

Морские, речные и озёрные льды

УДК 551.326.1/.2(268.53/.56)

doi: 10.31857/S2076673421010075

Летняя кромка льдов и осенние сроки устойчивого ледообразования в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском в 1981–2018 гг.

© 2021 г. А.Г. Егоров

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
ego@aari.ru

Positions of the summer ice edge and autumn dates of stable ice formation in the Laptev, East-Siberian and Chukchi seas in 1981–2018

A.G. Egorov

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia
ego@aari.ru

Received January 21, 2020 / Revised March 31, 2020 / Accepted December 22, 2020

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

Summary

The spatial and temporal variability of ice edge position at the end of the summer period, the dates of the beginning of stable ice formation in early autumn in the Russia's Eastern Arctic seas (Laptev, East-Siberian, and Chukchi) during 1981–2018 together with climate changes in the 21st century are analyzed. The analysis of summer and autumn ice characteristics shows certain common features occurring for many years: since the beginning of the 21st century, ice conditions have significantly improved, which is due to the more Northern position of the ice border in August–September and later dates for the beginning of stable ice formation in September–October. On average for the period 2002–2018, the ice edge at the end of the period of clearance from ice shifted (as compared to 1981–2001) in a northerly direction by about 400–500 km. Observations did show that in 2003–2018, the beginning of stable ice formation in the autumn season (as compared to 1981–2002) occurred later by about three weeks. The maximum northward shift of the ice edge was first observed (since 2002) on the aquatory to the East of the New Siberian Islands, and then (since 2011) – to the West of them. The greatest anomalies of late dates (onset) of ice formation were first observed (since 2003) in the Chukchi Sea, then (since 2008) – in the Laptev Sea, and later (since 2014) – again in the Chukchi Sea. Long-term changes in the ice conditions occur according to the similar scenario: first, an anomaly of the latitudinal position of the edge or the date of the ice formation beginning was formed in the Eastern part of the studied aquatory, and then this anomaly shifted from East to West. At the same time, the anomaly diminishes in the East that makes it possible to interpret the observed natural changes as fluctuations of the «ice wave» type. Taking into account the wave features of changes in summer and autumn ice indicators, we can assume that in the 2020s we should expect a similar continuation of natural fluctuations in changes in ice conditions, which will be accompanied by a spatial shift of the ice edge in the South direction and relatively earlier dates for the beginning of ice formation.

Citation: Egorov A.G. Position of the summer ice edge and autumn dates of stable ice formation in the Laptev, East-Siberian and Chukchi seas in 1981–2018. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2021. 61 (1): 117–127. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421010075.

Поступила 21 января 2020 г. / После доработки 31 марта 2020 г. / Принята к печати 22 декабря 2020 г.

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

По сравнению с 1980–90-ми годами с начала 2000-х годов в восточных арктических морях России происходят кардинальные изменения, связанные с более северным положением кромки льдов и более поздними сроками начала ледообразования. Многолетние изменения летних и осенних ледовых условий в XXI в. происходят по типу волновых колебаний, при которых область наибольших ледовых аномалий постепенно смещается из Чукотского моря в море Лаптевых. Предполагается, что в 2020-х годах (по сравнению с 2000–20-ми годами) следует ожидать более южного пространственного положения кромки льдов и более ранних дат начала ледообразования.

Введение

Происходящие в XXI в. в Арктике и арктических морях изменения в состоянии природной среды затронули практически все составляющие гидрометеорологических условий [1, 2]. Особенно радикальны тенденции по деградации ледяного покрова — как его толщины зимой, так и пространственного распространения летом [3, 4]. Исключительно важен (и в климатическом, и в прикладном отношении) хронологический период конца летнего сезона и начала осеннего сезона, когда, с одной стороны, наблюдается сезонный пик очищения акватории ото льда, а с другой, начинаются процессы образования новых молодых льдов [5, 6]. Хронологическая граница летнего и осеннего сезонов — важнейший информационный период формирования наиболее значимых природных изменений [7, 8]. Однако более подробные — региональные и локальные — особенности формирования позднелетних и раннеосенних ледовых условий на акватории арктических морей России до сих пор исследованы недостаточно.

Географический объект настоящего исследования — акватория восточных арктических морей России (Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского) общей площадью около 2,2 млн км². Она характеризуется определённым единством природных особенностей: открытой и протяжённой границей с Арктическим бассейном; отсутствием крупных островов (за исключением Новосибирских); локализацией наиболее мощных отроговых ледяных массивов (Таймырского, Айонского, Северного Чукотского); относительной близостью к сибирскому побережью границы многолетних арктических льдов [9, 10]. Именно здесь, на акватории от Северной Земли до Аляски, в начале XXI в. происходят существенные природные изменения, связанные с полярным потеплением, уменьшением толщины и пространственного распространения ледяного покрова [11, 12], что открывает новые возможности для арктического транзитного судоходства между Атлантическим и Тихим океанами [13].

В настоящей работе исследуются изменения именно ледового режима в летне-осенний период, без специального анализа атмосферных, океанических и иных факторов, представляющих собой причину наблюдаемых природных трансформаций.

Используемые данные

Для настоящего исследования подготовлен специализированный архив информации о ледовых условиях в конце летнего и начале осеннего периодов, в который входило: положение кромки льдов в конце августа и в конце сентября на меридиональных створах с шагом 10° долготы — от 100° в.д. до 160° з.д., а также сроки устойчивого ледообразования в узлах регулярной сетки с шагом 5° по долготе и 1° по широте. Как показывает опыт режимной и прогностической работы, такая пространственная дискретность достаточна для воспроизведения основных региональных и локальных особенностей ледовых условий [14]. Период наблюдений — 1981–2018 гг. Он включает в себя два десятилетия XX в. с относительно тяжёлыми ледовыми условиями и почти два десятилетия XXI в., вблизи границы которых существенно изменилось состояние природной среды в Арктике.

Под датой (или сроком) начала устойчивого ледообразования обычно понимается календарная дата, начиная с которой ледообразование происходило непрерывно в течение не менее 30 дней [15]. При организации архива использованы два различных вида данных: 1) для периода 1981–1996 гг.: бумажные карты ледовых условий с шагом в 1 декаду (10 сут.), на которой представлены различные ледовые границы, в том числе остаточных и молодых льдов в летний и осенний периоды, построенные в Центре ледовой и гидрометеорологической информации ААНИИ; 2) 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).

Изменение положения кромки льдов в летний период в конце XX — начале XXI вв.

В течение 1981–2018 гг. среднее широтное положение кромки льдов на всей восточной арктической акватории от Северной Земли до Аляски в конце тёплого сезона очищения моря ото льдов (август–сентябрь) характеризуется боль-

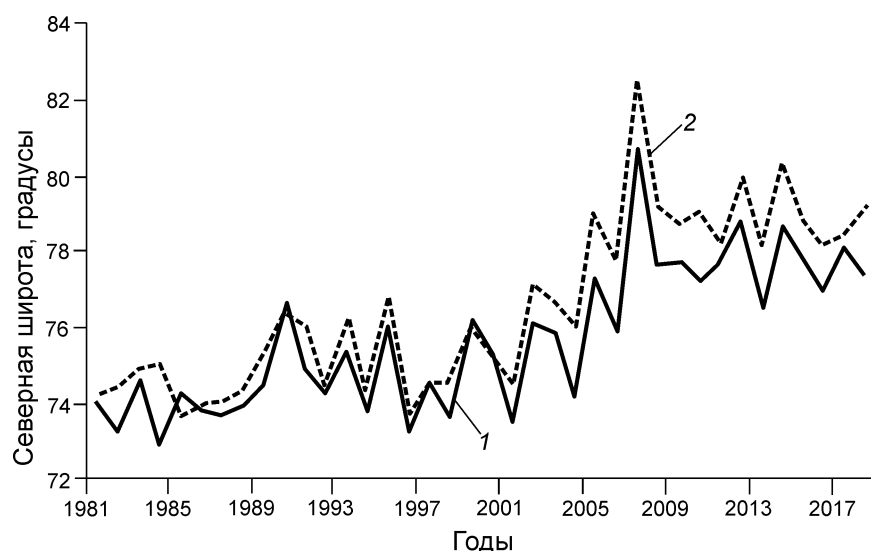


Рис. 1. Средняя широта положения кромки льдов на суммарной акватории восточных арктических морей в конце августа (1) и сентября (2) в течение 1981–2018 гг.

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

шой изменчивостью (рис. 1). Последние четыре десятилетия можно разделить на два примерно равных по продолжительности периода в зависимости от преобладающего знака аномалии средней для всех 11 меридиональных створов широты кромки: а) период 1981–2001 гг. с преимущественно южным положением кромки; б) период 2002–2018 гг. с преимущественно северным положением кромки.

В августе 1981–2001 гг. среднее широтное положение кромки составило $74,4^{\circ}$ с.ш. (аномалия $-0,69$ величины среднего квадратического отклонения – СКО), а в 18 случаях из 21 наблюдались отрицательные аномалии положения кромки. В 2002–2018 гг. среднее положение кромки составило $77,3^{\circ}$ с.ш. (аномалия $+0,85$ величины СКО), а в 16 случаях из 17 наблюдались положительные аномалии положения кромки. Разница между двумя этими периодами равна в среднем $2,9^{\circ}$ с.ш. (или $1,54$ величины СКО), а разница между экстремальными значениями в 1984 г. (средняя кромка на $72,9^{\circ}$ с.ш.) и 2007 г. (средняя кромка на $80,6^{\circ}$ с.ш.) – $7,6^{\circ}$ с.ш. (или $4,04$ величины СКО). Разница между наибольшим и наименьшим значением соответствует пространственному смещению кромки льдов в северном направлении примерно на 800 – 850 км.

В сентябре 1981–2001 гг. среднее широтное положение кромки составило $74,9^{\circ}$ с.ш. (аномалия $-0,75$ величины СКО), а в 20 случаях из 21 наблюдались отрицательные аномалии положения кромки; в 2002–2018 гг. среднее положение кромки – $78,7^{\circ}$ с.ш. (аномалия $+0,93$ величины

СКО), а в 16 случаях из 17 наблюдались положительные аномалии положения кромки. Разница между двумя этими периодами составляет в среднем $3,8^{\circ}$ с.ш. (или $1,68$ величины СКО), а разница между экстремальными значениями в 1996 г. (средняя кромка на $73,5^{\circ}$ с.ш.) и 2007 г. (средняя кромка на $82,5^{\circ}$ с.ш.) – 9° с.ш. (или $4,00$ величины СКО). Разница между наибольшим и наименьшим значением соответствует пространственному смещению кромки льдов в северном направлении примерно на 1000 км.

Отдельный интерес вызывает анализ той скорости, с которой произошло среднее пространственное смещение кромки от 1981–2001 гг. к 2002–2018 гг. 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 составило $74,2^{\circ}$ с.ш., а в 2007 г. – уже $80,6^{\circ}$ с.ш., т.е. за три года кромка сместилась к северу на $6,4^{\circ}$ с.ш. (в среднем на $2,1^{\circ}$ с.ш./год), что соответствует расстоянию примерно 230 км. На отдельных створах продвижение кромки на север было ещё больше: для створа 170° в.д. положение кромки за три года изменилось от $70,7^{\circ}$ с.ш. до $83,0^{\circ}$ с.ш. (в среднем на $4,1^{\circ}$ с.ш./год, или расстоянию около 450 км). Для сентября наблюдаются близкие к августовским значения. Так, в сентябре 2004 г. среднее положение кромки льдов в восточных арктических морях составило $76,0^{\circ}$ с.ш., а в 2007 г. – уже $82,5^{\circ}$ с.ш., т.е. за три года кромка сместилась к северу на $6,5^{\circ}$ с.ш. (в среднем на $2,2^{\circ}$ с.ш. за год,

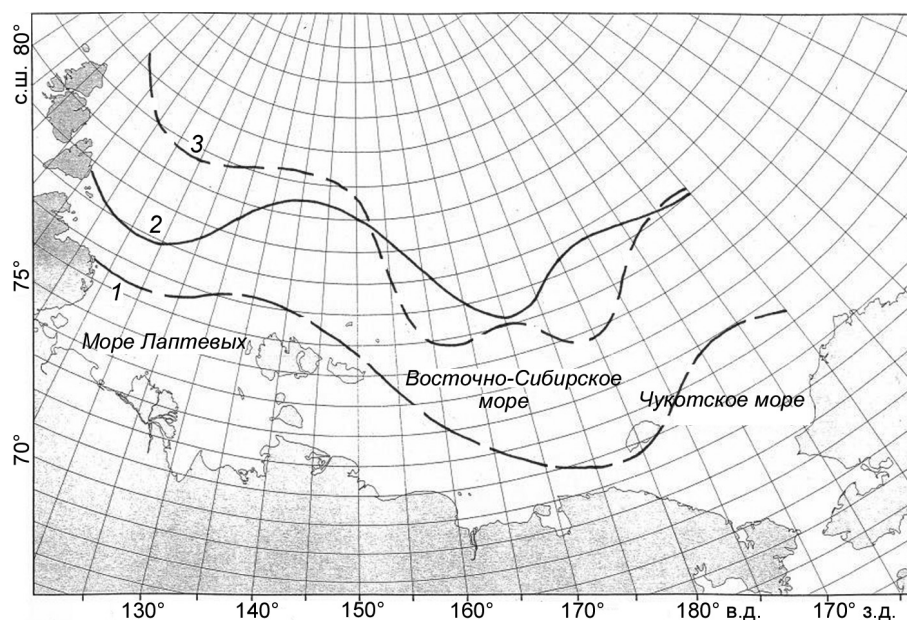


Рис. 2. Среднее положение кромки льдов в конце сентября в течение многолетних однородных периодов:

1 – 1981–2001 гг.; 2 – 2002–2010 гг.; 3 – 2011–2018 гг.

Fig. 2. Mean latitude of ice edge position in late September during the multiyear uniform periods:

1 – 1981–2001; 2 – 2002–2010; 3 – 2011–2018

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

Таким образом, переход от одного длительного климатического состояния к другому произошёл за относительно короткий временной промежуток продолжительностью примерно в три года (2004–2007 гг.). 2007 был годом абсолютного максимума в продвижении средней для всех меридиональных створов кромки льдов на север (80,6° с.ш. в августе и 82,5° с.ш. в сентябре). После 2007 г. кромка сместилась к югу примерно на 3–4° с.ш. и в течение последнего десятилетия сохраняет определённое пространственное постоянство своего положения в зональной полосе примерно 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 78,4° с.ш. за 2005–2006 гг. и 78,9° с.ш. за 2008–2018 гг.

Важнейшая пространственная особенность ледового режима в течение 2002–2018 гг. состоит в том, что смещение кромки в северном направлении по-разному происходит в западной и восточной частях исследуемой акватории, граница между которыми проходит примерно по мериди-

ану о. Новая Сибирь. В 2002–2018 гг. смещение кромки на север в период от конца августа до конца сентября составило: к западу от о. Новая Сибирь (т.е. между меридианами 100° и 150° в.д.) в среднем около 0,8° с.ш., к востоку от о. Новая Сибирь (т.е. между меридианами 160° в.д. и 160° з.д.) – в среднем около 1,9° с.ш., т.е. различие между западной и восточной частями акватории составило около 1,1° с.ш. Таким образом, пространственное смещение кромки на север в самом конце летнего очищения к востоку от меридиана Новосибирских островов было в несколько раз больше, чем к западу от указанной границы. Новосибирские острова – некий природный рубеж, который разделяет акватории с существенно различающимся режимом пространственного перемещения кромки льдов. Выделяют два многолетних периода с пространственно различной аномальностью в положении кромки льдов (рис. 2).

В 2002–2010 гг. в семи случаях из девяти наибольшие положительные аномалии зонального положения кромки наблюдались в восточном фрагменте исследуемой акватории. Среднее значение аномалии для створов 100–150° в.д. составляет 0,39 величины СКО, а для створов 160° в.д. – 160° з.д. увеличивается до 1,06 величины СКО (т.е. почти в 3 раза больше). В 2007 г. зафиксировано экстремальное северное положение кромки к востоку от Новосибирских островов (среднее значение на восточных створах со-

ставило $84,0^{\circ}$ с.ш.). Напротив, в 2011–2018 гг. в шести случаях из восьми наибольшие положительные аномалии зонального положения кромки наблюдались уже в западном фрагменте азиатского шельфа. Среднее значение аномалии для створов $100\text{--}150^{\circ}$ в.д. составляет 1,25 величины СКО, а для створов 160° в.д. – 160° з.д. уменьшается до 0,67 величины СКО (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 – $84,5^{\circ}$ с.ш.).

Переход от периода преобладания наибольших изменений в восточной части акватории к периоду преобладания наибольших изменений в западной части акватории произошёл 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. Отметим, что, многолетнее смещение кромки льдов в восточных арктических морях в северном направлении, наблюдаемое в первые два десятилетия XXI в., представляет собой единое природное явление, состоящее из двух взаимосвязанных частей, хронологически следующих одна за другой.

Относительно периода 1981–2001 гг., когда в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском пространственное положение кромки было характерным для большей части в XX в., в течение 2000-х годов 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. среднее сентябрьское изменение в положении кромки составило $5,2^{\circ}$ с.ш. (от $72,1^{\circ}$ с.ш. к $77,3^{\circ}$ с.ш.) для створов 160° в.д. – 160° з.д. и только $2,2^{\circ}$ с.ш. (от $77,2^{\circ}$ с.ш. к $79,4^{\circ}$ с.ш.) для створов $100\text{--}150^{\circ}$ в.д. В самом начале 2010-х годов началась вторая фаза многолетнего природного процесса, когда наибольшее смещение кромки на север уже наблюдалось в западной части акватории, к западу от Новосибирских островов. В течение 2011–2018 гг. кромка продвинулась к северу на $1,8^{\circ}$ с.ш. (от $79,4^{\circ}$ с.ш. к $81,2^{\circ}$ с.ш.) для створов $100\text{--}150^{\circ}$ в.д. Другая особенность этого периода – пространственное смещение кромки в противоположном направлении: с севера на юг примерно на $1,1^{\circ}$ с.ш. (от $77,3^{\circ}$ с.ш. к $76,2^{\circ}$ с.ш.) для створов 160° в.д. – 160° з.д. Таким

образом, впервые за два последних десятилетия кромка льдов к востоку от Новосибирских островов поменяла направление своего многолетнего перемещения и стала дрейфовать с севера на юг, что маркировало важнейший временной рубеж в изменении природных тенденций.

Упорядоченное изменение в многолетнем положении кромки в течение 2002–2018 гг. подобно некоторому волновому поступательно-колебательному процессу: сначала гребень «ледовой волны» поднимается с юга на север в восточной части акватории (Чукотское и Восточно-Сибирское моря), а затем, по мере развития природного колебания, перемещается в западную часть акватории (море Лаптевых). После активизации волны сначала на востоке, а потом и на западе происходит некоторое успокоение колебательного процесса. В результате кромка начинает смещаться в южном направлении сначала в восточной части акватории, а затем, как можно предположить, и в западной части акватории. Как следствие, ожидается, что в течение ближайших 10–15 лет продолжится постепенное пространственное смещение кромки льдов в южном направлении в среднем примерно на $1,5^{\circ}$ с.ш. Характерные особенности многолетнего режима широтного положения кромки льдов в конце летнего сезона влияют на ледовые условия в последующий осенний период, прежде всего, на формирование аномалий сроков начала устойчивого ледообразования.

Изменение сроков начала устойчивого ледообразования в осенний период в начале XXI в.

В 1981–2018 гг. даты начала устойчивого ледообразования на акватории трёх арктических морей (Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского) в течение осеннего периода показывают примерно ту же доминирующую тенденцию многолетней изменчивости, что и режим кромки льдов в конце летнего сезона (рис. 3). Последние четыре десятилетия можно разделить на две примерно равные по продолжительности части в зависимости от преобладающего знака аномалии даты начала устойчивого ледообразования: а) период 1981–2002 гг. с преимущественно ранними сроками; б) период 2003–2018 гг. с преимущественно поздними сроками.

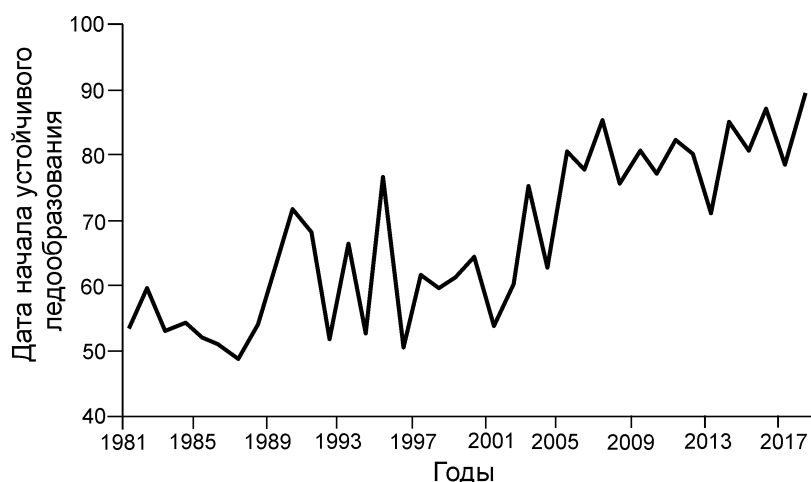


Рис. 3. Средняя дата начала устойчивого ледообразования на суммарной акватории морей Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском в течение 1981–2018 гг. (дата начала ледообразования отсчитывается в сутках от 1 августа)

Fig. 3. Mean date of start of stable ice formation on the total area of the Laptev, East-Siberian and Chukchi Seas during 1981–2018 (date of ice formation is counted in days from August 1)

В 1981–2002 гг. средняя дата начала устойчивого ледообразования на акватории трёх арктических морей составила 28 октября. В 19 случаях из 22 (повторяемость 86%) наблюдалась отрицательная аномалия даты начала устойчивого ледообразования со средним значением $-0,70$ величины СКО. Напротив, в 2003–2018 гг. средняя дата начала устойчивого ледообразования на восточной арктической акватории – 18 ноября. В 15 случаях из 16 (повторяемость 94%) наблюдалась положительная аномалия срока устойчивого ледообразования со средним значением $+0,96$ величины СКО. Разница между двумя многолетними периодами ранних и поздних дат начала осеннего образования льдов в море составила в среднем 20,7 сут., или 1,66 величины СКО.

Представление результатов произошедших изменений за период 2003–2018 гг. по сравнению с 1981–2002 гг. на картах (рис. 4) показывает, что в протяжённой зональной акватории от Северной Земли до Аляски наблюдаются существенные пространственные неоднородности в распределении аномалий дат начала ледообразования.

Область наибольших изменений в датах начала устойчивого ледообразования в 2003–2018 гг., примерно ограниченная изохроной 30 сут., включает в себя северо-восточную часть Чукотского моря и восточную часть Восточно-Сибирского моря. Максимальные значения (до 47 сут.) наблюдаются к северо-востоку от о. Врангеля, в северной части Чукотского моря около 73° с.ш. приблизительно вдоль 170° з.д. Область наи-

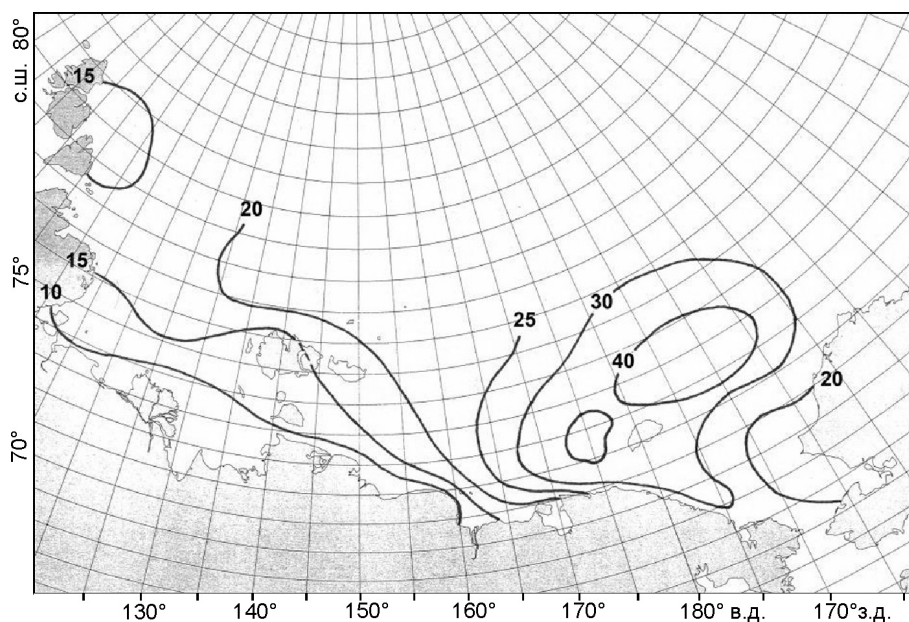


Рис. 4. Разница (сутки) в дате начала устойчивого ледообразования в восточных морях российской Арктики между периодами 2003–2018 и 1981–2002 гг.

Fig. 4. Difference (days) between the dates of start of stable ice formation in the eastern Arctic seas during 2003–2018 and 1981–2002

меньших изменений в датах начала устойчивого ледообразования в 2003–2018 гг., примерно ограниченная изохроной 10 сут., располагается в южной части моря Лаптевых (южнее 74-й параллели) и на юго-западном мелководье Восточно-Сибирского моря. Минимальные значения (до 5–6 сут.) наблюдаются вблизи устьевых взморья рек Оленёк и Индигирка.

Для акватории Чукотского моря средняя дата начала устойчивого ледообразования в 1981–2002 гг. – 18 октября, в 2003–2018 г. – 17 ноября, разница – около 30 сут. Для акватории Восточно-Сибирского моря средняя дата начала устойчивого ледообразования в 1981–2002 гг. – 21 сентября, в 2003–2018 г. – 13 октября, разница – около 22 сут. Для акватории моря Лаптевых средняя дата начала устойчивого ледообразования в 1981–2002 гг. – 22 сентября, а в 2003–2018 г. – 7 октября, разница – около 14 сут. Таким образом, средний для акватории размах изменений дат начала ледообразования в XXI в. в Чукотском море примерно в 2 раза больше, чем в море Лаптевых.

16-летний период 2003–2018 гг., характерный для поздних дат начала ледообразования в XXI в., очень неоднороден по пространству и может быть разделён на три 5–6-летних периода в зависимости от географической локализации области наибольших аномалий дат начала устойчивого ледообразования в тех или иных восточных арктических морях России (таблица). Основным критерий выделения временных границ – пространственное (на востоке или на западе исследуемой акватории) расположение самых крупных по величине поздних аномалий начала ледообразования.

В 2003–2008 гг. наибольшие положительные аномалии дат начала устойчивого ледообразования (1,48 величины СКО) наблюдались в Чукотском море, а в море Лаптевых отмечался близкий к среднемноголетнему режим ледообразования (средняя аномалия только 0,30 величины СКО). Восточно-Сибирское море по степени аномальности было ближе к Чукотскому, которое представляло собой единственную акваторию, где ежегодно в течение шести лет подряд величина аномалии не опускалась ниже 1,00 величины СКО (как, например, это наблюдалось в Восточно-Сибирском море в 2004 г.). В 2009–2013 гг. наибольшая положительная аномалия

Средние многолетние значения аномалий (относительно периода 1981–2018 гг.) даты начала устойчивого ледообразования (доли среднего квадратичного отклонения) в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском в течение трёх периодов

Годы	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море	Суммарная акватория
2003–2008	0,30	1,34	1,48	1,20
2009–2013	1,58	1,06	0,99	1,39
2014–2018	1,49	1,69	1,84	1,92

сместилась с востока в западном направлении и наблюдалась уже в море Лаптевых (1,58 величины СКО). В Восточно-Сибирском и Чукотском морях средняя аномалия по сравнению с предыдущим периодом уменьшилась примерно на 20–30% – до 1,0 величины СКО. В 2012 г. в Чукотском море и в 2013 г. в Восточно-Сибирском даты начала ледообразования примерно соответствовали многолетней (для 38-летнего ряда) норме. В 2014–2018 гг. наибольшие аномалии, как и в 2003–2008 гг., вновь наблюдались в Чукотском море (1,84 величины СКО), однако и в двух остальных морях сохранялись достаточно большие значения положительных аномалий (1,49–1,69 величины СКО). В Чукотском море ежегодно в течение пяти лет подряд положительная аномалия превышала значение в 1,5 величины СКО, а в Восточно-Сибирском море – в 1,4 величины СКО. В 2017 г. в море Лаптевых даты начала ледообразования примерно соответствовали многолетней (для 38-летнего ряда) норме.

В целом для акватории всех трёх восточных арктических морей в 2003–2018 гг. характерно постепенное увеличение величины положительных аномалий (от 1,20 величины СКО в 2003–2008 гг. до 1,92 величины СКО в 2014–2018 гг.). Это происходит в результате двух обстоятельств: а) пространственного вовлечения в процесс позднего ледообразования, начавшегося в Чукотском море в 2003 г., всех остальных морей – сначала Восточно-Сибирского в 2005 г., а затем и моря Лаптевых в 2009 г.; б) сохранения уже достигнутой величины положительных аномалий в море Лаптевых и некоторого её увеличения в Восточно-Сибирском и особенно в Чукотском морях. Волна поздних сроков начала ледообразования, возникнув в Чукотском море, в своём пространственном движении сначала достигла

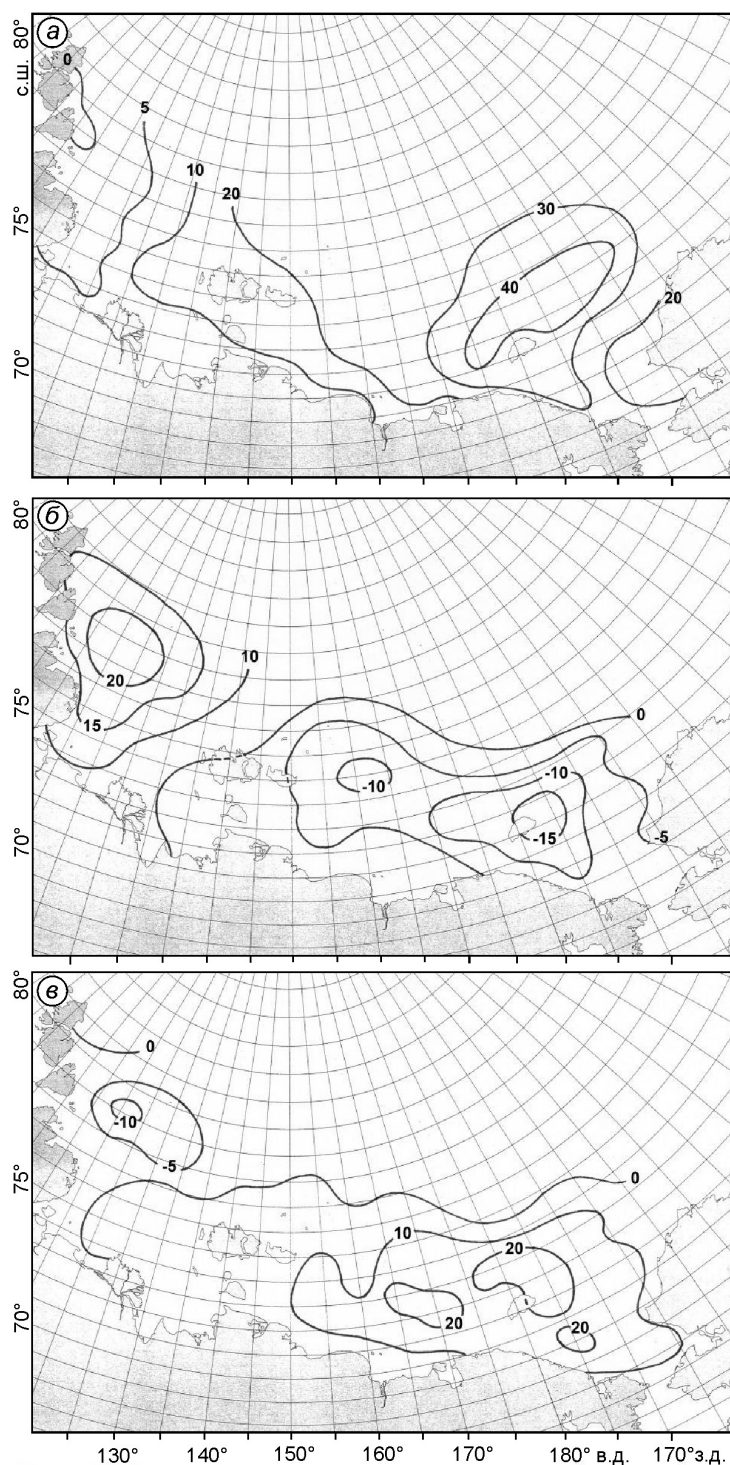


Рис. 5. Разница (сутки) в дате начала устойчивого ледообразования в восточных морях Российской Арктики между однородными периодами: а – 2003–2008 и 1981–2002 гг.; б – 2009–2013 и 2003–2008 гг.; в – 2014–2018 и 2009–2013 гг.

Fig. 5. Difference (days) between the dates of start of stable ice formation in the eastern Arctic seas during the multiyear uniform periods: а – 2003–2008 and 1981–2002; б – 2009–2013 and 2003–2008; в – 2014–2018 and 2009–2013

моря Лаптевых, а затем вернулась обратно, количественно сохранив и даже несколько увеличив степень своего развития.

Разница между картами распределения дат начала устойчивого ледообразования соседних 5–6-летних временных периодов показывает более подробные особенности и пространственные тенденции этого многолетнего природного явления с характерным временным масштабом около одного десятилетия. Как и в случае с режимом кромки льдов, формирование поздних дат начала устойчивого ледообразования в течение 2003–2018 гг. происходит в виде многолетних волновых колебаний (рис. 5).

В 2003–2008 гг. по отношению к 1981–2002 гг. наблюдается начальная фаза колебательного процесса, основная особенность которого заключается в формировании области наибольших положительных аномалий к западу от Новосибирских островов, на акватории около о. Врангеля, и постепенного уменьшения величины колебаний при движении на запад, к морю Лаптевых, п-ову Таймыр и Северной Земле. С одной стороны, в Чукотском море и в восточной части Восточно-Сибирского моря наблюдается наибольший размах колебаний (позднее ледообразование), а, с другой стороны, в западной части моря Лаптевых эти колебания почти полностью исчезают (среднее ледообразование).

В 2009–2013 гг. по отношению к 2003–2008 гг. наблюдается колебательное (как пространственное, так и возвратное) развитие ледовой волны. Пространственное смещение характеристик волны на запад способствует тому, что область наибольших положительных аномалий наблюдается уже к западу от Новосибирских островов, в западной части моря Лаптевых (с центром несколько восточнее пролива Вилькицкого). Возвратное колебание волны приводит к тому, что в Восточно-Сибирском и Чукотском морях происходит компенсационное формирование уже отрицательных аномалий. Узловая линия колебаний, разделяющая области положительных и отрицательных аномалий, находится в районе Новосибирских островов, а также к востоку от последних вдоль зональной полосы 74–78° с.ш.

В 2014–2018 гг. по отношению к 2009–2013 гг. происходит почти зеркальное, обратное повторение предыдущей фазы волновых колебаний: к востоку от Новосибирских островов наблюдается область положительных аномалий (продолжение позднего ледообразования), а к западу от Новосибирских островов — область отрицательных аномалий (компенсационная тенденция к среднему ледообразованию). Узловая линия разнонаправленных колебаний располагается несколько западнее Новосибирских островов, а также вблизи северной границы Восточно-Сибирского и Чукотского морей.

Таким образом, пространственная изменчивость дат начала ледообразования, осреднённая для 5–6-летних однородных периодов, происходит по типу волновых колебаний. В режиме колебаний этой многолетней волны можно выделить несколько характерных особенностей.

1. Амплитуда волновых колебаний между западной и восточной частями исследуемой акватории, достигнув некоторого максимума, уже начала уменьшаться. В течение 2003–2008 гг. гребень волны был в Чукотском море (наибольшая аномалия 40–45 сут.), а подошва волны — в море Лаптевых (аномалия 0–5 сут.); размах колебаний — около 40 сут. В 2009–2013 гг. гребень волны находился в море Лаптевых (наибольшая аномалия около 25 сут.), а подошва волны — в Чукотском море (наибольшая аномалия около 15 сут.); размах колебаний — также около 40 сут. В 2014–2018 гг. гребень волны вновь наблюдался на востоке, на акватории около о. Врангеля (наибольшая аномалия около 20 сут.), а подошва волны — в море Лаптевых (величина отрицательной аномалии 5–10 сут.); размах колебаний — примерно 25–30 сут., т.е. по сравнению с периодами 2003–2008 и 2009–2013 гг. в течение последнего периода 2014–2018 гг. амплитуды волновых колебаний уменьшились примерно на 40%.

2. Амплитуда волновых колебаний уменьшалась после того, как гребень ледовой волны (область положительных аномалий) сначала получил наибольшее развитие в Чукотском море (2003–2008 гг.), а затем этот же гребень получил такое же развитие уже в море Лаптевых (в 2009–2013 гг.). Наконец, после завершения некоторого естественного двухчастного комплекса колебаний в пространстве между Аляской и Северной Землёй в 2014–2018 гг. определённо на-

людается начало некоторого ослабления интенсивности и размаха колебательных изменений.

3. Узловая линия колебаний, находившаяся в 2009–2013 гг. вблизи Новосибирских островов (в районе Янского ледяного массива), в 2014–2018 гг. сместилась на запад примерно на 400–500 км, в центральную часть моря Лаптевых (в район Таймырского ледяного массива).

4. Та область наибольших колебаний, которая располагается к востоку от Новосибирских островов, постепенно (от одного однородного периода к другому) смещается по направлению с северо-востока на юго-запад (из мористой акватории ближе к берегу): в 2003–2008 гг. она располагалась к северо-востоку от о. Врангеля, а в течение 2014–2018 гг. — около о. Врангеля, вблизи о. Айон и Колючинской губы.

Совокупность особенностей волновых колебаний позволяет предположить наиболее вероятные общие тенденции их изменений в ближайшие годы. В течение 2020-х годов можно прогнозировать продолжение сокращения амплитуды колебаний, начавшееся в 2014–2018 гг. Составной частью этого волнового ослабления, как ожидается, будет уменьшение величины положительных аномалий. Следовательно, даты начала устойчивого ледообразования будут постепенно и инерционно медленно возвращаться к тем среднемноголетним значениям, которые наблюдались в конце XX в., т.е. ожидаются более ранние сроки начала ледообразования по сравнению с их современными значениями. Таким образом, общая тенденция ожидаемых изменений в датах начала устойчивого ледообразования примерно та же, что и у кромки льдов: прогнозируется, что в течение 2020-х годов (по сравнению с 2010-ми годами) будет наблюдаться некоторое ухудшение ледовых условий, связанное с относительно более южным положением кромки в конце летнего периода и со сравнительно более ранним ледообразованием в осенний период.

Заключение

При анализе изменения летне-осеннего ледового режима восточных арктических морей России в начале XXI в. установлен ряд основных природных особенностей.

1. Многолетнее изменение широтного положения кромки льдов в конце лета и дат начала

устойчивого ледообразования осенью в восточных арктических морях России в 1981–2018 гг. показывает схожие между собой особенности крупномасштабных тенденций. В 1980–90-х годах наблюдалось относительно южное положение кромки льдов и раннее начало устойчивого ледообразования, а в 2000–2010 гг. — относительно северное положение кромки льдов и поздние даты устойчивого ледообразования.

2. Разница между средним положением кромки льдов в сентябре в 1981–2001 гг. ($74,9^\circ$ с.ш.) и в 2002–2018 гг. ($78,7^\circ$ с.ш.) составляет $3,8^\circ$ с.ш., а между экстремальными значениями 1996 и 2007 г. — $9,0^\circ$ с.ш., что соответствует пространственному смещению кромки с юга на север примерно на 1000 км.

3. Многолетнее смещение кромки льдов на север состоит из двух взаимосвязанных частей, с пространственной акцентацией области наибольшей изменчивости по разные стороны от Новосибирских островов: в 2002–2010 гг. наибольшее смещение кромки наблюдается в Чукотском и Восточно-Сибирском морях (максимум в 2007 г.), а в 2011–2018 гг. — в море Лаптевых (максимум в 2014 г.).

4. Особенности пространственного смещения кромки льдов на север подобны колебаниям «ледовой волны», гребень которой сначала поднимается с юга на север в восточной (Чукотское море), а затем — в западной (море Лаптевых) части акватории. После волнового дрейфа с востока на запад размах колебаний ослабляется, а также происходит региональное смещение кромки в противоположном направлении — с севера на юг.

5. Разница между средней датой начала устойчивого ледообразования осенью в период раннего (1981–2002 гг.) и позднего (2003–2018 гг.) ледообразования составляет около 21 сут. (в Чукотском море — 30 сут., в Восточно-Сибирском — 22 сут., в море Лаптевых — 14 сут.). Позднее ледообразование отмечено: в Чукотском море — в

2003 г., в Восточно-Сибирском — в 2005 г., в море Лаптевых — в 2009 г. Вовлечение новых акваторий способствует сохранению положительной аномалии дат начала ледообразования на обобщённой акватории трёх арктических морей.

6. Пространственная изменчивость дат начала ледообразования в 2003–2018 гг. также происходит по типу волновых колебаний в 5–6-летних периодах. Область наибольших положительных колебаний наблюдается: сначала (в 2003–2008 гг.) на востоке (в северной части Чукотского моря), затем (в 2009–2013 гг.) — на западе (в море Лаптевых) и, наконец, (в 2014–2018 гг.), вновь на востоке (на акватории к востоку от Новосибирских островов).

7. Особенности волновых колебаний позволяют предположить общие тенденции будущих природных изменений в течение 2020-х годов. Ожидается, что кромка льдов продолжит постепенное пространственное смещение в южном направлении примерно на $1,5^\circ$ с.ш. Для дат начала устойчивого ледообразования прогнозируется постепенный и очень медленный инерционный возврат к некоторому среднему фону, более раннему по сравнению с его текущим состоянием. Причины (метеорологические, океанические, геофизические и пр.) наблюдаемых многолетних изменений ледового режима арктических морей требуют отдельных и дополнительных исследований.

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

Acknowledgments. 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 CSTP.

Литература

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

References

1. 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.
2. *Okeanografiya i morskoy led*. Oceanography and sea ice. М.: Paulsen, 2011: 432 p. [In Russian].

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 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 4. С. 403–421.
4. 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.
5. Спичкин В.А. Основные природные факторы, определяющие аномалии сроков начала ледообразования в мелководных районах арктических морей // Тр. ААНИИ. 1987. Т. 402. С. 81–92.
6. Крутских Б.А. Особенности ледообразования в арктических морях // Тр. ААНИИ. 1970. Т. 292. С. 106–117.
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.: Гидрометеоздат, 1972. 348 с.
8. 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.: Гидрометеоздат, 1983. 288 с.
9. Захаров В.Ф. Похолодание Арктики и ледяной покров арктических морей. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 95 с.
10. Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России. Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.
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. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под ред. Е.У. Миронова. СПб.: ААНИИ, 2010. 320 с.
13. 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.
14. Егоров А.Г. Долгосрочный прогноз сроков ледообразования в юго-западной части Карского моря // Информ. сб. Гидрометцентра РФ. 2005. № 31. С. 120–136.
15. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 56 с.
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 i okeana*. Proc. of the Russian Academy of Sciences. Physics of Atmosphere and Ocean. 2012, 48 (4): 403–421. [In Russian].
4. 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*. Problems of Arctic and Antarctic. 2015, 1 (103): 33–41. [In Russian].
5. Spichkin V.A. Main natural factors defining the anomalies of the dates of ice formation in shallow water regions of the Arctic seas. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1987, 402: 81–92. [In Russian].
6. Krutskikh B.A. Peculiarities of ice formation in the Arctic seas. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1970, 292: 106–117. [In Russian].
7. Gudkovich Z.M., Kirillov A.A., Kovalev E.G., Smetannikova A.V., Spichkin V.A. *Osnovy metodiki dolgosrochnykh ledovykh prognozov dlya Arkticheskikh morey*. 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. Gorbunov Yu.A., Karelin I.D., Kuznetsov I.M., Losev S.M., Sokolov A.L. *Osnovy fiziko-statisticheskikh metodov ledovykh prognozov i raschetov dlya arkticheskikh morey zablagovremennost'yu do 30 sutok*. Basis of the physical-statistical methodology of ice forecasts and simulations for the Arctic seas up to 30 days in advance. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983: 288 p. [In Russian].
9. Zakharov V.F. *Pokholodanie Arktiki i ledyanoy pokrov arkticheskikh morey*. Cold snap of the Arctic and ice cover of the Arctic seas. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976: 95 p. [In Russian].
10. Dumanskaya I.O. *Ledovye usloviya morey aziatskoy chasti Rossii*. Ice conditions of the seas of an Asian part of Russia. Obninsk: IG-SOTSIN, 2017: 640 p. [In Russian].
11. *Vtoroy otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ich posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii*. Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation. Eds.: V.M. Kattsov, S.M. Semenov. Moscow: Roshydromet, 2014: 1005 p. [In Russian].
12. *Opasnye ledovye javleniya dlya sudohodstva v Arktike*. Dangerous ice conditions for shipping in the Arctic. Ed. E.U. Mironov. St. Petersburg: AARI, 2010: 320 p. [In Russian].
13. 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].
14. Egorov A.G. Long-range forecast of ice formation dates in the south-western Kara Sea. *Informatsionnyi sbornik Gidromettsentra RF*. Information release of the Hydrometeorological Center of Russian Federation. 2005, 31: 120–136.
15. *Mezhdunarodnaya simbolika dlya morskikh ledovykh kart i nomenklatura morskikh ldov*. International symbols on sea ice charts and sea ice nomenclature. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984. 56 p.