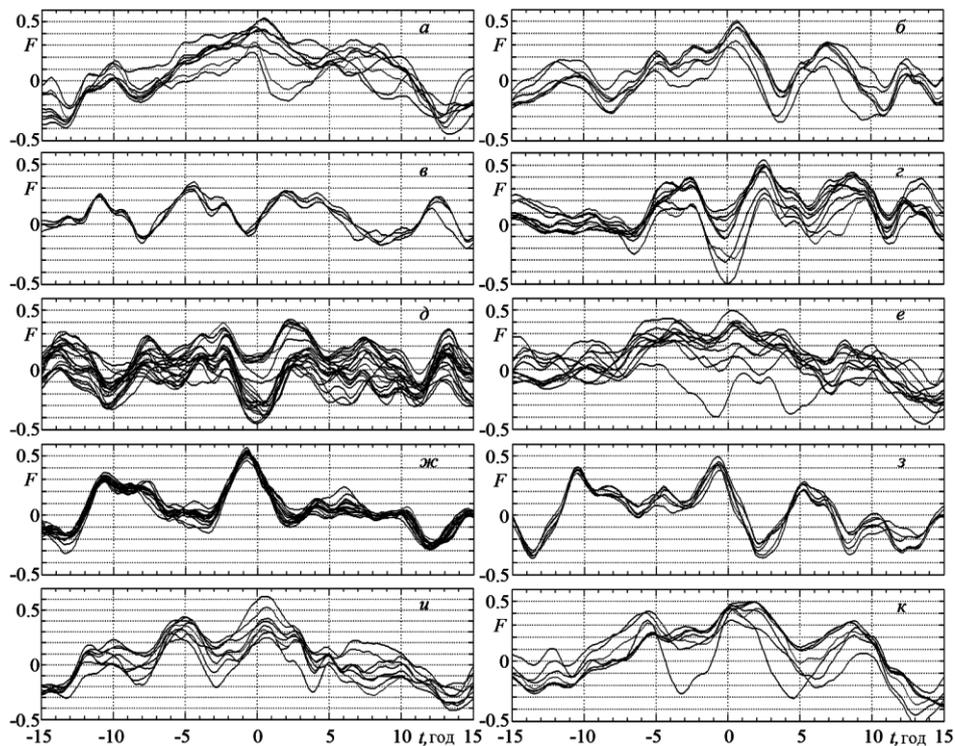


Рис. 4. Ансамбль взаимно-корреляционных функций, связывающих широтное смещение кромки льда с индексом Гольфстрим

Корреляционная связь смещений кромки льда с числами Вольфа солнечной активности. Для оценки зависимости динамики положения кромки морского льда от изменений чисел Вольфа солнечной активности, отражающих изменчивость количества пятен на солнечном диске, выполнен анализ взаимно-корреляционных функций, характеризующих рассматриваемую зависимость. Функции рассчитаны по среднемесячным значениям широты положения кромки на каждой долготе, сглаженным годовым скользящим средним, а также по сглаженному ряду чисел Вольфа. Ансамбли графиков взаимно-корреляционных функций $F(t)$, где t – сдвиг по времени, характеризующих связь между рядом чисел Вольфа и рядом значений смещения кромки на заданной долготе, приведен на рис. 5. Видно, что поведение функ-

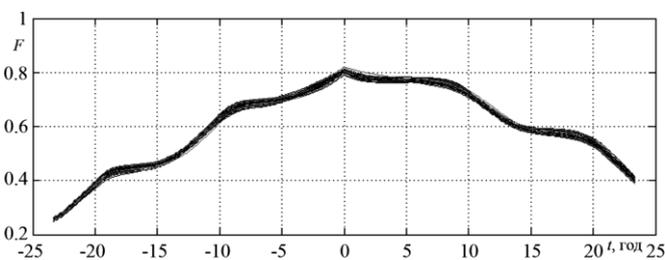


Рис. 5. Ансамбль взаимно-корреляционных функций, связывающих широтное смещение кромки льда и числа Вольфа солнечной активности

ций $F(t)$ на всех долготах практически одинаковое как в качественном, так и в количественном отношении. Отметим, что функции $F(t)$ получены с учетом трендовой составляющей в исходных данных в рядах широтного смещения кромки льда и чисел Вольфа, что и обусловило высокий коэффициент, равный 0,8. На всех графиках прослеживаются колебания с периодом, близким к 11-летнему (цикл Швабе), хотя и с небольшой амплитудой.

Долготное распределение взаимно-корреляционных функций, построенных после исключения трендовой составляющей из исходных данных и последующего их сглаживания годовым скользящим средним, показано на рис. 6. Видно, что цвета, характеризующие положительные и отрицательные значения взаимно-корреляционных функций, чередуются с периодом, близким к периоду цикла Швабе. Наиболее значимая корреляционная связь с коэффициентом корреляции $R \sim 0,6$ (цветовая шкала) со сдвигом два года (относительно чисел Вольфа) имеет место в области между Гренландским и Норвежским морями. Для моря Лаптевых коэффициент корреляции составляет 0,45 с запаздыванием реакции кромки от полугода до двух лет. В районе Восточно-Сибирского моря наблюдается как квазисинхронная связь, так и с запаздыванием до двух лет с коэффициентом корреляции 0,42.

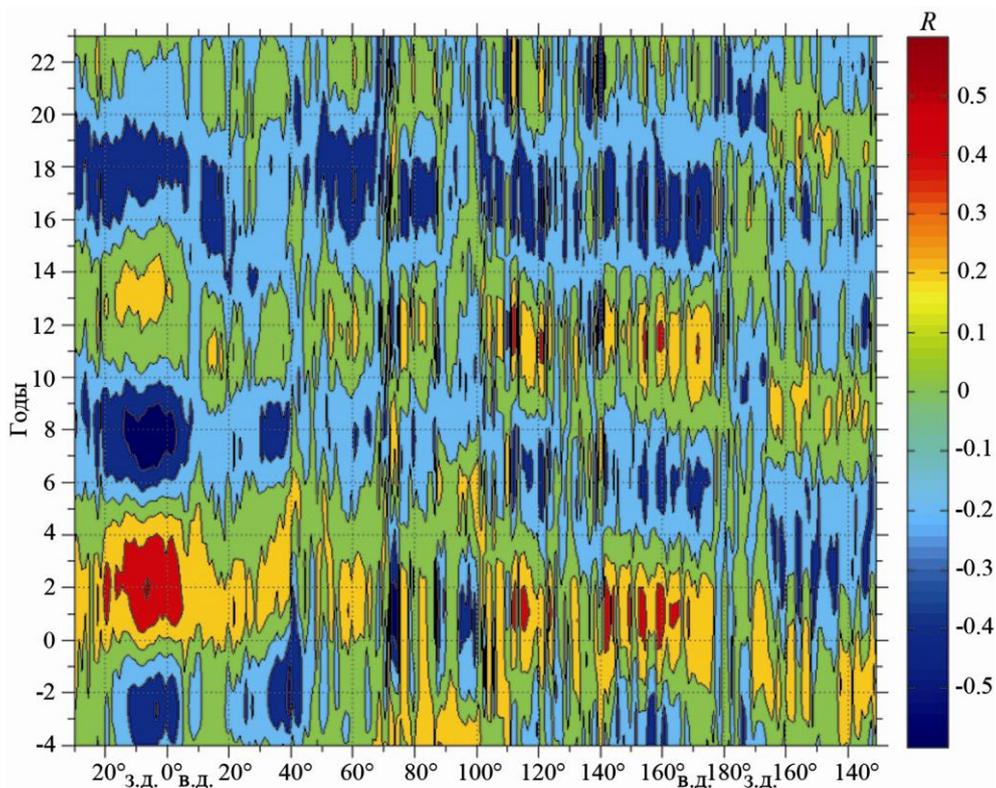


Рис. 6. Долготное распределение взаимно-корреляционных функций, связывающих широтное смещение кромки льда и числа Вольфа солнечной активности, без учета трендовой составляющей

Заключение. По среднемесячным данным о сплоченности морского льда за период 1969 – 2012 гг. сформирован ряд значений широты расположения кромки для каждого градуса долготы в Арктическом бассейне. На его основе выполнен анализ внутригодовой климатической изменчивости регионального распределения кромки льда. Наиболее значительные смещения кромки в широтном направлении во внутригодовом цикле отмечены западнее Новой Земли и в районе Берингова пролива.

Проведено исследование взаимно-корреляционных функций, связывающих широтное смещение кромки льда с индексами атмосферной циркуляции Арктическое колебание и Североатлантическое колебание. Рассмотрена и реакция положения кромки на изменения индекса Гольфстрим и чисел Вольфа солнечной активности.

Показано, что смещение положения кромки практически по всему ее периметру реагирует на изменение индексов атмосферной циркуляции. В зависимости от долготного сектора реакция проявляется либо квазисинхронно, либо с запаздыванием от полугода до 5 лет. В то же время в районе между восточной частью Чукотского моря и западной частью моря Бофорта проявление смещений кромки опережает отклик в изменении индекса Арктическое колебание на 3,5 года.

Реакция широтного смещения кромки на изменение индекса Гольфстрим проявляется вдоль ее периметра либо казисинхронно, либо с запаздыванием от полугода до двух лет. Исключение составляют районы Гренландского и Норвежского морей, а также западная часть Баренцева моря, где изменению индекса Гольфстрим предшествуют смещения кромки. Временной интервал опережения составляет около года, а коэффициент корреляции не превышает 0,55. Между широтным смещением кромки и изменением чисел Вольфа проявляется прямая корреляционная связь с коэффициентом корреляции 0,8. При этом на каждой долготе прослеживаются колебания взаимно-корреляционной функции с периодом, близким к 11-летнему (цикл Швабе). В отклонениях взаимно-корреляционных функций от их среднего положения изменчивость солнечной активности проявляется в смещении положения кромки с запаздыванием до двух лет.

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».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хон В.Ч., Мохов И.И.* Климатические изменения в Арктике и возможные условия арктической морской навигации в XXI веке // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2010. – 46, № 1. – С. 19 – 25.
2. *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.
3. *Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И. и др.* Изменение климата Арктики при глобальном потеплении // Там же. – 2015. – № 1 (103). – С. 32 – 41.
4. <http://badc.nerc.ac.uk/data/hadisst>.

5. <http://nomad1.ncep.noaa.gov>.
6. *Falk-Petersen S., Wold A., Rostad A. et al.* Intense Feeding of *Calanus hyperboreus* on Arctic Autumn Bloom Propagated by a Record Minimum Sea Ice Extent in 2004 // The ACIA International Scientific Symposium on Climate Change in the Arctic. November 9 – 12. – Reykjavik, Iceland, 2004. – P. 1 – 4.

Response of influence of internal and external factors in the latitudinal sea ice edge displacement in the Arctic basin

A.E. Bukatov, A.A. Bukatov, M.V. Babii

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: newisland@list.ru*

Inter-annual climatic response of the sea ice edge latitudinal displacement in the Arctic to variability of the large-scale atmospheric circulation (the Arctic Oscillation and North Atlantic Oscillation), location of the Gulf Stream northern boundary and solar activity in 1969–2012 is studied. It is shown that, depending on the longitudinal sector, response of the edge geographical position to changes of the atmospheric circulation and the Gulf Stream indices can be manifested both quasi-synchronously and with delay or in advance. The correlation relation between the edge latitudinal displacement along its perimeter and the Wolf numbers' variation is assessed.

Keywords: Arctic, sea ice, sea ice edge, dynamics of edge location.