https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-1-38-55
УДК 551.326.1/.2(268.53/.56)

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ ORIGINAL ARTICLE

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПОЛОЖЕНИЕ КРОМКИ ЛЬДОВ В АВГУСТЕ – СЕНТЯБРЕ В ВОСТОЧНЫХ МОРЯХ РОССИИ В НАЧАЛЕ XXI в.

А.Г. ЕГОРОВ

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

ego@aari.ru

Резюме

По данным наблюдений за 1981–2018 гг. проведен анализ широтного положения кромки льдов в августе – сентябре в восточных морях Российской Арктики (Лаптевых, Восточно-Сибирском, Чукотском). Установлено, что исходный ряд состоит из двух существенно различающихся частей: 1981–2001 гг. с устойчиво южным положением кромки и 2002–2018 гг. с устойчиво северным положением кромки. При этом размах колебаний в положении кромки между экстремальными годами составляет около 1000 км. Показано, что режим пространственного смещения кромки на север отличается в западной и восточной части акватории, по разные стороны от Новосибирских островов. В течение 2002–2010 гг. наибольшее смещение кромки на север наблюдалось в Чукотском и Восточно-Сибирском морях (максимум 2007 г.), а в течение 2011–2018 гг. — в море Лаптевых (максимум 2014 г.). Исходя из волновой природы колебательного изменения положения границы льдов, предполагается, что в течение 2020-х гг. следует ожидать некоторого возвратного движения кромки льдов в южном направлении.

Ключевые слова: Восточно-Сибирское море, кромка льдов в конце летнего периода, ледяной покров арктических морей России, многолетняя изменчивость ледовых условий, море Лаптевых, Чукотское море.

Для цитирования: *Егоров А.Г.* Пространственное положение кромки льдов в августе – сентябре в восточных морях России в начале XXI в. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. Вып. 1. С. 38–55. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-1-38-55.

Поступила 13.11.2019 **После переработки 21.01.2020** **Принята 13.02.2020**

SPATIAL LOCATION OF ICE EDGE IN AUGUST – SEPTEMBER IN THE RUSSIA'S EASTERN SEAS IN EARLY 21ST CENTURY

ALEXANDER G. EGOROV

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

ego@aari.ru

Summary

The goal of the present paper is to analyze the spatial-temporal variability of ice edge location in the Eastern Arctic seas of Russia (the Laptev, East-Siberian and Chukchi Seas) in late summer (August-September) during the period from 1981 to 2018, as well as to estimate the multi-year changes taking place in the 21st century. The special archive containing the information on latitude position of ice edge at the meridians between the Severnaya Zemlya Archipelago and Alaska was developed; the data of AARI (Arctic and Antarctic Research Institute) specialized observations and satellite images were used.

The inter-annual variability of ice edge position in the total area shows that the entire period 1981–2018 consists of two significantly different parts: the interval from 1981 to 2001 with southern ice edge position (mean latitude in September comprised 74,9° N), and the interval from 2002 to 2018 with northern ice edge position (mean latitude 78,7° N). The difference between the extreme values of ice edge latitude at some meridians reached 9 degrees of latitude (about 1000 km).

During the period from 2002 to 2018, the area of mostly active northward displacement of ice edge moved generally from east to west. From 2002 to 2010, the maximum northward displacement of ice edge was observed in the East-Siberian and Chukchi Seas; in 2007 the extreme northern position of ice edge was registered to the east of the New Siberia Archipelago (mean latitude comprised 84,0° N). However, during 2011–2018, the maximum northward displacement of ice edge was observed in the Laptev Sea; in 2014 the extreme northern position of ice edge was registered to the west of the New Siberia Archipelago (mean latitude comprised 84,5° N).

Typologically, the displacement of ice edge from south to north during the period from 2001–2018 looks like a wave; its crest and sole drift from the Chukchi Sea toward the Laptev Sea. Within the period from 2007 to 2010, the ice edge displacement reached its maximum, and after this, during 2011–2015, the reverse motion from north to south began. One can forecast that within the nearest coming years the ice edge oscillatory southward drift would continue, and by the end of 2020-s one can expect the ice edge to have the position typical for the period 2002–2006.

Keywords: ice cover of the Russia's Arctic seas, ice edge in late summer, multi-year variability of ice conditions, the Chukchi Sea, the East-Siberian Sea, the Laptev Sea.

For Citation: *Egorov A.G.* Spatial location of ice edge in August – September in the Russia's eastern seas in early 21st century. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (1): 38–55. [In Russian]. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-1-38-55.

Received 11.13.2019 **Revised 01.21.2020** **Accepted 02.13.2020**

ВВЕДЕНИЕ

Положение кромки льдов в летний период очищения арктических морей является одной из базовых характеристик, описывающих состояние ледяного покрова в высоких широтах Земли [1, 2], которое определяет не только сложности проведения морских операций по трассам Северного морского пути, но и может служить надежным индикатором многолетних изменений, происходящих в природной среде Арктики [3]. В восточных морях России (Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском), расположенных между восточным побережьем Северной Земли и западным побережьем п-ова Аляска пространственное положение кромки льдов во второй половине летнего сезона (август – сентябрь) обычно принимает квазизональную ориентацию [4], что делает возможным количественный анализ положения кромки на секущих меридианах, расположенных к северу от северного побережья Сибири.

Происходящие в последние десятилетия изменения гидрометеорологических условий в высоких широтах по-разному проявляются в различных географических регионах [5, 6]; одной из областей наибольших изменений является именно Восточ-

ная Арктика и ее арктические моря, открытые к Арктическому бассейну и испытывающие влияние многолетних флуктуаций тихоокеанского Алеутского минимума [7].

При исследовании изменчивости ледовых условий в арктических морях в летний период обычно используют такой показатель, как ледовитость (в целом по морю или какой-либо его крупной части), который надежно характеризует общее количество льдов акватории [8, 9]. Однако потепление последнего времени привело к тому, что к концу летнего периода очищения, как правило, все пространство морей освобождается ото льдов и ледяной покров в северной полярной области наблюдается лишь на тех акваториях, которые находятся к северу от северной границы арктических морей [10, 11]. В этих условиях природная информативность ледовитости уменьшается, и, как представляется, корректнее использовать такой альтернативный показатель, который характеризовал бы не только ледовые условия непосредственно в арктических морях, но и к северу от их северной границы; именно такой характеристикой и является положение кромки льдов на меридиональных секущих, проходящих от евразийского берега к Северному полюсу.

Цель статьи — анализ пространственной и временной изменчивости положения кромки льдов в восточных арктических морях России (Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) в конце летнего периода (август – сентябрь) в течение 1981–2018 гг., а также оценка многолетних изменений, происходящих в течение первых двух десятилетий XXI в.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе положение кромки на конец августа и конец сентября снималось с ледовых карт, построенных в Арктическом и антарктическом НИИ, на меридиональных створах с шагом 10 градусов долготы от 100° в.д. до 160° з.д. Как показывает опыт режимной и прогностической работы, такая дискретность достаточна для воспроизведения основных региональных и локальных особенностей пространственного распределения льдов на завершающей стадии летнего очищения акватории [12].

При организации исследовательского архива были использованы два вида данных:

– для периода 1981–1996 гг.: бумажные карты ледовых условий с шагом в 1 декаду (10 суток), на которой представлены различные ледовые границы, в том числе кромка льдов в летний и осенний периоды, построенные в Центре ледовой и гидрометеорологической информации ААНИИ; основные источники информации — полярные станции, авиационная ледовая разведка, искусственные спутники Земли, морские суда;

– для периода 1997–2018 гг.: данные характеристик ледяного покрова из архива Мирового центра данных по морскому льду (МЦД МЛ ААНИИ); архив содержит еженедельные геопривязанные данные характеристик ледяного покрова по Арктике и арктическим морям; архив представлен в формате СИГРИД-3 (SIGRID-3); основные источники информации — искусственные спутники Земли, полярные станции, морские суда.

Всего на акватории арктических морей в Восточном секторе Арктики использовались 11 информационных меридиональных створов (от 100° в.д. до 160° з.д.). Ряд наблюдений, занесенный в архив, составляет период с 1981 по 2018 г., длина ряда — 38 лет. Временная протяженность исследуемого ряда наблюдений охватывает

как период относительно повышенной ледовитости в 1980–1990 гг., так и период пониженного количества льдов в течение 2000–2010 гг. Общее количество занесенных данных о пространственном положении кромки льдов — суммарно 836 единиц.

Опираясь на созданный массив данных, можно построить и анализировать любые карты пространственного положения кромки льдов в восточных арктических морях — среднемноголетние, экстремальные, типовые и др.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПОЛОЖЕНИЕ КРОМКИ ЛЬДОВ В ВОСТОЧНЫХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ В СРЕДНЕМНОГОЛЕТНЕМ РЕЖИМЕ (1981–2018 гг.)

При среднемноголетних условиях (1981–2018 гг.) пространственное положение кромки льдов представляет собой волнообразную синусоиду с двумя повышениями и двумя понижениями, квазизонально расположенную на азиатском шельфе (рис. 1).

В августе самое южное положение кромки отмечается в море Лаптевых на 120-м восточном меридиане (77,4° с.ш.) и в районе о. Врангеля на 180-м меридиане (71,6° с.ш.), а самое северное положение кромки отмечается к северу от Новосибирских островов на 140-м меридиане (78,0° с.ш.) и в Чукотском море на 170-м западном меридиане (73,3° с.ш.). При этом наблюдается характерный тренд, при котором, перемещаясь с запада на восток, средняя широта положения кромки постоянно уменьшается и составляет: в море Лаптевых 78,4° с.ш., в Восточно-Сибирском море 75,3° с.ш., в Чукотском море 72,7° с.ш., т.е. шаг от моря к морю составляет 2,6–3,1 градуса широты (табл. 1).

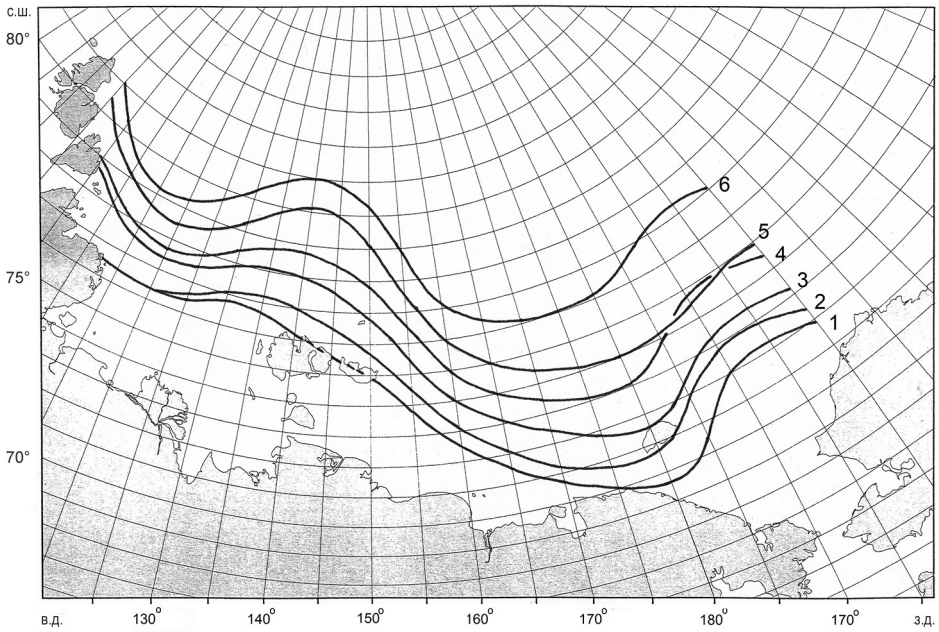

Рис. 1. Карта пространственного положения кромки льдов в конце августа (*1* — 1981–2001 гг., *3* — 1981–2018 гг., *5* — 2002–2018 гг.) и в конце сентября (*2* — 1981–2001 гг., *4* — 1981–2018 гг., *6* — 2002–2018 гг.)

Fig. 1. Location of ice edge in late August (*1* — 1981–2001, *3* — 1981–2018, *5* — 2002–2018) and late September (*2* — 1981–2001, *4* — 1981–2018, *6* — 2002–2018)

В сентябре общая конфигурация пространственного положения кромки похожа на августовскую. В это время самое южное положение кромки отмечается в море Лаптевых на 120-м восточном меридиане (77,7° с.ш.) и в районе о. Врангеля на 180-м меридиане (73,1° с.ш.), а самое северное положение кромки отмечается севернее Новосибирских островов на 140-м меридиане (78,7° с.ш.) и в Чукотском море на 170-м западном меридиане (74,8° с.ш.). При этом, перемещаясь с запада на восток, средняя широта положения кромки постоянно уменьшается и составляет: в море Лаптевых 78,8° с.ш., в Восточно-Сибирском море 76,2° с.ш., в Чукотском море 74,1° с.ш., т.е. шаг от моря к морю меньше, чем в августе, и составляет 2,1–2,6 градуса широты.

То есть расстояние между двумя южными понижениями кромки составляет около 60 градусов по меридиану, а расстояние между двумя северными повышениями кромки составляет около 50 градусов по меридиану, что примерно соответствует расстоянию в 1,5–2,0 тыс. км. Эти плавные изменения в зональном рисунке кромки льдов пространственно соответствуют крупномасштабным, разнонаправленным особенностям ледового режима: южное положение кромки наблюдается в районе отроговых ледяных массивов Арктического бассейна (Таймырский массив в море Лаптевых и Айонский массив в Восточно-Сибирском море), а северное положение кромки приурочено к меридианам Берингова пролива и Новосибирских островов.

Сравнение зонального положения кромки в сентябре и в августе позволяет определить, как активно продолжают развиваться процессы очищения акватории ото льдов на самом излете теплого сезона, т.е. в течение сентября. В среднем для всего восточного арктического пространства кромка льдов от августа к сентябрю продвигается к северу на 0,8 градуса широты, т.е. со средней скоростью примерно 3 километра в сутки. Однако очищение акватории ото льдов в сентябре пространственно крайне неоднородно. В Чукотском море наблюдаются наибольшие значения в сентябрьском продвижении кромки на север — в среднем за месяц около 1,4 градуса широты. Напротив, в море Лаптевых наблюдаются наименьшие значения в сентябрьском продвижении кромки на севере — в среднем за месяц около 0,3 градуса широты. Восточно-Сибирское море представляет собой промежуточный вариант, со средними значениями сентябрьского продвижения кромки около 0,9 градуса широты. Таким образом, интенсивность сентябрьского перемещения кромки с юга на север

Таблица 1

Среднемноголетнее значение и среднее квадратичное отклонение положения кромки льдов в августе и сентябре за 1981–2018 гг. на меридианах в восточных арктических морях

Table 1

Multiyear mean and standard deviation of the ice edge location at the meridians of the eastern Arctic seas in August and September from 1981 to 2018

Показатель	100° в.д.	110° в.д.	120° в.д.	130° в.д.	140° в.д.	150° в.д.	160° в.д.	170° в.д.	180° в.д.	170° з.д.	160° з.д.	Среднее
Август												
Среднее	80,2	78,2	77,4	77,9	78,0	76,8	74,1	72,5	71,6	73,3	73,2	75,7
с.к.о.	0,80	1,65	2,49	2,39	3,06	3,16	3,31	3,33	3,04	2,08	2,24	1,88
Сентябрь												
Среднее	80,5	78,4	77,7	78,5	78,7	77,8	74,9	73,5	73,1	74,8	74,5	76,6
с.к.о.	1,17	1,81	2,62	2,58	3,02	3,36	3,66	3,70	3,79	2,94	2,96	2,24

увеличивается при движении с запада на восток, и это различие между морями Лаптевых и Чукотским составляет в среднем 4–5 раз.

Среднее квадратичное отклонение показывает, на каких меридиональных створах наблюдается наибольший (и наименьший) размах в межгодовых изменениях широтного положения кромки льдов за период ледовых наблюдений. В августе наибольшие величины отмечаются в Восточно-Сибирском море между 140-м и 180-м меридианами (среднее значение с.к.о. составляет около 3,2 ед.), а наименьшие величины отмечаются в море Лаптевых (среднее значение с.к.о. составляет около 1,8 ед.); в Чукотском море с.к.о. ближе к уровню морю Лаптевых и составляет около 2,2 ед. В сентябре наблюдается заметное увеличение с.к.о. к востоку от 150-го меридиана, но общая картина распределения величин похожа на августовскую. В сентябре наибольшие величины отмечаются в Восточно-Сибирском море между 140-м и 180-м меридианами (среднее значение с.к.о. составляет около 3,5 ед.), а наименьшие величины отмечаются в море Лаптевых (среднее значение с.к.о. составляет около 2,0 ед.); в Чукотском море с.к.о. ближе к уровню Восточно-Сибирского моря и составляет около 3,0 ед.

КРОМКА ЛЬДОВ ПРИ ТЯЖЕЛЫХ (1981–2001 гг.) И ЛЕГКИХ (2002–2018 гг.) ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ В ВОСТОЧНЫХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ

Межгодовая изменчивость среднего положения кромки для всей суммарной восточной акватории от Северной Земли до Аляски показывает, что ряд наблюдений 1981–2018 гг. состоит из двух принципиально различающихся частей в зависимости от преобладающего знака аномалии ледового показателя; причем эта двусоставность характерна и для августа, и для сентября (рис. 2).

В августе в течение 1981–2001 гг. среднее положение кромки на суммарной акватории составило 74,4° с.ш., а в 18 случаях из 21 наблюдались отрицательные аномалии положения кромки со средним многолетним значением аномалии в –0,69 величины с.к.о. Напротив, в течение 2002–2018 гг. среднее положение кромки составило 77,3° с.ш., а в 16 случаях из 17 наблюдались положительные аномалии положения кромки со средним многолетним значением аномалии в +0,85 величины с.к.о. Разница между

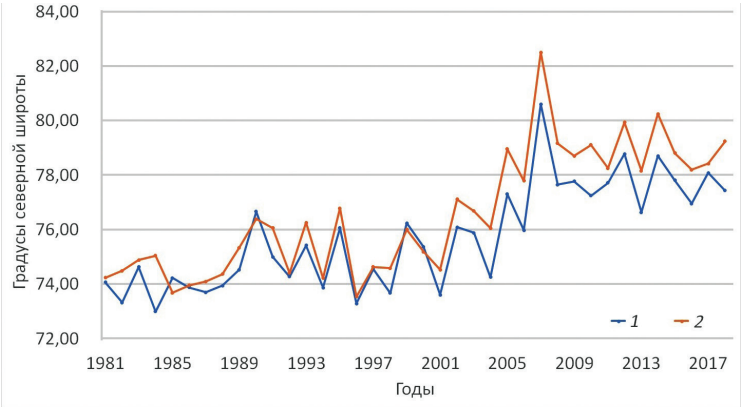

Рис. 2. Средняя широта положения кромки льдов на суммарной акватории восточных арктических морей в конце августа (*1*) и сентября (*2*) в течение 1981–2018 гг.

Fig. 2. Mean latitude of ice edge position at the total area of the eastern Arctic seas in late August (*1*) and late September (*2*) during 1981–2018

двумя средними многолетними состояниями кромки равняется 2,9 градуса широты или 1,54 величины с.к.о., а разница между экстремальными значениями в 1984 г. и 2007 г. составляет 7,6 градусов широты, или 4,04 величины с.к.о.

В сентябре в течение 1981–2001 гг. среднее положение кромки составило 74,9° с.ш., а в 20 случаях из 21 наблюдались отрицательные аномалии положения кромки со средним многолетним значением аномалии в –0,75 величины с.к.о. Напротив, в течение 2002–2018 гг. среднее положение кромки составило 78,7° с.ш., а в 16 случаях из 17 наблюдались положительные аномалии положения кромки со средним многолетним значением аномалии в +0,93 величины с.к.о. Разница между двумя средними многолетними состояния кромки равняется 3,8 градуса широты, или 1,68 величины с.к.о., а разница между экстремальными значениями в 1996 г. и 2007 г. составляет 9,0 градусов широты, или 4,00 величины с.к.о.

Отдельно отметим, что сентябрьская разница между значениями в экстремальные годы составляет около 9 градусов широты, т.е. в XXI в. по сравнению с двадцатым кромка между минимальным и максимальным положением на момент завершения летнего очищения акватории ото льдов в среднем для всей зональной полосы протяженностью в 100 градусов по меридиану сместилась к северу на расстояние около 1000 км.

Картированное представление кромки льдов в среднем за 1981–2001 гг. и в среднем за 2002–2018 гг. показывает основные пространственные изменения, происходящие в августе и в сентябре при переходе от природного режима XXI в. к режиму XXI в. (см. рис. 1). При сохранении общей квазисинусоидальной конфигурации кромка в целом сместилась в северном направлении; причем в сентябре больше, чем в августе. В августе среднее положение кромки составило: в 1981–2001 гг. 74,5° с.ш., а в 2002–2018 гг. 77,1° с.ш., т.е. кромка сместилась на север на 2,6° широты (или около 290 км). В сентябре среднее положение кромки составило: в 1981–2001 гг. 74,9° с.ш., а в 2002–2018 гг. 78,4° с.ш., т.е. кромка сместилась на север на 3,5° широты (или около 390 км).

Если в 1981–2001 гг. кромка в августе и сентябре проходила по северной периферии Новосибирских островов и через пролив Лонга к югу от о. Врангеля, то в 2002–2018 гг. кромка сместилась на север на 2–3° широты в море Лаптевых и на 4–5° широты — в морях Восточно-Сибирском и Чукотском.

Отдельный интерес представляет анализ той скорости, с которой произошел переход от прежнего, многолетнего состояния кромки в конце XX в. к новому, многолетнему состоянию кромки в XXI в. Наибольшее изменение ледовых показателей, как августа, так и сентября, приходится на временной период 2004–2007 гг. Так, в августе 2004 г. среднее положение кромки льдов в восточных арктических морях было 74,2° с.ш., а в 2007 г. — уже 80,6° с.ш.; за три года кромка поднялась к северу на 6,4° с.ш., или в среднем на 2,1° с.ш. в год (что соответствует расстоянию примерно в 230 км). На отдельных створах продвижение кромки на север было еще больше: для створа 170° в.д. положение кромки за три года изменилось с 70,7° с.ш. на 83,0° с.ш., т.е. скорость смещения кромки льдов составила 4,1° с.ш. в год (или около 450 км в год). Для сентября наблюдаются близкие к августовским значения.

Так, в сентябре 2004 г. среднее положение кромки льдов в восточных арктических морях было 76,0° с.ш., а в 2007 г. — уже 82,5° с.ш.; за три года кромка поднялась к северу на 6,5° с.ш., или в среднем на 2,2° с.ш. в год (что соответствует

расстоянию примерно в 240 км). На отдельных створах продвижение кромки на север было еще больше: для створа 170° в.д. положение кромки за три года изменилось с 73,0° с.ш. на 85,5° с.ш., т.е. скорость смещения кромки льдов составила 4,2° с.ш. в год (или около 460 км в год).

Таким образом, переход от одного климатического состояния к другому осуществился за относительно короткий временной промежуток продолжительностью примерно в 3 года (2004–2007 гг.). 2007 год был годом абсолютного максимума в продвижении кромки льдов на север. После 2007-го кромка опустилась к югу примерно на 3–4 градуса широты и в течение последнего десятилетия сохраняет определенное пространственное постоянство своего положения примерно в зональной полосе 78–80° с.ш. Отметим, что в сентябре положение кромки было примерно одинаковым в течение нескольких лет до и после 2007 г. и составляло в среднем за 2005–2006 гг. 78,4° с.ш., а в среднем за 2008–2018 гг. 78,9° с.ш.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ РАЗЛИЧИЯ В ИЗМЕНЕНИИ ПОЛОЖЕНИЯ КРОМКИ ЛЬДОВ К ЗАПАДУ И К ВОСТОКУ ОТ НОВОСИБИРСКИХ ОСТРОВОВ

Еще одна режимная особенность состоит в том, что интенсивность смещения кромки от августа к сентябрю существенно увеличилась в течение XXI в. по сравнению с XXI в.: в течение 1981–2001 гг. она составила в среднем для всех створов 0,4° широты, а в течение 2002–2018 гг. — уже 1,3° широты, т.е. смещение на север в сентябре увеличилось примерно в три раза. Но еще более важно, что это сентябрьское усиление смещения кромки в XXI в. различно в западной и восточной частях исследуемой акватории, граница между которыми проходит примерно по долготе о. Новая Сибирь.

В 1981–2001 гг. сентябрьское смещение кромки на север составило:

– к западу от о. Новая Сибирь (т.е. между меридианами 100° в.д. и 150° в.д.) в среднем около 0,3° широты;

– к востоку от о. Новая Сибирь (т.е. между меридианами 160° в.д. и 160° з.д.) в среднем около 0,6° широты;

– различие в западной и восточной частях шельфа составляет около 0,3° широты.

В 2002– 2018 гг. сентябрьское смещение кромки на север составило:

– к западу от о. Новая Сибирь (т.е. между меридианами 100° в.д. и 150° в.д.) в среднем около 0,8° широты;

– к востоку от о. Новая Сибирь (т.е. между меридианами 160° в.д. и 160° з.д.) в среднем около 1,9° широты;

– различие в западной и восточной частях шельфа составляет около 1,1° широты.

Другими словами, пространственная экспансия кромки на север в XXI в. была в несколько раз больше к востоку от меридиана Новосибирских островов, чем к западу от указанной границы, т.е. выделяются обширные по площади акватории с повышенной и пониженной интенсивностью изменения режима пространственного положения кромки льдов в XXI в. По этой причине вся зональная полоса восточных арктических морей между 100° в.д. и 160° з.д. может быть разделена на две части — западную и восточную — и многолетний анализ пространственного смещения кромки, соответственно, должен быть проведен раздельно для обеих акваторий.

Такой раздельный анализ показывает, что ведущая пространственная особенность смещения кромки на север в первые два десятилетия XXI в. заключается в неоднородности формирования положительных аномалий в западной и восточной частях суммарной восточной арктической акватории в течение 2000-х гг. и 2010-х гг. (рис. 3).

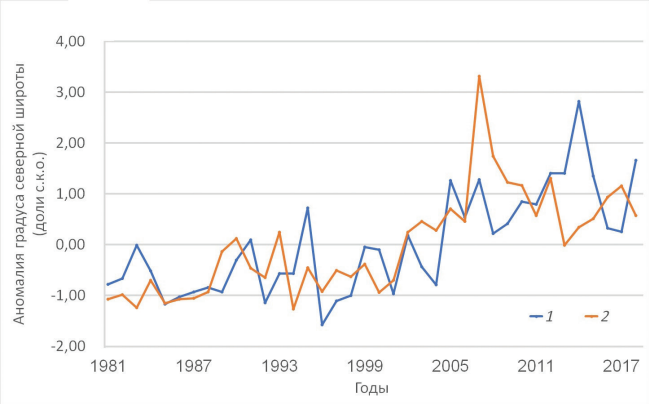

Рис. 3. Средняя аномалия широты положения кромки льдов (доли с.к.о.) к западу (*1*) и к востоку (*2*) от Новосибирских островов в конце сентября

Fig. 3. Mean anomaly of the latitude of ice edge position (in fractions of the standard deviation) to the west (*1*) and to the east (*2*) of the New Siberia Archipelago in late September

1. В течение 2002–2010 гг. в 7 случаях из 9 наибольшие положительные аномалии зонального положения кромки наблюдались в восточном фрагменте суммарной акватории; среднее значение аномалии для створов 100–150° в.д. составляет 0,39 величины с.к.о., а для створов 160° в.д.–160° з.д. среднее значение аномалии составляет 1,06 величины с.к.о. (т.е. почти в три раза больше); в 2007 г. зафиксировано экстремально северное положение кромки к востоку от Новосибирских островов (среднее значение на восточных створах составляет 84,0° с.ш.).

2. В течение 2011–2018 гг. в 6 случаях из 8 наибольшие положительные аномалии зонального положения кромки наблюдаются уже в западном фрагменте азиатского шельфа; среднее значение аномалии для створов 100–150° в.д. составляет 1,25 величины с.к.о., а для створов 160° в.д.–160° з.д. среднее значение аномалии составляет 0,67 величины с.к.о. (т.е. примерно в 2 раза меньше); в 2014 г. зафиксировано экстремально северное положение кромки к западу от Новосибирских островов (среднее значение на западных створах составляет 84,5° с.ш.).

3. Переход от периода преобладания наибольших изменений на востоке к периоду преобладания наибольших изменений на западе произошел в самом начале 2010-х гг. (примерно в 2011 г.), так что годы с двумя наибольшими аномалиями в 2007 г. на востоке и 2014 г. на западе находятся в пространственно различающихся временных периодах.

Таким образом, экспансия в северном направлении кромки льдов в восточных арктических морях, наблюдаемая в первые два десятилетия XXI в., представляет собой единое природное явление, состоящее из двух взаимосвязанных частей. Исходным моментом этой эволюции является период 1981–2001 гг., когда в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском в конце летнего сезона наблюдалось примерно такое положение кромки, которое было характерным для большей части XX в. (рис. 4). В течение 2000-х гг. ситуация изменилась так, что кромка стала достаточно быстро продвигаться к северу, прежде всего в восточной части акватории, к востоку от Новосибирских островов. В течение 2002–2010 гг. средняя сентябрьская аномалия положения кромки для створов 160° в.д.–160° з.д. (т.е. большая

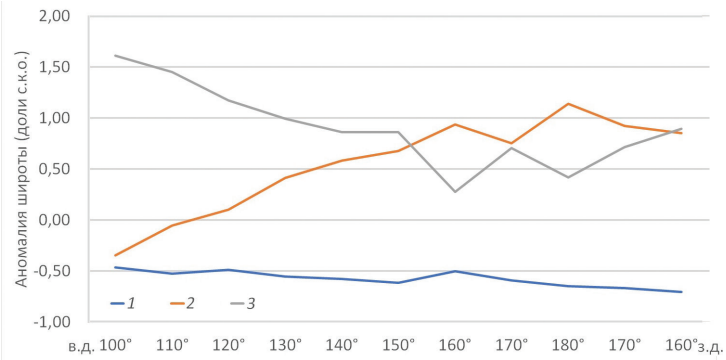

Рис. 4. Среднее положение кромки льдов в сентябре по створам в восточных арктических морях (*1* — период 1981–2001 гг., *2* — период 2002–2010 гг., *3* — период 2011–2018 гг.)

Fig. 4. Mean position of ice edge at the meridians in the eastern Arctic seas (*1* — 1981–2001, *2* — 2002–2010, *3* — 2011–2018)

часть Восточно-Сибирского моря и Чукотское море) составила 0,92 величины с.к.о.; к западу от Новосибирских о-вов, при перемещении с востока на запад от одного меридионального створа к другому, аномалия кромки постепенно уменьшалась, и на акватории моря Лаптевых и в западной части Восточно-Сибирского моря (в среднем для створов 100–150° в.д.) аномалия кромки составила только 0,23 величины с.к.о. В течение 2010-х гг. началась вторая фаза многолетнего природного процесса, когда смещение кромки на север, ранее начавшись на востоке, охватило и западную часть акватории к западу от меридиана о. Новая Сибирь. В течение 2011–2018 гг. наибольшие значения аномалии сентябрьского положения кромки наблюдались уже в море Лаптевых (средняя аномалия для створов 100–150° в.д. составила 1,16 величины с.к.о.), и при движении с запада на восток эти аномалии уменьшились примерно в 2 раза (средняя аномалия в Восточно-Сибирском и Чукотском морях для створов 160° в.д.–160° з.д. составила 0,60 величины с.к.о.).

По разные стороны от меридиана о. Новая Сибирь наблюдаются разные временные тенденции в многолетнем изменении широтного положения кромки льдов. В западной части акватории от периода 1981–2001 гг. к периоду 2002–2010 гг. и от периода 2002–2010 гг. к периоду 2011– 2018 гг. наблюдается одна и та же тенденция: средняя кромка льдов смещается с юга на север в течение 2002–2010 гг. на 2,2° с.ш. (от 77,2° с.ш. до 79,4° с.ш.) и в течение 2011–2018 г. — еще на 1,8° с.ш. (от 79,4° с.ш. до 81,2° с.ш.). Напротив, в восточной части акватории от периода 1981–2001 гг. к периоду 2002–2010 гг. и от периода 2002–2010 гг. к периоду 2011–2018 гг. тенденции изменений противоположны: средняя кромка льдов смещается с юга на север в течение 2002–2010 гг. на 5,2° с.ш. (от 72,1° с.ш. до 77,3° с.ш.), а в течение 2011–2018 г. она смещается с севера на юг на 1,1° с.ш. (от 77,3° с.ш. до 76,2° с.ш.).

ОДНОРОДНЫЕ ПЕРИОДЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ КРОМКИ ЛЬДОВ В ВОСТОЧНЫХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ В 1981–2018 гг.

Многолетняя изменчивость положения кромки льдов в восточных арктических морях показывает сильную зависимость от двух показателей: во-первых, количественного — от общей аномальности широтного положения кромки в среднем для всей акватории между 100° в.д. и 160° з.д., и, во-вторых, пространственного — от

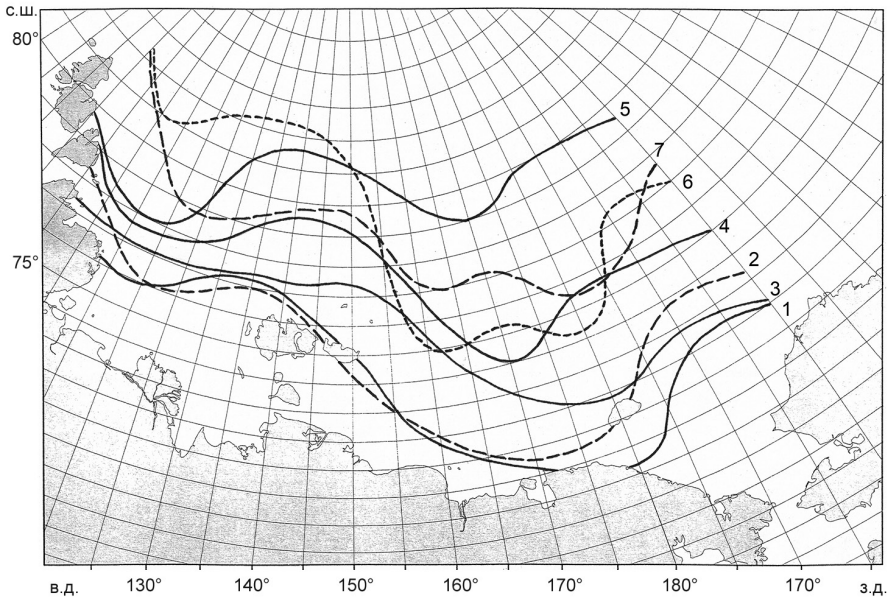

Рис. 5. Карта пространственного положения кромки льдов в конце сентября в течение однородных периодов (*1* — 1981–1989 гг., *2* — 1989–1995 гг. *3* — 1996–2001 гг., *4* — 2002–2006 гг., *5* — 2007–2010 гг., *6* — 2011–2015 гг., *7* — 2016–2018 гг.)

Fig. 5. Ice edge position in late September within the uniform periods (*1* — 1981–1989, *2* — 1989–1995, *3* — 1996–2001, *4* — 2002–2006, *5* — 2007–2010, *6* — 2011–2015, *7* — 2016–2018)

различий в режиме кромки в западной и восточной части исследуемой акватории, по разные стороны от меридиана о. Новая Сибирь. Опираясь на эти критерии, ряд наблюдений 1981–2018 гг. может быть разделен на несколько условно однородных периодов, в течение каждого из которых наблюдаются схожие особенности количественного и пространственного положения кромки льдов. Всего выделяются 7 периодов (табл. 2), три — для интервала 1981–2001 гг. с преимущественно южным положением кромки и четыре — для интервала 2002–2018 гг. с северным положением кромки льдов в августе и сентябре (рис. 5).

1. Период 1981–1988 гг. В течение всех восьми лет на исследуемой акватории наблюдались отрицательные аномалии широтного положения кромки льдов, значения которой изменялись от –0,68 до –1,29 величины с.к.о. Аномально южное положение кромки в конце летнего периода примерно соответствовало тому фону ледовых условий, который наблюдался в арктических морях России во второй половине XX в. и сформировался после потепления 1930–1940-х гг. В восточной части исследуемой акватории отрицательные аномалии положения кромки были больше, чем в западной. В сентябре кромка отходила от восточного берега п-ова Таймыр, пересекала Новосибирские острова и блокировала побережье Чукотки на участке от мыса Шелагский до мыса Шмидта.

2. Период 1989–1995 гг. В 6 случаях из 7 наблюдалась также отрицательная аномалия широтного положения кромки льдов, однако степень аномальности уменьшилась примерно вдвое; только дважды (в 1992 г. и в 1994 г.) величина отрицательной аномалии приближалась к среднему уровню периода 1981–1988 гг. В целом ледовые

Таблица 2

Среднее положение кромки льдов в сентябре (аномалии в долях с.к.о.) по меридиональным створам в морях Лаптевых (ЧМ), Восточно-Сибирском (ВСМ) и Чукотском (ЧМ)

Table 2

Mean ice edge location (anomalies in fractions of the standard deviation) in September at the meridians of the Laptev, East-Siberian and Chukchi Seas

Период, годы	МЛ 100–130° в.д.	ВСМ 140–170° в.д.	ЧМ 180–160° з.д.	Запад 100–150° в.д.	Восток 160°в.д.–160°з.д.	МЛ+ВСМ+ЧМ 100°в.д. – 160°з.д.
1981–1988	–0,65	–0,94	–0,98	–0,74	–1,03	–1,00
1989–1995	–0,45	–0,12	–0,81	–0,39	–0,37	–0,42
1996–2001	–0,61	–0,97	–0,49	–0,80	–0,68	–0,82
2002–2006	–0,05	+0,41	+0,42	+0,15	+0,36	+0,42
2007–2010	+0,32	+1,46	+1,86	+0,69	+1,86	+1,47
2011–2015	+1,69	+0,77	+0,67	+1,55	+0,54	+1,12
2016–2018	+0,86	+0,79	+0,76	+0,74	+0,88	+0,91

условия стали заметно легче: по сравнению с предыдущим периодом наблюдалась одна важная особенность — в центральной части Восточно-Сибирского моря кромка сместилась в северном направлении на 3–4 градуса широты, а в остальных морях — Лаптевых и Чукотском — осталась почти без изменений (или эти изменения совсем незначительны). В пространственном отношении кромка к концу сентября освобождала наиболее крупные острова и располагалась примерно на 1–2 градуса широты севернее Новосибирских островов и примерно на 0,5 градуса широты севернее о. Врангеля. В среднем для всей исследуемой акватории кромка сместилась на север на 1,3 градуса широты (по сравнению с периодом 1981–1988 гг.).

3. Период 1996–2001 гг. Ледовые условия вновь ухудшились, во всех шести годах наблюдалась отрицательная аномалия широтного положения кромки. По сравнению с предыдущим периодом на большей части акватории кромка сместилась в южном направлении и примерно вернулась к состоянию периода 1981–1988 гг. В целом эти два периода — 1981–1988 гг. и 1996–2001 гг. — очень схожи, разница среднего положения кромки для всех створов составляет только 0,4 градуса широты (и увеличивается лишь в Чукотском море до 1,5 градуса широты). Наибольшее ухудшение ледовых условий, т.е. смещение кромки в южном направлении — по сравнению с периодом 1989–1995 гг. — произошло в Восточно-Сибирском море (до 3,0–3,5 градусов широты). В результате граница льдов вновь стала проходить по Новосибирским островам и о. Врангеля.

4. Период 2002–2006 гг. Впервые за весь имеющийся ряд наблюдений устойчиво отрицательные аномалии положения кромки льдов меняются на устойчиво положительные аномалии, которые наблюдались в четырех случаях из пяти лет; однако величины этих положительных аномалий еще сравнительно невелики. Именно в течение этого 5-летнего периода начинается однонаправленная и крупномасштабная трансформация в пространственном положении кромки льдов и ее устойчивое смещение в северном направлении. По сравнению с предыдущим периодом кромка сместилась на север в среднем на 2,6 градуса широты; на отдельных створах (150° в.д., 160° в.д., 180° в.д.) — до 4,5–5,0 градусов широты (т.е. примерно на 500–550 км).

Важнейшая пространственная особенность состоит в том, что наибольшее смещение кромки происходит к востоку от Новосибирских островов, т.е. на акватории Восточно-Сибирского и Чукотского морей (среднее смещение на 3,4 градуса широты), а в море Лаптевых изменения в несколько раз меньше (среднее смещение на 1,1 градус широты). В пространственном отношении кромка льдов поднялась выше Новосибирских островов и о. Врангеля примерно на 4 градуса широты.

5. Период 2007–2010 гг. Тенденции, сформировавшиеся в предыдущий период, получили последовательное развитие, и в течение всех четырех лет наблюдалась положительная аномалия положения кромки, причем ее величина — по сравнению с предыдущим периодом — увеличилась в 4–5 раз. По сравнению с периодом 2002–2006 гг. кромка сместилась на север еще в среднем на 2,6 градуса широты; на отдельных створах (170° в.д. – 170° з.д.) — до 4,5–5,0 градусов широты. Важнейшая пространственная особенность повторяет тенденцию предыдущего периода и заключается в том, что наибольшее смещение кромки все так же наблюдалось в Восточно-Сибирском и Чукотском морях (среднее смещение кромки на 4,0 градуса широты), а в море Лаптевых изменения были примерно в 3–4 раза меньше (среднее смещение кромки на 1,1 градус широты). В 2007 г. был зафиксирован абсолютный максимум северного продвижения кромки, за счет, прежде всего, восточной части акватории (в Восточно-Сибирском море аномалия составила +3,13 величины с.к.о., в Чукотском море +2,94 величины с.к.о., а в море Лаптевых — только +0,28 величины с.к.о.). В пространственном отношении кромка льдов в среднем за период достигла на меридиане о. Врангеля 80-й параллели, а на меридиане Новосибирских островов — даже 81-й. В среднем для всей восточной арктической зональной полосы этот период был кульминацией северной экспансии кромки льдов.

6. Период 2011–2015 гг. В течение всех пяти лет наблюдались положительные аномалии положения кромки, однако — по сравнению с предыдущим периодом — их величины уменьшились в среднем примерно на 1/4 (от 1,47 до 1,12 величины с.к.о.). Впервые с периода 1996–2001 гг. было отмечено возвратное движение осредненной для всех створов кромки льдов, которая сместилась в южном направлении — по сравнению с периодом 2007–2010 гг. — в среднем на 0,8 градуса широты; на отдельных створах (160° в.д. и 180° в.д.) — на более 5,0 градусов широты. Важнейшая пространственная особенность, не наблюдавшаяся раньше, заключалась в перемещении области наибольших положительных аномалий с восточной части исследуемой акватории на ее западную часть. Если в течение периодов 2002–2006 гг. и 2007–2010 гг. наибольшие аномалии положения кромки отмечались в Чукотском море, то в течение периода 2011–2015 гг. они наблюдались уже в море Лаптевых, где кромка льдов — по сравнению с предыдущим периодом — поднялась к северу в среднем на 2,6 градуса широты (а на створе 120° в.д. — даже на 3,7 градуса широты). Другая пространственная особенность состояла в том, что смещение кромки на юг в восточной части акватории наблюдалось именно на тех акваториях, где в течение двух предыдущих периодов происходило наиболее активное смещение кромки в противоположном направлении, на север; на совместной акватории восточной части Восточно-Сибирского моря и Чукотского моря кромка в среднем опустилась к югу на 3,9 градуса широты по сравнению в периодом 2007–2010 гг. В 2014 г. был зафиксирован второй по рейтингу максимум северного продвижения кромки, за счет, прежде всего, западной части акватории (в море Лаптевых аномалия составила +2,67

величины с.к.о., в Восточно-Сибирском море +1,15 величины с.к.о., а в Чукотском море только +0,80 величины с.к.о.). В пространственном отношении кромка льдов в среднем за период в море Лаптевых поднялась на север до 82-й параллели, а в Восточно-Сибирском море опустилась на юг до 75-й параллели.

7. Период 2016–2018 гг. Текущее трехлетие еще не оформилось в законченный временной интервал, и он, возможно, продлится еще несколько лет. В течение всех трех уже истекших лет наблюдались положительные аномалии положения кромки, однако их величина уменьшилась: по сравнению с периодом 2007–2010 гг. — примерно на 40 %, а по сравнению с периодом 2011–2015 гг. — примерно на 20 %. Как следствие, в течение текущего периода продолжает развиваться тенденция, оформившаяся в предыдущий период, а именно: движение кромки в южном направлении, которая в среднем для всех створов сместилась к югу на 1,3 градуса широты по сравнению с периодом 2007–2010 гг. и на 0,5 градуса широты по сравнению с периодом 2011–2015 гг. По сравнению с предыдущим периодом наибольшее смещение кромки на юг (около 3 градусов широты) наблюдалось на западе исследуемой акватории, в центральной части моря Лаптевых на створах 120–130° в.д. Еще одной важной особенностью является отсутствие сильной неоднородности в пространственном расположении положительных аномалий широтного положения кромки. Если в 2007–2010 гг. наибольшие аномалии были локализованы к востоку от Новосибирских островов, а в 2011–2015 гг. — к западу от них, то в течение 2016–2018 гг. величина аномалий во всех трех арктических морях примерно одинакова и составляет всего лишь +0,76...+0,86 величины с.к.о. В пространственном отношении кромка льдов спустилась к югу в море Лаптевых до 79-й параллели, а в Восточно-Сибирском море — до 76-й параллели.

Сравнительный анализ режима кромки льдов в однородных периодах позволяет уточнить некоторые особенности многолетней ледовой изменчивости в конце XX и начале XXI в.

1. Несмотря на то, что активный этап изменения положения кромки начался в 2002–2006 гг., все-таки и в XX в. уже наблюдались некоторые предварительные признаки будущих изменений. Так, в течение периода 1989–1995 гг. произошли первые заметные изменения режима кромки в Восточно-Сибирском море, которые, однако, не получили пространственного развития на соседние моря (Лаптевых и Чукотское). Видимо, именно локальность этого северного смещения кромки, ограниченного пространством только между Новосибирскими островами и о. Врангеля, и не позволила ему трансформироваться в более крупномасштабное и по пространству, и по времени, и по значимости природное явление. В некотором смысле период 1989–1995 гг. был «предтечей» или «фальстартом» тех радикальных изменений, которые сначала начались, а затем и полностью реализовались в восточных арктических морях через несколько лет, уже в XXI в.

2. Крупномасштабное изменение положения кромки льдов в конце летнего периода, которое произошло в 2000–2010-е гг., представляет собой природное колебание по типу «ледовой волны». Это ледовое явление образовалось в Чукотском море в 2002–2006 гг., вовлекло в орбиту своего влияния восточную часть Восточно-Сибирского моря и достаточно быстро в виде «гребня волны» продвинулось на север до 80–82-й широты, выйдя за пределы северной границы восточных арктических морей. После этого, достигнув пространственного максимума в 2007–2010 гг., гра-

ница льдов в восточной части исследуемой акватории оказалась в фазе волнового обратного движения с севера на юг. Но одновременно к западу от Новосибирских о-вов в волновое движение включилась акватория моря Лаптевых, где кромка льдов, на гребне продвижения, быстро достигла широты северной оконечности Северной Земли; также достигнув пространственного максимума, но позднее, уже в 2011–2015 гг., граница льдов и в западной части исследуемой акватории волнообразно устремилась с севера на юг. В результате и в восточной, и в западной части восточных арктических морей в течение 2002–2015 гг. произошли типологически схожие, взаимосвязанные волнообразные колебания в положении кромки льдов сначала с юга на север, а затем с севера на юг. Некоторый единый природный процесс, возникнув, получил полное развитие и закончился (или, возможно, временно приостановился), так что в 2016–2018 гг. «волнение» в колебаниях кромки сравнительно успокоилось.

3. Пространственные и временные особенности в многолетнем режиме кромки льдов, полученные при анализе ледовых условий в однородных периодах, позволяют составить некоторые представления о возможном будущем состоянии характеристик ледяного покрова. Если предположить, что после 2007–2010 гг. началось устойчивое и последовательное возвратное движение кромки с севера на юг, и учесть скорость уменьшения положительных аномалий положения кромки в течение 2011–2015 гг. и 2016–2018 гг., то следует ожидать, что в середине — второй половине 2020-х гг. среднее положение кромки льдов по створам между Северной Землей и Аляской будет примерно соответствовать уровню периода 2002–2006 гг. То есть по сравнению с текущим периодом 2016–2018 гг. в течение ближайших десяти лет прогнозируется генеральное пространственное смещение кромки льдов в южном направлении примерно на 1,5 градуса широты.

Понятно, что пространственные изменения летнего положения льдов (как от периода южного положения кромки в 1981–2001 гг. к периоду ее северного положения в 2002–2018 гг., так и различия режима кромки в 2000-х и 2010-х гг. к западу и востоку от Новосибирских островов) соответствуют общим особенностям более крупномасштабных многолетних колебаний состояния ледяного покрова в арктических морях России и в целом в Арктике, которые, в свою очередь, имеют непосредственной причиной изменения атмосферной циркуляции в умеренных и северных широтах Северного полушария Земли [2, 10, 11]. Многолетняя волновая изменчивость атмосферной циркуляции и приземного поля давления воздуха вызывает целый спектр природных последствий [13], одним из которых являются соответствующие трансформации в состоянии характеристик ледяного покрова в конце летнего и в начале осеннего сезонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пространственное положение кромки льдов в конце летнего сезона является информативным и объективным показателем, характеризующим ледовые условия не только на акватории восточных арктических морей России (Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского), но и смежных областей Арктического бассейна, где в начале XXI в. происходят радикальные изменения в состоянии природной среды.

Межгодовая изменчивость среднего положения кромки для всей суммарной восточной акватории от Северной Земли до Аляски (между меридианами 100° в.д. и 160° з.д.) показывает, что ряд наблюдений 1981–2018 гг. состоит из двух принципиально различающихся частей: 1981–2001 гг. с устойчиво южным положением

кромки и 2002–2018 гг. с устойчиво северным положением кромки в августе – сентябре. При этом разница между двумя средними многолетними состояниями кромки составляет около 3,8 градуса широты, а разница между экстремальными значениями в 1996 г. и 2007 г. составляет около 9,0 градусов широты, т.е. при формировании экстремальной кромки в XXI в. граница морских льдов сместилась (относительно XX в.) в северном направлении примерно на 1000 км (в среднем для всей зональной полосы протяженностью в 100 градусов по меридиану). Переход от одного многолетнего состояния к другому произошел сравнительно быстро в течение 2004–2007 гг., при этом средняя скорость перемещения кромки льдов составила 200–250 км в год (в среднем для всех створов) и около 450 км в год (для отдельных створов).

Ведущая пространственная особенность смещения кромки на север в XXI в. заключается в неоднородности формирования ее положительных аномалий в западной и восточной частях суммарной восточной арктической акватории (граница — меридиан острова Новая Сибирь) в течение 2000-х гг. и 2010-х гг. В течение 2002–2010 гг. наибольшие положительные аномалии зонального положения кромки наблюдались в восточном фрагменте суммарной акватории, и в 2007 г. было зафиксировано экстремально северное положение кромки к востоку от Новосибирских о-вов (среднее значение на восточных створах составило 84,0° с.ш.). Напротив, в течение 2011–2018 гг. наибольшие положительные аномалии зонального положения кромки наблюдались уже в западном фрагменте суммарной акватории, и в 2014 г. было зафиксировано экстремально северное положение кромки к западу от Новосибирских островов (среднее значение на западных створах составляет 84,5° с.ш.).

Многолетняя экспансия в северном направлении кромки льдов в восточных арктических морях, наблюдаемая в первые два десятилетия XXI в., представляет собой единое природное явление, состоящее из двух взаимосвязанных частей. В течение 2000-х гг. кромка достаточно быстро продвигалась к северу, прежде всего в восточной части акватории, к востоку от Новосибирских островов. Затем в течение 2010-х гг. началась вторая фаза многолетнего природного процесса, когда смещение кромки на север охватило и западную часть акватории к западу от меридиана о. Новая Сибирь.

В результате многолетняя изменчивость положения кромки льдов в восточных арктических морях показывает сильную зависимость от двух показателей: во-первых, количественного — от общей аномальности широтного положения кромки в среднем для всей акватории между 100° в.д. и 160° з.д., и, во-вторых, пространственного — от различий в режиме кромки в западной и восточной частях исследуемой акватории, по разные стороны от меридиана о. Новая Сибирь. С учетом этих двух критериев выделено несколько условно однородных периодов, в течение каждого из которых наблюдаются схожие особенности количественного и пространственного положения кромки льдов.

В течение 1981–2001 гг. с устойчиво южным положением кромки выделено три однородных периода: 1981–1988 гг., 1989–1995 гг., 1996–2001 гг. В течение 2002–2018 гг. с устойчиво северным положением кромки выделено четыре однородных периода: 2002–2006 гг., 2007–2010 гг., 2011–2015 гг., 2016–2018 гг. (еще не закончился).

Таким образом, в восточной и в западной частях восточных арктических морей в течение 2002–2015 гг. произошли типологически схожие, взаимосвязанные волнообразные колебания в положении кромки льдов сначала с юга на север, а затем с севера на юг. Некоторый единый природный процесс, возникнув, получил

полное развитие и закончился (или, возможно, временно приостановился), так что в 2016–2018 гг. «волнение» в колебаниях кромки сравнительно успокоилось. Ожидается, что в течение ближайших десяти лет продолжится пространственное смещение кромки льдов в южном направлении примерно на 1,5 градуса широты, так что к концу 2020-х гг. среднее положение кромки льдов по створам между Северной Землей и Аляской будет примерно соответствовать уровню периода 2002–2006 гг.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Статья подготовлена по результатам проектов «Исследование гидрометеорологических процессов в Мировом океане, морях и устьях рек России, Арктике и Антарктике» ЦНТП Росгидромета.

Competing interests. The author declares that he has no competing interests

Funding. The article was prepared based on the results of the projects “Study of hydrometeorological processes in the world ocean, seas and estuaries of Russia, Arctic and Antarctic” of the Roshydromet Targeted Scientific and Technical Program (TSTP).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Океанография и морской лед. М.: Paulsen, 2011. 432 с.

2. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

3. *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.

4. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей азиатской части России. Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.

5. *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.

6. *Шалина Е.В., Бобылев Л.П.* Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 28–41.

7. *Гудкович З.М., Кириллов А.А., Ковалев Е.Г., Сметанникова А.В., Спичкин В.А.* Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 348 с.

8. *Визе В.Ю.* Основы долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей // Труды АНИИ. 1944. Т. 190. 273 с.

9. *Горбунов Ю.А., Карелин И.Д., Кузнецов И.М., Лосев С.М., Соколов А.Л.* Основы физико-статистических методов ледовых прогнозов и расчетов для арктических морей заблаговременностью до 30 суток. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 288 с.

10. *Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е.* Изменения климата Арктики при глобальном потеплении // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 1 (103). С. 33–41.

11. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Науч. рук. В.М. Катцов, С.М. Семенов. М.: Росгидромет, 2014. 1005 с.

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

13. *Ivanova N., Johannessen O.M., Pedersen L.T., Tonboe R.T.* Retrieval of Arctic sea ice parameters by satellite passive microwave sensors: A comparison of eleven sea ice concentration algorithms // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2014. V. 52 (11). P. 7233–7246.

REFERENCES

1. *Okeanografia i morskoi led.* Oceanography and sea ice. M.: Paulsen, 2011: 432 p. [In Russian].

2. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1535 p.

3. *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 okeana*. Proc. of the Russian Academy of Sciences. Physics of Atmosphere and Ocean. 2012, 48, 4: 403–421. [In Russian].

4. *Dumanskaia I.O. Ledovye usloviia morei aziatskoi chasti Rossii.* Ice conditions of the seas of the Asian part of Russia. Obninsk: IG-SOTsIN, 2017: 640 p. [In Russian].

5. *Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolianitskii V.M*. Climatic changes of ice conditions in the Arctic seas of the Euroasian shelf. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Problems of Arctic and Antarctic. 2007, 75: 149–160. [In Russian].

6. *Shalina E.V., Bobylev L.P*. Change of ice conditions in the Arctic according to satellite observations. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa.* Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2017, 14, 6: 28–41. [In Russian].

7. *Gudkovich Z.M., Kirillov A.A., Kovalev E.G., Smetannikova A.V., Spichkin V.A. Osnovy metodiki dolgosrochnich ledovich prognozov dlja arkticheskich morej.* Frequency of occurrence of large anomalies of the dates of stable ice formation in the Arctic seas. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972: 348 p. [In Russian].

8. *Wiese V.Yu. Osnovy dolgosrochnykh ledovykh prognozov*. Fundamentals of long-term ice forecasts. *Trudy ANII*. Proceedings of the ANII, 1944: 273 p. [In Russian].

9. *Gorbunov Yu.A., Karelin I.D., Kuznetsov I.M., Losev S.M., Sokolov A.L. Osnovy fiziko-statisticheskich metodov ledovich prognozov i raschetov dlja arkticheskich morej.* Basis of the physical-statistical methodology of ice forecasts and simulations for the Arctic seas with advance period up to 30 days. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983: 288 p. [In Russian].

10. *Alekseev G.V., Radionov V.F. Aleksandrov E.I.,Ivanov N.E., Kharlanenkova N.E*. Arctic climate change under global warming. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2015, 1 (103): 33–41. [In Russian].

11. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniiakh klimata i ikh posledstviiakh na territorii Rossiiskoi Federatsii.* Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation. Ed. V.M. Kattsov, S.M. Semenov. Moscow: Roshydromet, 2014: 1005 p. [In Russian].

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

13. *Ivanova N., Johannessen O.M., Pedersen L.T., Tonboe R.T.* Retrieval of Arctic sea ice parameters by satellite passive microwave sensors: A comparison of eleven sea ice concentration algorithms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2014, 52 (11): 7233–7246.