

УДК 551.326.1/.2(268.53/.56)

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404

ИЗМЕНЕНИЕ СРОКОВ УСТОЙЧИВОГО ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ В ВОСТОЧНЫХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ РОССИИ В НАЧАЛЕ XXI в.

А.Г. ЕГОРОВ*, Е.А. ПАВЛОВА

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

*e-mail: ego@aari.ru

CHANGE IN THE TIME OF STABLE ICE FORMATION IN THE RUSSIAN EASTERN ARCTIC SEAS AT THE BEGINNING OF 21ST CENTURY

A.G. EGOROV, E.A. PAVLOVA

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

*e-mail: ego@aari.ru

Received September, 25, 2019

Accepted November, 25, 2019

Keywords: autumn period, ice cover of the Russian Arctic seas, multi-year variations, the Chukchi sea, the Laptev sea, the East-Siberian sea, time of stable ice formation.

Summary

The purpose of the paper is to analyze the spatial-temporal variability of the time of stable ice formation in the Russian Eastern Arctic seas (the Laptev Sea, the East-Siberian Sea, the Chukchi Sea) in autumn period during 1942–2018, as well as the climatic changes for the last 20 years. The specialized information archive containing the dates of stable ice formation in the elements of regular grid (5 degrees along the parallel and 1 degree along the meridian) based on the AARI observations and satellite imagery was developed. The archive covers 2.2 million km² of the Arctic area.

During the period from 1942 to 2018 one can reveal 4 consecutive climatic periods: mean dates of ice formation (1942–1953), anomaly early dates of ice formation (1954–1988), mean dates of ice formation (1989–2002) and anomaly late dates of ice formation (2003–2018). Notice that the ice formation regime in the 21st century, by its abnormality, differs radically from that in the 20th one. For the total area of three seas, the mean date of ice formation in the 21st century became 21 days later than in the 20th one. The most significant changes (up to 45 days) take place in the Chukchi Sea.

Citation: Egorov A.G., Pavlova E.A. Change in the time of stable ice formation in the Russian Eastern Arctic seas at the beginning of 21st century. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (4): 389–404. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404.

The transformation of the ice formation regime typical for the 1942–2002 to the regime of 2003–2018 happened rather quickly — approximately within 5 years. The anomaly late time of ice formation began in the Chukchi Sea in 2003, and then this anomaly propagated to the East-Siberian Sea (in 2005) and to the Laptev Sea (in 2009). The 16-year period of anomaly late ice formation consists of three 5–6-year periods depending on location of the maximum anomalies: 2003–2008 (the Chukchi Sea), 2009–2013 (the Laptev Sea), and 2014–2018 (the Chukchi Sea again). As a consequence, the period of autumn warming, which has begun in 2003, is going on till present, and the latest date of ice formation in the eastern Arctic seas for the entire 77-year period was registered just in 2018.

Поступила 25 сентября 2019 г.

Принята к печати 25 ноября 2019 г.

Ключевые слова: Восточно-Сибирское море, ледяной покров арктических морей России, многолетняя изменчивость ледовых условий, море Лаптевых, срок устойчивого ледообразования, позднее ледообразование, Чукотское море.

По данным наблюдений за 1942–2018 гг. проведен анализ сроков устойчивого ледообразования в восточных морях Российской Арктики (Лаптевых, Восточно-Сибирском, Чукотском). Выполнено описание среднемноголетнего варианта пространственного распределения изохрон устойчивого ледообразования в осенний период. Установлено, что начиная с 2003 г. наблюдается новый многолетний период аномально позднего появления льдов осеннего образования. Область очень позднего ледообразования впервые появилась в Чукотском море в 2003 г. и затем постепенно смещалась с востока на запад, до экватории моря Лаптевых в 2009 г. Осеннее потепление продолжается, и осенью 2018 г. было зафиксировано абсолютно позднее ледообразование за весь 77-летний ряд наблюдений.

ВВЕДЕНИЕ

Ледообразование является важным элементом ледового режима арктических акваторий, связующим воедино летний сезон очищения акватории ото льдов и зимний сезон нарастания толщины ледяного покрова [1]. Осеннее ледообразование не только определяет сроки окончания летней навигации и начала зимней навигации, но и служит объективным индикатором многолетних изменений, происходящих с ледяным покровом в Арктике [2].

Процесс устойчивого ледообразования в арктических морях России является результатом сложного взаимодействия факторов, с одной стороны, формирующих тепловой запас моря в период его нагревания и, с другой, — интенсивность теплоотдачи в период охлаждения [3]. Выхолаживание арктической морской поверхности обычно начинается в конце августа – начале сентября, совпадая во времени с максимальным накоплением тепла в поверхностном слое, и завершается появлением на свободных ото льда пространствах начальных видов льда — игл, сала, снежуры и шуги [4].

В течение последних двух десятилетий в Арктическом регионе происходят кардинальные изменения природной среды, которые охватывают, в том числе, и состояние ледяного покрова [5]. Устойчиво уменьшается толщина льдов в Арктическом бассейне и арктических морях [6], площадь распространения ледяного покрова и зимой, и летом [7]. Применительно к осеннему сезону наиболее важная ледовая трансформация относится к общему временному смещению сроков устойчивого ледообразования в позднюю сторону [8]. Однако более подробные, региональные и локальные особенности аномалий позднего ледообразования в арктических морях России до сих пор остаются недостаточно исследованными. Цель настоящей статьи — частично восполнить этот пробел.

Суммарная акватория морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского, общей площадью около 2,2 млн км², расположенная в зональной полосе между 100° в.д. и 160° з.д. и занимающая около 1/3 всей северной циркумполярной области, является важной составной частью Российской Арктики. Открытая граница с Арктическим бассейном и относительная близость к сибирскому побережью границы многолетних арктических льдов [9] традиционно делали восточные арктические моря относительно сложным участком судоходства по трассам Северного морского пути [10, 11]. Однако в XXI в. именно здесь происходят существенные природные изменения, связанные с общим потеплением и деградацией ледяного покрова, в результате чего открываются новые возможности для арктического транзитного судоходства из Атлантического океана в Тихий [12].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При исследовании режима осенних ледовых процессов обычно используют данные наблюдений на полярных станциях о сроке устойчивого ледообразования. Однако эти данные характеризуют преимущественно прибрежные и мелководные акватории, при этом особенности формирования ледовых условий в глубоководных акваториях, расположенных вдали от побережья, описаны недостаточно полно. Для картированного представления пространственного распределения сроков устойчивого ледообразования по всей акватории восточных арктических морей ледовая информация об осенних процессах была упорядочена в узлах регулярной сетки с постоянным шагом в 5 градусов по долготе и 1 градус по широте (значения срока устойчивого ледообразования определялись в пространстве от 100-го градуса восточной долготы до 160-го градуса западной долготы, а также от 66-го градуса северной широты до 81-го градуса северной широты). Дата устойчивого ледообразования отсчитывалась в сутках начиная от 1 августа; то есть ледообразование, например, 10 сентября заносится в архив как 41 (41 сутки от 1 августа).

При организации архива были использованы три различных вида данных:

– для периода 1942–1980 гг.: бумажные карты распределения изохрон устойчивого ледообразования, построенные в отделе ледового режима и прогнозов ААНИИ; на каждой карте отражено пространственное перемещение изохрон ледообразования, как правило, с шагом в 5–10 суток; основные источники информации — полярные станции, авиационная ледовая разведка, морские суда;

– 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 осеннего образования, 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 оказалось 133 информационных узла: в море Лаптевых — 53, в Восточно-Сибирском море — 50, в Чукотском море — 30. Ряд наблюдений, занесенный в архив, составляет период

с 1942 по 2018 г., длина ряда — 77 лет. Общее количество занесенных данных о календарных сроках устойчивого ледообразования в регулярных узлах — суммарно 10241 единица.

Опираясь на созданный массив данных, можно построить любые карты пространственного распределения сроков устойчивого ледообразования — среднеголетние, экстремальные, типовые и др. В качестве обобщенного показателя, удачно характеризующего общий фон замерзания в море, в настоящей работе используется средний срок ледообразования, который определяется как среднее арифметическое для всех узлов, входящих в состав данной акватории [13]. Этот показатель отражает количественный и пространственный режим образования осенних льдов, свойственный для всей исследуемой акватории в конкретных физико-географических и гидрометеорологических условиях.

РЕЖИМ СРОКОВ УСТОЙЧИВОГО ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ

При среднеголетних условиях (ряд наблюдений 1942–2018 гг.) устойчивое ледообразование на акватории восточных арктических морей России — Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского начинается в первой декаде сентября, а завершается во второй декаде ноября, т.е. продолжается в течение примерно 8 декад осеннего периода (рис. 1). Растянутый во времени почти на три месяца процесс устойчивого ледообразования может быть разделен на три различных по продолжительности квазиоднородных периода в зависимости от пространственных особенностей перемещения по акватории изохрон устойчивого ледообразования.

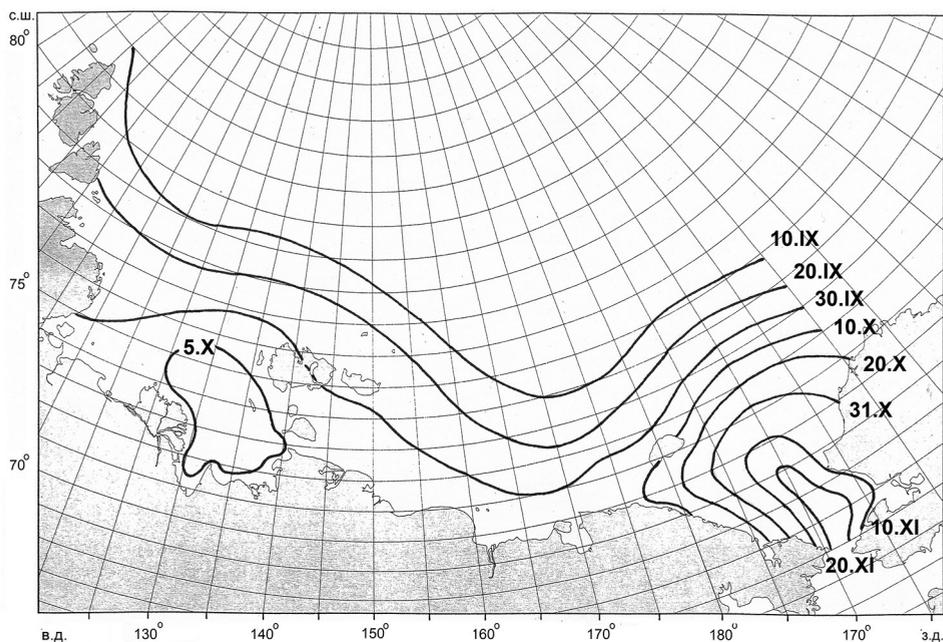


Рис. 1. Карта среднеголетнего распределения изохрон устойчивого ледообразования в восточных арктических морях России в течение 1942–2018 гг.

Fig. 1. Map of mean climatic distribution of stable ice formation isochrones in the Russian Eastern Arctic seas averaged for the period from 1942 till 2018

В течение первого, продолжительностью около трех декад, этапа ледообразования, начавшееся в самых северных акваториях, граничащих с Арктическим бассейном, достигает северного побережья Евразии в районе п-ова Таймыр. Начало ледообразования в первой декаде сентября наблюдается на самом севере арктических акваторий: в море Лаптевых – вблизи 79–80-й параллели, в Восточно-Сибирском море — вблизи 74–75-й, в Чукотском море — вблизи 75–76-й; пространственная конфигурация самых ранних изохрон в начале сентября примерно ориентируется на положение остаточных льдов (точнее, границы сплоченных 7–10-балльных льдов) в конце августа — начале сентября [14]. Начавшееся на севере акватории ледообразование постепенно распространяется в генеральном направлении с севера на юг. В конце сентября наблюдается важная маркировочная веха: изохрона ледообразования в арктических морях Восточной Арктики достигает материковой и островной суши в районе северо-восточного побережья п-ова Таймыр, а также Новосибирских о-вов; т.е. с третьей декады сентября прекращается возможность плавания через пролив Вилькицкого и к северу от Новосибирских о-вов с запада на восток и с востока на запад по чистой воде, редким и разреженным остаточным льдам; отныне сквозное плавание предполагает обязательное движение по льдам осеннего образования. В течение описываемого этапа полного ледообразования акватории на обширном участке от п-ова Таймыр до о. Врангеля еще не наблюдается.

В течение достаточно короткого по продолжительности второго этапа ледообразование полностью достигает побережья материка на протяженном участке сибирского мелководья между взморьем реки Хатанги и проливом Лонга, в том числе в море Лаптевых между п-овом Таймыр и Новосибирскими о-вами. Этот этап длится всего одну декаду, и к окончанию первой декады октября вся протяженность арктического побережья от восточного побережья Северной Земли и п-ова Таймыр до п-ова Чукотка (между 100° и 180° в.д.) занята молодыми льдами осеннего образования. Самый важный содержательный и одновременно завершающий элемент этого этапа — замерзание прибрежной акватории между устьем реки Лены и Новосибирскими о-вами в течение первой декады октября.

В течение третьего этапа, продолжительностью примерно четыре декады, происходит завершение процесса ледообразования на акватории восточных арктических морей; причем последней во времени замерзает акватория Чукотского моря к востоку от 180-го меридиана и к югу от 71-й параллели. Изохроны ледообразования распространяются между п-овом Чукотка и п-овом Аляска в генеральном направлении с северо-запада на юго-восток. Этап начинается во второй декаде октября и завершается во второй половине ноября, когда окончательно замерзает акватория, непосредственно примыкающая к Берингову проливу.

Гистограмма распределения сроков устойчивого ледообразования (рис. 2) наглядно отражает основные особенности временного развития процесса ледообразования по пространству восточных арктических морей при среднемноголетнем сценарии. Вся выборка четко делится на две равные (по четыре декады) временные части.

В течение первой декады сентября — первой декады октября ледообразование, начавшись на севере акватории, распространяется в южном направлении и достигает сибирского побережья на обширной протяженности от п-ова Таймыр

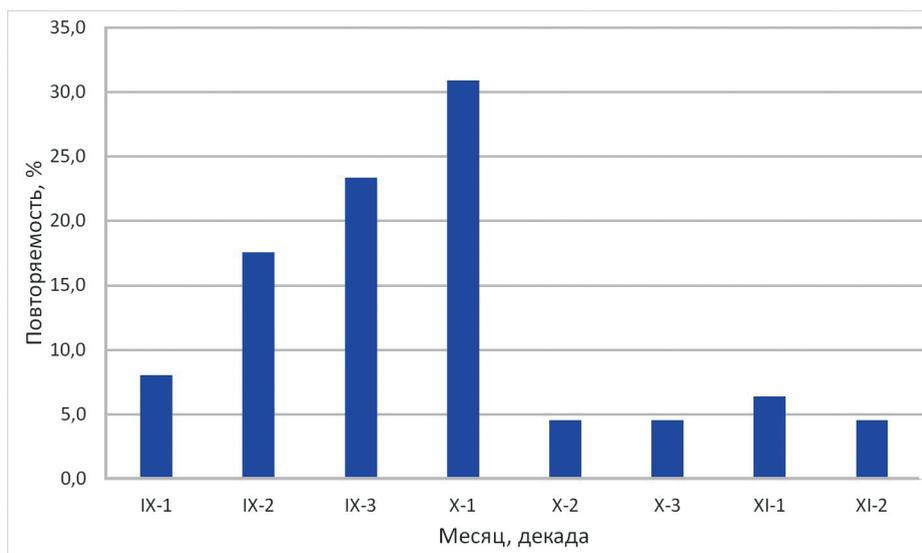


Рис. 2. Гистограмма распределения сроков устойчивого ледообразования в течение 1942–2018 гг. на суммарной акватории морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского

Fig. 2. Histogram of the dates of stable ice formation (1942–2018) on the total area of the Laptev, East-Siberian and Chukchi Seas

до пролива Лонга. В среднем за каждую декаду площадь ледообразования прирастает примерно на 20 %, так что за четыре декады льдами осеннего образования покрывается огромная акватория — примерно 80 % суммарной площади восточных арктических морей России (или около 1,75 млн км²). Причем процесс ледообразования развивается по нарастающей: наблюдается прогрессирующее вовлечение в процесс ледообразования все больших и больших по площади акваторий: в первой декаде сентября замерзает примерно 8 % площади акватории, во второй декаде сентября еще 18 %, в третьей декаде сентября еще 23 %, в первой декаде октября еще 31 %. В первые две декады осенние льды покрывают примерно 1/4, а в следующие две декады — еще примерно половину суммарной площади морей, так что 49 % суммарной площади акватории покрывается осенними льдами уже к концу третьей декады сентября. Сразу после сезонной кульминации в первой декаде октября и достижения волной замерзания сибирского берега на протяжении от п-ова Таймыр до пролива Лонга интенсивность развития ледообразования в пространстве резко, скачкообразно уменьшается.

В течение второй декады октября — второй декады ноября ледообразование наблюдается только на восточной периферии зональной полосы сибирского шельфа, т.е. к востоку от пролива Лонга. Интенсивность развития процесса — по сравнению с предыдущим этапом — кардинально снижается: в среднем за четыре декады площадь ледообразования прирастает всего на 5–6 %, так что за четыре декады осенние льды покрывают только около 20 % площади суммарной акватории, т.е. по сравнению с первым этапом пространственная интенсивность ледообразования уменьшается примерно в четыре раза.

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СРОКОВ УСТОЙЧИВОГО ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ

Многолетняя изменчивость сроков устойчивого ледообразования на суммарной акватории восточных арктических морей России (рис. 3) показывает наличие длительных периодов преобладания положительных и отрицательных аномалий в сроках наступления осенних ледовых условий. В течение 1942–2018 гг. наблюдались 4 климатических периода продолжительностью от 12 до 35 лет (табл. 1); основными критериями при определении временных границ периодов являлись, во-первых, повторяемость положительных и отрицательных аномалий сроков ледообразования и, во-вторых, величина этих аномалий.

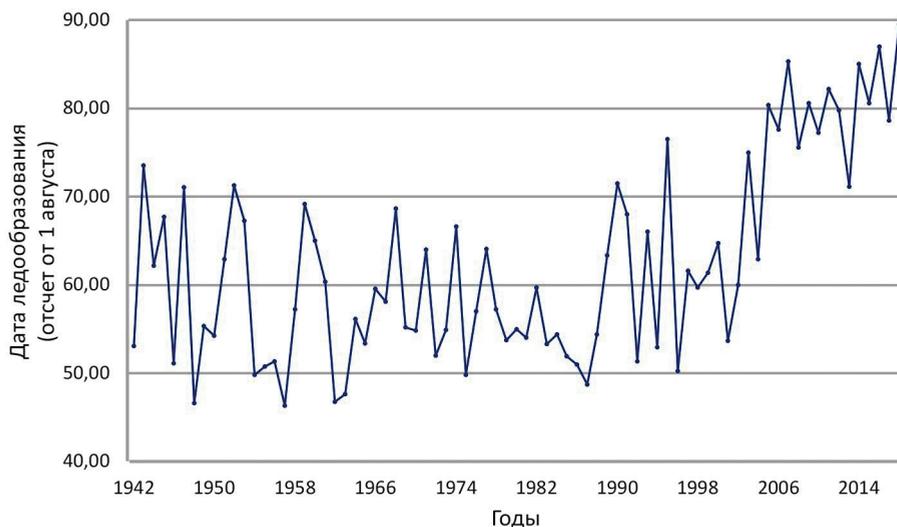


Рис. 3. Средняя дата устойчивого ледообразования на суммарной акватории морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского в течение 1942–2018 гг.

Fig. 3. Mean date of stable ice formation on the total area of the Laptev, East-Siberian and Chukchi Seas averaged for the period from 1942 till 2018

Таблица 1

Средне многолетние значения аномалий сроков устойчивого ледообразования (доли среднего квадратичного отклонения)

Период, годы	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море	Суммарная акватория
1942–1953	0,18	–0,14	–0,34	–0,11
1954–1988	–0,51	–0,59	–0,45	–0,60
1989–2002	–0,11	0,04	–0,23	–0,09
2003–2018	1,07	1,36	1,44	1,48

В течение 1942–1953 гг. на суммарной акватории арктических морей наблюдались условия осеннего ледообразования, близкие к средне многолетним; из 12 лет наблюдалось по 6 случаев положительных и отрицательных аномалий. По пространству суммарной восточной арктической акватории наблюдалась определенная

неоднородность в распределении знака аномалии; по разные стороны от Новосибирских о-вов формировались аномалии противоположного знака.

В течение 1954–1988 гг. в восточных арктических морях наблюдались преимущественно условия раннего осеннего ледообразования. Из 35 лет наблюдались 29 случаев отрицательной аномалии и только 6 случаев положительной аномалии. По сравнению с предыдущим многолетним периодом (1942–1953 гг.) наблюдались более однородные пространственные условия [15]: во всех арктических морях формировалась аномалия одного знака, при этом разброс показателей был крайне невелик: от $-0,45$ величины среднеквадратического отклонения (с.к.о.) в Чукотском море до $-0,59$ величины с.к.о. в Восточно-Сибирском море. Именно в течение этого периода был отмечен самый ранний срок ледообразования на суммарной акватории восточных арктических морей в 1957 г.

В течение 1989–2002 гг. на суммарной акватории арктических морей вновь наблюдались условия осеннего ледообразования, близкие к среднемуголетним; из 14 лет наблюдалось 6 случаев положительных и 8 случаев отрицательных аномалий. По сравнению с предыдущим средним периодом (1942–1953 гг.) пространственная неоднородность в распределении аномалии уменьшилась примерно вдвое.

В течение 2003–2018 гг. на суммарной акватории арктических морей наблюдались условия очень позднего осеннего ледообразования; причем положительная аномалия отмечалась во всех 16 случаях. Как и во время многолетнего периода раннего ледообразования, наблюдались относительно однородные пространственные условия: во всех восточных арктических морях формировалась аномалия одного знака, при этом наибольшие аномалии наблюдались в Чукотском море, а наименьшие — в море Лаптевых. Именно в течение этого периода был отмечен самый поздний срок ледообразования на суммарной акватории восточных арктических морей в 2018 г.

Таким образом, в течение непрерывных наблюдений продолжительностью примерно $3/4$ века, происходит реализация следующей цепочки многолетних ледовых преобразований: средние сроки ледообразования → ранние сроки ледообразования → средние сроки ледообразования → поздние сроки ледообразования. Четыре многолетних периода разбиваются на две группы — 2 периода средних условий (1942–1953 гг. и 1989–2002 гг.) и 2 периода аномальных условий (1954–1989 гг. и 2003–2018 гг.).

В XXI в. режим сроков устойчивого ледообразования стал существенно отличаться от природных условий предыдущего века. Начиная с 2003 года наблюдаются только положительные аномалии сроков устойчивого ледообразования, т.е. в течение 16 лет подряд. А начиная с 2005 года в 12 случаях из 14 отмечается такая величина положительной аномалии, которая ни разу не наблюдалась в течение всего XX в. Средняя аномалия за 14-летний период 2005–2018 гг. составляет $1,62$ величины с.к.о., а за 5-летний период 2014–2018 гг. — $1,92$ величины с.к.о., т.е. в течение 2000-х гг. сформировался новый период очень поздних сроков ледообразования, а в течение 2010-х гг. эти положительные аномалии продолжают постепенно увеличиваться.

Если анализировать сроки ледообразования для всей суммарной арктической акватории «от пролива до пролива», то начало периода позднего ледообразования приходится на осень 2005 г. Однако более подробный анализ, с учетом географического масштаба отдельных арктических морей, показывает, что период осеннего потепления начался на несколько лет раньше, а именно еще в 2003 г.

Весь ряд наблюдений может быть разделен на два периода: 1942–2002 гг. и 2003–2018 гг. Основными критериями определения границы между периодами являются, во-первых, устойчивые (повторяемость 100 %) положительные аномалии сроков ледообразования с 2003 г. и, во-вторых, средняя величина положительной аномалии после 2003 г., которая составляет 1,48 величины с.к.о.; такие постоянные во времени и значительные по величине аномалии ранее не наблюдались. Период 1942–2002 гг. характеризует особенности ледообразования в течение XX в., а период 2003–2018 гг. — в начале XXI в. Разница между сроками ледообразования этих двух многолетних периодов показывает основные изменения осеннего ледового режима восточных арктических морей, произошедшие от XX к XXI веку (рис. 4).

В среднем для трех арктических морей средний срок устойчивого ледообразования в XXI в. сместился в более позднюю сторону на 21,1 суток. Однако в протяженной зональной полосе от Северной Земли до Аляски наблюдаются существенные пространственные неоднородности в распределении этих аномалий сроков ледообразования.

Область наибольших отклонений сроков ледообразования, ограниченная изохроной 30 суток, располагается в восточной части исследуемой акватории и включает северную часть Чукотского и восточную часть Восточно-Сибирского морей. Абсолютно максимальные значения (до 45 суток) наблюдаются к северо-востоку от о. Врангеля, в северной части Чукотского моря вблизи 72–73-й параллели между 180° и 165° з.д.

Область наименьших отклонений сроков ледообразования, ограниченная изохроной 10 суток, располагается в южной части моря Лаптевых (южнее 74-й параллели).

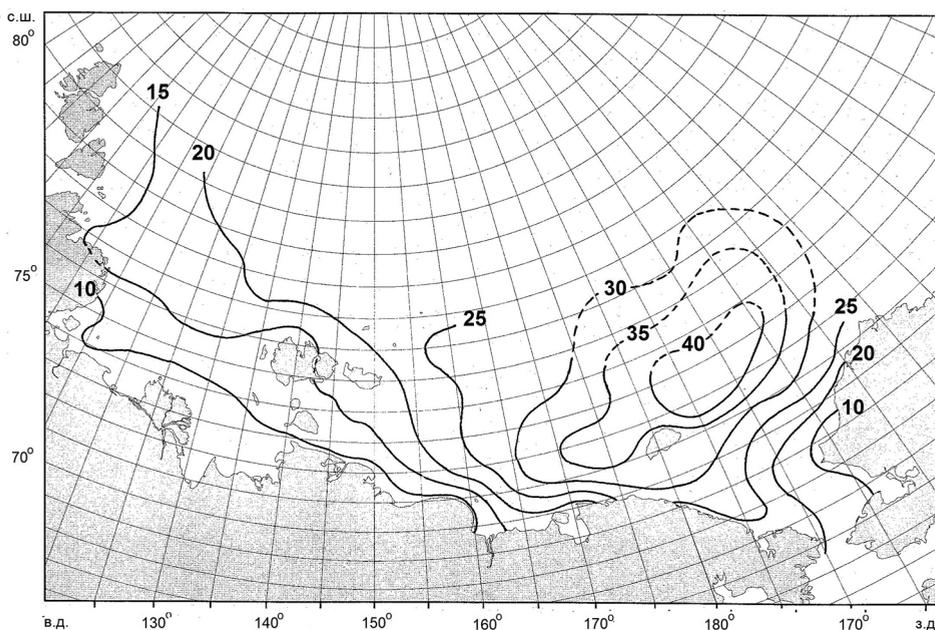


Рис. 4. Разница (сутки) в сроках устойчивого ледообразования в восточных морях Российской Арктики между периодами 2003–2018 гг. и 1942–2002 гг.

Fig. 4. Difference (in days) between the dates of stable ice formation in the Eastern Russian Arctic seas in 2003–2018 and those in 1942–2002

лели) и на юго-западном мелководье Восточно-Сибирского моря (также локальный фрагмент расположен у западного побережья Аляски). Абсолютно минимальное значение (до 5 суток) наблюдается на мелководье Оленёкского залива в море Лаптевых.

Восточно-Сибирское море является переходным буфером между восточной областью наибольших отклонений и западной областью наименьших отклонений, при этом граница между двумя областями, примерно равными по площади, проходит вблизи 160-го восточного меридиана и примерно совпадает с пространственным положением изохроны 25 суток.

По акватории Чукотского моря средний срок устойчивого ледообразования составил: в 1942–2002 гг. — 18 октября, а в 2003–2018 г. — 17 ноября, разница — 29,5 суток.

По акватории Восточно-Сибирского моря средний срок устойчивого ледообразования составил: в 1942–2002 гг. — 19 сентября, а в 2003–2018 г. — 13 октября, разница — 23,4 суток.

По акватории моря Лаптевых средний срок устойчивого ледообразования составил: в 1942–2002 гг. — 23 сентября, а в 2003–2018 гг. — 7 октября, разница — 14,2 суток.

То есть средний для акватории размах изменений сроков ледообразования в XXI в. в Чукотском море примерно в 2 раза больше, чем в море Лаптевых.

Другой особенностью является тот факт, что если в 1942–2002 гг. в среднем позже всего замерзало Восточно-Сибирское море, то в 2003–2018 гг. — море Лаптевых.

При сравнении гистограмм распределения сроков ледообразования в 1942–2002 гг. и 2003–2018 гг. наблюдаются две основные особенности изменения режима осеннего замерзания в XXI в. (рис. 5).

Отмечается общий сдвиг основных составляющих гистограммы с наибольшей повторяемостью примерно на две декады вправо, т.е. в сторону более поздних сро-

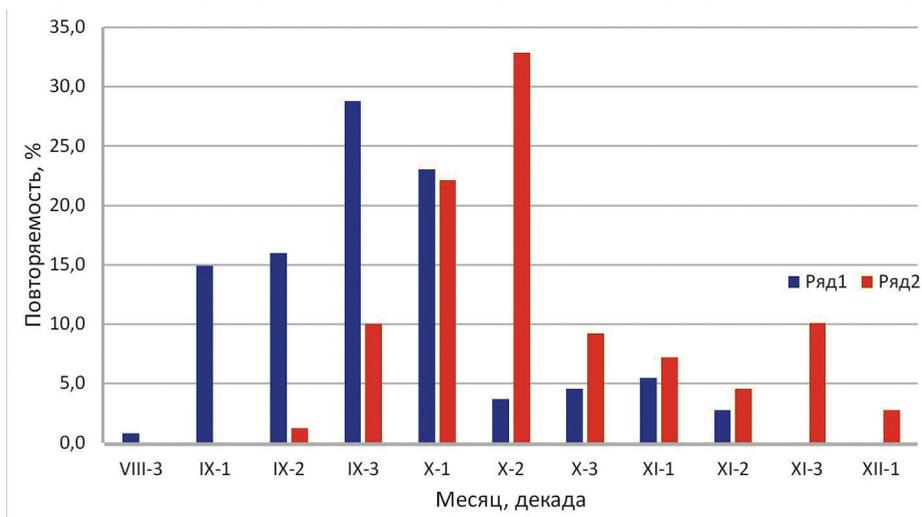


Рис. 5. Гистограмма распределения сроков устойчивого ледообразования на суммарной акватории восточных арктических морей в 1942–2002 гг. (ряд 1) и 2003–2018 гг. (ряд 2)

Fig. 5. Histogram of the dates of stable ice formation on the total area of eastern Arctic seas in 1942–2002 (1) and in 2003–2018 (2)

ков; при этом первые три декады активного прогрессирующего развития процесса замерзания, когда молодые льды быстро покрывают не менее половины площади акватории, остались очень схожими. В 1942–2002 гг. ледообразование начинается на севере арктических морей в первой декаде сентября, и через две декады (к третьей декаде сентября) изохроны ледообразования уже почти достигают северного побережья Якутии, так что 60,5 % покрываются осенними льдами. В 2003–2018 гг. ледообразование начинается в третьей декаде сентября и через две декады (ко второй декаде октября) изохроны ледообразования достигают северного побережья Якутии, так что 66,2 % покрываются осенними льдами. Максимум пространственной экспансии ледообразования отмечается в третьей декаде сентября (примерно 29 %) в XX в. и во второй декаде октября (примерно 33 %) — в XXI в.

После декады наибольшей пространственной экспансии ледообразования наблюдаются характерные изменения на заступающем этапе процесса замерзания — этот период длится примерно четыре декады (вторая декада октября — первая декада ноября) в XX в. и примерно 5 декад (третья декада октября — первая декада декабря) — в XXI в.; в первом случае ледообразование охватывает 16,5 % площади суммарной арктической акватории, во втором — 33,8 %. Соответственно, почти в 2 раза изменяется пространственная интенсивность процесса замерзания моря: в XX в. средняя скорость ледообразования составляет примерно 4 % площади суммарной акватории за декаду, в XXI в. интенсивность процесса замерзания составляет около 7 % площади суммарной акватории за декаду.

Таким образом, для суммарной восточной арктической акватории в XXI в. характерно, что в течение первой половины осеннего периода сроки ледообразования смещаются примерно на две декады в позднюю сторону, а в течение второй половины периода процесс ледообразования растягивается во времени, а интенсивность его развития по пространству уменьшается примерно вдвое.

ОСОБЕННОСТИ ПОЗДНЕГО ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ В 2003–2018 гг.

В режимном отношении интересно отметить, что переход от среднего фона ледообразования в XX в., который наблюдался в течение не менее полувека, к среднему фону ледообразования в XXI в., который наблюдается уже второе десятилетие, произошел в течение ограниченного по продолжительности, относительно короткого временного периода длиной всего в 5–6 лет. Так, линейный тренд срока ледообразования составил около 0,004 суток в год для ряда 1942–2002 гг., около 0,150 суток в год для ряда 2007–2018 гг. и около 4,333 суток в год для ряда 2003–2007 гг. То есть до 2002 г. и после 2007 г. линейный тренд был очень незначительным, однако между указанными годами он увеличился многократно.

Период от 2002 до 2007 г. представляет собой интервал времени, в течение которого был осуществлен переход от предыдущего, близкого к среднемуголетнему для всего XX в., периода замерзания моря к современному периоду осеннего потепления, для которого характерны аномально поздние сроки ледообразования. Так, если в 2001 г. средний срок ледообразования для всей суммарной акватории восточных арктических морей составил 53,7 (23 сентября), то в 2007 г. средний срок ледообразования составил уже 85,3 (24 октября); таким образом, в течение всего шести лет средний срок ледообразования сместился в позднюю сторону сразу на 31,6 суток, в среднем на 5–6 суток ежегодно. Однако этот переход от среднего к позднему ледообразованию не был однонаправленным, непрерывным и устойчивым, но представлял собой дискретный, прерывистый и неустойчивый процесс, основным

содержанием которого является четко отличающийся режим для нечетных и четных годов. В нечетный год — по сравнению с предыдущим четным — происходит заметное смещение сроков ледообразования в позднюю сторону: в 2003 г. — на 15 суток, в 2005 г. — на 17, в 2007 г. — на 8 (в среднем — на 13 суток). Напротив, в четный год по сравнению с предыдущим нечетным происходит возвратное смещение сроков ледообразования в раннюю сторону: в 2004 г. — на 12 суток, в 2006 г. — на 3 суток (в среднем на 7,5 суток). В результате формируется своеобразная пилообразная структура на общем положительном тренде: срок ледообразования в нечетный год растет по сравнению с предыдущим четным, а в четный год падает по сравнению с предыдущим нечетным. То есть переход от среднемноголетнего уровня ледообразования, характерного до 2002 г., к аномальному и устойчивому позднему, характерному после 2007 г., произошел за счет нечетных лет, при этом четный год (между нечетными) являлся некоторой обратной компенсацией.

Временный возврат к относительно ранним срокам ледообразования происходит: в 2004 г. — в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском, а в 2006 г. — в море Лаптевых. Во всех морях кроме Чукотского в четные годы сроки ледообразования наблюдаются в среднем примерно на 0,7–1,2 величины с.к.о. раньше, чем в нечетные годы. И только в Чукотском море и в четные годы не отмечается возвратных колебаний в сроках ледообразования. Причины этого явления, возможно, зависят от пространственного режима остаточных льдов в четные годы; исследования в этом направлении необходимо продолжить.

Таким образом, для переходного периода 2003–2007 гг. характерны следующие особенности:

- наибольшие положительные аномалии сроков устойчивого ледообразования локализованы на востоке исследуемой акватории; именно Чукотское море является исходным «центром», откуда началось распространение осеннего ледового потепления;

- переход на новый многолетний уровень позднего ледообразования произошел постепенно, в течение примерно 5 лет, с поступательно-возвратным режимом колебаний сроков ледообразования в нечетные/четные годы;

- возвратные колебания режима ледообразования в сторону относительно ранних сроков происходили прежде всего на акватории моря Лаптевых (и в меньшей степени в Восточно-Сибирском море).

16-летний период 2003–2018 гг., характерный для текущего режима ледообразования в XXI в., может быть разделен на три 5–6-летних периода в зависимости от географической локализации области наибольших аномалий сроков устойчивого ледообразования (табл. 2). Основным критерием выделения временных границ является пространственное — на востоке или на западе исследуемой акватории — расположение самых крупных по величине поздних аномалий ледообразования.

В течение 2003–2008 гг. наибольшие положительные аномалии сроков устойчивого ледообразования располагались на востоке, прежде всего в Чукотском море, а в море Лаптевых режим ледообразования мало отличался от среднемноголетнего; Восточно-Сибирское море по степени аномальности было ближе к Чукотскому. Также Чукотское море было единственной акваторией, где ежегодно в течение 6 лет величина аномалии не опускалась ниже значения 1,00 величины с.к.о. (как, например, это наблюдалось в Восточно-Сибирском море в 2004 г.).

**Среднемноголетние значения аномалий сроков устойчивого ледообразования
(доли с.к.о.) в течение 2003–2018 гг.**

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
Четные и нечетные годы в течение 2003–2007 гг.				
2003+2005+2007	0,70	1,76	1,57	1,57
2004+2006	–0,34	0,65	1,56	0,68
Четные и нечетные годы в течение 2014–2018 гг.				
2014+2016+2018	2,06	1,84	1,81	2,19
2015+2017	0,65	1,45	1,88	1,51

В течение 2009–2013 гг. наибольшие положительные аномалии сместились с востока на запад и наблюдались в море Лаптевых. В морях Восточно-Сибирском и Чукотском средняя аномалия уменьшилась по сравнению с предыдущим периодом на 20–30 % примерно до 1,0 величины с.к.о. В 2012 г. в Чукотском море и в 2013 г. в Восточно-Сибирском море сроки ледообразования примерно соответствовали многолетней (для 77-летнего ряда) норме.

В течение 2014–2018 гг. наибольшие аномалии, как и в 2003–2008 гг., вновь наблюдались в Чукотском море, однако и в двух остальных акваториях сохранялся достаточно высокий уровень положительных аномалий. В Чукотском море ежегодно в течение 5 лет положительная аномалия превышала порог в 1,5 величины с.к.о., а в Восточно-Сибирском море порог в 1,4 величины с.к.о. В 2017 г. в море Лаптевых сроки ледообразования примерно соответствовали многолетней (для 76-летнего ряда) норме.

Отметим, что в течение последнего периода 2014–2018 гг. также наблюдается некоторая двухлетняя цикличность. Для суммарной акватории трех морей в нечетные годы величина аномалии сроков ледообразования примерно на 1/3 меньше, чем в четные годы (прежде всего за счет акватории моря Лаптевых).

В течение 2003–2018 гг. для суммарной акватории морей происходит постепенное увеличение величины положительных аномалий. Это происходит за счет двух обстоятельств: во-первых, 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. и, во-вторых, сохранения уже достигнутой величины положительных аномалий в море Лаптевых и некоторого ее увеличения в морях Восточно-Сибирском и особенно в Чукотском море. Волна позднего потепления, возникнув в Чукотском море, сначала в своем пространственном движении достигла моря Лаптевых, а затем вернулась обратно, количественно сохранив и даже несколько увеличив степень своего развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Архив информации о сроках устойчивого ледообразования в 1942–2018 гг. на пространстве арктических восточных морей от 100° в.д. до 160° з.д. и от 66° до 81° с.ш. позволяет анализировать пространственные и временные особенности режима формирования осенних льдов в XX и начале XXI в. не только прибрежных

и мелководных вод, но и относительно глубоководных акваторий, расположенных вдали от материкового побережья.

2. При среднемноголетних условиях ледообразование растянуто во времени примерно на 8 декад, от начала сентября до середины ноября. Первые 4 декады, когда ледообразование от границы остаточных льдов достигает азиатского побережья, процесс замерзания развивается очень активно, так что к началу октября осенние льды покрывают уже около 80 % всей акватории; однако затем, когда изохроны приближаются к Берингову проливу, интенсивность ледообразования уменьшается примерно в 4 раза.

3. Многолетняя изменчивость сроков устойчивого ледообразования показывает, что в XXI в. наблюдается новое ледовое явление, которое ранее (в XX в.) не наблюдалось: каждый год начиная с 2003-го происходит устойчивое аномально позднее ледообразование в осенний период. Среднее смещение даты ледообразования в позднюю сторону составляет для совместной акватории трех морей около трех недель.

4. Пространственное распределение положительных аномалий сроков устойчивого ледообразования в среднем для периода 2003–2018 гг. характеризуется сильной неоднородностью. Наибольшие аномалии позднего ледообразования (до 35–40 суток) располагаются в Чукотском море и в восточной части Восточно-Сибирского моря; в море Лаптевых средняя величина аномалий примерно вдвое меньше. В географическом развитии позднего ледообразования присутствует определенный пространственный порядок.

5. Позднее ледообразование началось в 2003 г. на акватории Чукотского моря, в 2005 г. оно распространилось на акваторию Восточно-Сибирского моря и в 2009 г. — в море Лаптевых. Область наиболее крупных аномалий располагалась в 2003–2007 гг. к востоку, а в 2009–2013 гг. — к западу от Новосибирских о-вов; наконец, в 2014–2018 гг. наибольшие аномалии вновь располагаются в Чукотском море, но и в остальных морях сохраняется достаточно высокий уровень аномальности. Как следствие, период аномально позднего осеннего потепления, начавшись в 2003 г., продолжается до сих пор, и в 2018 г. был зафиксирован абсолютный максимум, т.е. самый поздний срок ледообразования на всем 77-летнем ряде наблюдений.

6. Переход от режима ледообразования XX в. к режиму XXI в. произошел в течение ограниченного по продолжительности, относительно короткого временного интервала длиной около 5 лет. Переход начался в 2003 г., завершился в 2007 г. и представлял собой поступательно-возвратный режим колебаний сроков ледообразования в нечетные и четные годы.

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 TSTP.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Спичкин В.А.* Основные природные факторы, определяющие аномалии сроков начала ледообразования в мелководных районах арктических морей // Труды ААНИИ. 1987. Т. 402. С. 81–92.
2. *Океанография и морской лед.* М.: Paulsen, 2011. 432 с.

3. Крутских Б.А. Особенности ледообразования в арктических морях // Труды ААНИИ. 1970. Т. 292. С. 106–117.
4. Карклин В.П. Повторяемость крупных аномалий сроков устойчивого ледообразования в арктических морях // Труды ААНИИ. 1987. Т. 402. С. 93–102.
5. 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.
6. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 149–160.
7. Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России. Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.
8. 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.
9. Гудкович З.М., Кириллов А.А., Ковалев Е.Г., Сметанникова А.В., Спичкин В.А. Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 348 с.
10. 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.: Гидрометеиздат, 1983. 288 с.
11. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под ред. Е.У. Миронова. СПб.: ААНИИ, 2010. 320 с.
12. 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.
13. Егоров А.Г. Долгосрочный прогноз сроков ледообразования в юго-западной части Карского моря // Информационный сборник Гидрометцентра РФ. 2005. № 31. С. 120–136.
14. Визе В.Ю. Основы долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей // Труды ААНИИ. 1944. Т. 190. 273 с.
15. Захаров В.Ф. Похолодание Арктики и ледяной покров арктических морей. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 95 с.

REFERENCES

1. 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. AARI. 1987, 402: 81–92. [In Russian].
2. *Okeanografiya i morskoi led*. Oceanography and sea ice. Moscow: Paulsen, 2011: 432 p. [In Russian].
3. Krutskich B.A. Peculiarities of ice formation in the Arctic seas. *Trudy AANII*. Proc. AARI. 1970, 292: 106–117. [In Russian].
4. Karklin V.P. Frequency of occurrence of large anomalies of the dates of stable ice formation in the Arctic seas. *Trudy AANII*. Proc. AARI. 1987, 402: 93–102. [In Russian].
5. 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.
6. 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*. Arctic and Antarctic Research. 2007, 75: 149–160. [In Russian].

7. *Dumanskaya 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].
8. *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].
9. *Gudkovich Z.M., Kirillov A.A., Kovalev E.G., Smetannikova A.V., Spichkin V.A.* *Osnovy metodiki dolgosrochnich ledovich prognozov dlja arkticheskikh 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].
10. *Gorbunov Yu.A., Karelin I.D., Kuznetsov I.M., Losev S.M., Sokolov A.L.* *Osnovy fiziko-statisticheskikh metodov ledovich prognozov i raschetov dlja arkticheskikh 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].
11. *Opasnye ledovye javleniya dlja sudohodstva v Arktike.* Dangerous ice conditions for shipping in the Arctic. E.U. Mironov eds. St. Petersburg: AARI, 2010: 320 p. [In Russian].
12. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniiakh klimata i ikh posledstviakh 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].
13. *Egorov A.G.* Long-range forecast of the dates of ice formation in the south-western Kara Sea. Information collection of the Hydrometeorological Center of the Russian Federation. 2005, 31: 120–136. [In Russian].
14. *Wiese V.Yu.* *Osnovy dolgosrochnnykh ledovykh prognozov.* Fundamentals of long-term ice forecasts. Moscow: Glavsevmorput Publishing, 1944: 274 p. [In Russian].
15. *Zakharov V.F.* *Pokholodanie Arktiki i ledianoi pokrov arkticheskikh morei.* Cold snap of the Arctic and ice cover of the Arctic seas. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976: 95 p. [In Russian].