

УДК 504.42 + 551.326.7

© В. Ю. Третьяков^{1,2}, С. В. Фролов¹, М. И. Сарафанов^{1,2}¹ ФГБУ «Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт», г. Санкт-Петербург² Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург
v_yu_tretyakov@mail.ru

ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ ПЛАВАНИЯ ПО МАРШРУТУ ОБСКАЯ ГУБА – БЕРИНГОВ ПРОЛИВ ЗА 1998–2018 ГОДЫ

Статья поступила в редакцию 20.02.2019, после доработки 15.07.2019

Приводятся методика и результаты обработки векторных ледовых карт из архива ААНИИ за период 1998–2018 гг. Получены ряды многолетней изменчивости суммарных протяженностей участков маршрута порт Сабетта – Берингов пролив в припае, в сплоченных льдах, в сплоченных льдах при наличии определенных возрастных категорий льдов и их частных концентраций, суммарной приведенной протяженности маршрута в старых и толстых однолетних льдах для десятидневных интервалов (декад) апреля и мая. Под термином «сплоченные льды» в статье понимаются дрейфующие льды общей сплоченностью 9, 9–10, 10 баллов за исключением случаев, когда они представлены исключительно начальными льдами толщиной до 10 см. Выполнена проверка рядов на наличие трендов методом интегральных кривых и проверка однородности рядов с помощью ранговых непараметрических критериев Уилкоксона–Манна–Уитни и Зигеля–Тьюки. Проанализировано более 4 тыс. значений протяженностей. Выявлено уменьшение суммарной протяженности участков маршрута в припае и в сплоченных льдах с наличием старых льдов, увеличилась протяженность пути в сплоченных льдах, в сплоченных льдах при наличии однолетних льдов средней толщины, в сплоченных льдах при наличии толстых однолетних льдов, в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых однолетних льдов 5 и более баллов, в сплоченных льдах с суммой частных концентраций толстых однолетних льдов и однолетних льдов средней толщины 5 и более баллов. Уменьшение приведенной протяженности пути плавания в старых льдах частично компенсируется увеличением практически на эту же величину приведенной протяженности пути плавания в однолетних толстых льдах.

Ключевые слова: изменчивость ледовых условий плавания.V. Yu. Tretyakov^{1,2}, S. V. Frolov¹, M. I. Sarafanov^{1,2}¹ The State Scientific Center of the Russian Federation “Arctic and Antarctic Research Institute”, St.-Petersburg, Russia² Institute of Earth Sciences, St.-Petersburg State University, St.-Petersburg, Russia

CLIMATIC CHANGES OF ICE NAVIGATION CONDITIONS ALONG OB BAY – THE BERING STRAIT ROUTE

Received 20.02.2019, in final form 15.07.2019

There is considered methodology and results of computer processing of vector ice maps of the AARI archive for the period 1998–2018. As a result of the maps processing, there were obtained long-standing series of total lengths of the Sabetta Port – the Bering Strait route legs within fast ice, within close floating ice, within the ice with presence of certain age categories of the ice and some particular concentrations of old ice and thick first-year ice for ten-days periods (decades) during April and May. The series were checked for the presence of trends by the method of integral curves, and were tested for heterogeneity using Wilcoxon–Mann–Whitney and Siegel–Tukey rank non-parametric criteria. There have been analyzed more than four thousand values of the lengths. We obtained the following conclusions: the lengths of the route within fast ice and within close floating ice with presence of old ice decreased. The lengths of the route within close floating ice, ones within close floating ice with presence of medium first-year ice and thick first-year ice increased. As well as there were increased the lengths of the route within close floating ice with partial concentration of thick first-year ice and total concentration of thick and medium first-year ice in five or more tenths. The decrease of the route length within old ice is partially compensated by the route length increase within thick first-year ice. The decrease and increase have almost the same values.

Keywords: dynamics of ice navigation conditions.

Ссылка для цитирования: Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Сарафанов М.И. Изменения ледовых условий плавания по маршруту Обская губа – Берингов пролив за 1998–2018 годы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 3. С. 65–75

For citation: Tretyakov V.Yu., Frolov S.V., Sarafanov M.I. Climatic changes of ice navigation conditions along Ob Bay – the Bering Strait route. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 3, 65–75

DOI: 10.7868/S2073667319030080

Введение

Эффективное хозяйствование требует развития арктической морской транспортной системы. Меры по реализации упомянуты в ряде государственных документов [1]. В ФГБУ «Арктический и Антарктический НИИ» все большее развитие получают работы, связанные с транспортировкой углеводородов на шельфе и в прибрежных районах [2].

Морские транспортные операции в Северном Ледовитом океане (СЛО) необходимы для: 1) транспортировки углеводородов; 2) перевозок рудных ископаемых и продуктов их переработки; 3) «северного завоза» [3]; обеспечения обороноспособности России; 4) проведения туристических круизов [4]. Планируется превращение Северного Морского Пути (СМП) в круглогодично функционирующую магистраль [5].

При компьютерном статистическом моделировании морских транспортных операций наряду с другими используется метод Монте-Карло [6–9]. При этом необходимо иметь статистические распределения параметров ледяного покрова, влияющих на условия плаваний и возможности возникновения аварийных ситуаций. Построение этих распределений выполняется по результатам обработки спутниковых снимков и специальных судовых ледовых наблюдений. В ААНИИ создан ряд методик и приложений для компьютерной обработки спутниковых снимков [10, 11] и созданных на их основе векторных ледовых карт [12]. Обработка снимков выполняется в Центре ледовой гидрометеорологической информации ААНИИ на основании данных следующих спутниковых систем [10]: 1) Sentinel-1 (ESA) – Instrument SAR, радиолокационный диапазон С (5,6 см), разрешение 5–100 м, полоса съемки 25–400 км; 2) Radarsat-2 Mission (Канада) – Instrument SAR, радиолокационный диапазон С (5,6 см), разрешение 1.6–100 м, полоса съемки 20–500 км; 3) NOAA Mission (США) – 4 спутника (№ 15, 17, 18, 19), Instrument AVHRR, 5 каналов (ТВ и ИК диапазоны), разрешение 1.1 км, полоса съемки 3000 км; 4) EOS Mission (США) – 2 спутника (TERRA & AQUA), Instrument MODIS, 36 каналов (ТВ и ИК диапазоны), разрешение 250–1000 м, полоса съемки 2330 км; 5) FY-3 (Китай) – Instrument MVISR, 10 каналов (ТВ и ИК диапазоны), разрешение 250–1000 м, полоса съемки 2400 км; 6) Suomi NPP (США) – Instrument VIIRS, 24 канала (ТВ и ИК диапазоны), разрешение 375–750 м, полоса съемки 2330 км.

Статистические распределения должны характеризовать отдельные десятидневные интервалы (декады). Выбор десятидневных интервалов для анализа ледовой обстановки объясняется особенностями создания шейпфайлов с ледовой информацией. Спутниковые снимки на акваторию моря объединяются в один файл изображения ледовой обстановки. Затем изображение векторизуется с созданием шейпфайла. Снимки выполнялись в разные даты, относящиеся к интервалу, не превышающему 10 сут. В большинстве случаев на месяц приходится 3 шейпфайла с ледовой информацией, иногда – 4 или даже 5. Однако для анализа внутригодовой и межгодовой изменчивости можно оперировать только данными, относящимися к декадам.

Характеристики плавания, полученные путем компьютерного моделирования (временные затраты плавания, вероятность аварийной ситуации и т.п.) должны рассматриваться как случайные величины. Причина: относящиеся к декадам природные характеристики ледовых условий плавания не повторяются неизменными, а имеют межгодовую изменчивость. Поэтому при компьютерном моделировании плаваний следует использовать подход Монте-Карло, позволяющий имитировать все многообразие природных условий в соответствии с их статистическими распределениями, и получать множество модельных решений. Обработка их результатов позволяет получать характеристики плавания как случайные величины, имеющие статистические распределения, математические ожидания (МО), средние квадратичные отклонения (СКО) и т.д. При планировании морских операций и их оперативном обеспечении следует использовать не математические ожидания (МО) параметров ледяного покрова и характеристик ледового плавания, а суммы МО с утроенными СКО.

Есть проблема правомерности использования данных за предыдущие годы. Будет ли тренд потепления продолжаться еще в течение ряда десятилетий или имеет место не связанная с антропогенными воздействиями цикличность климатических процессов, и уменьшение ледовитости скоро сменится ее увеличением [13]?

Цель исследования заключалась в определении межгодовой изменчивости ряда параметров ледяного покрова по маршруту плаваний «Обская губа – пролив Вилькицкого – Берингов пролив» за период 1998–2018 гг. по данным Архива ледовых карт ААНИИ и проверке существования выраженных трендов изменений. Этот маршрут является кратчайшим с учетом допустимых глубин для плаваний газозавозов серии «Кристоф де Маржери». Актуальность тематики определяется планированием создания морской транспортной системы для транспортировки нефти и сжиженного газа из Обской губы в страны тихоокеанского региона.

Обзор литературы

В статье J.C. Comiso [14] указано на увеличение площади льдов в 2008–2010 гг. по сравнению с 2007 г., но налицо тренд сокращения площади льдов, особенно старых. Согласно работе [15] тренд сокращения площади льдов в сентябре становится более крутым. Отмечено сокращение площади льдов по данным дистанционного зондирования [16]. Г.В. Алексеев [17] причиной изменений указывает 60-летний цикл колебаний приповерхностной температуры воздуха. Площадь льдов в сентябре увеличилась после 2012 г. Согласно [18] самым важным климатически значимым событием последних 20 лет в СЛО является сокращение летней площади льдов. В работе [19] приводятся результаты компьютерного моделирования сокращения площади льдов СЛО в XXI в. Спутниковые наблюдения [20] выявили два резких сокращения площади старых льдов: после 2007 и 2012 гг. Отмечена интенсификация уменьшения площади ледяных массивов Восточно-Сибирского моря [21]. Возможно, наблюдающееся улучшение ледовых условий плавания в СЛО сменится похолоданием и осложнением ледовой обстановки [22–25]. Есть и прогнозы беспрецедентного сокращения площади ледяного покрова [26]. Часто сокращение площади льдов СЛО в соответствии с моделями изменения климата меньше, чем наблюдаемое в реальности [27]. Ожидают, что потепление СЛО приведет к значительному улучшению условий плавания [28]. Однако сокращение площади льдов может привести и к их ухудшению из-за увеличения айсберговой опасности при интенсификации поступления айсбергов с ледников островов СЛО в сочетании с уменьшением площади, сплоченности и толщины дрейфующих льдов [29]. Отмечены значительные межгодовые вариации ледовых условий [30]. Потепление СЛО приводит к изменениям морских экосистем [31]. Важнейшими индикаторами климатических изменений являются параметры ледяного покрова [30]. Для добычи нефти и газа на шельфе, а также их транспортировки ключевое значение имеют именно изменения ледовой обстановки [32].

Проект компании «Ямал СПГ» предполагает регулярную транспортировку углеводородного сырья из порта Сабетта в Обской губе в страны тихоокеанского региона. Транспортировка выполняется танкерами ледового класса без ледокольной проводки. Уже сейчас транспортировка осуществляется 6-ю танкерами типа «Кристоф де Маржери» [33].

По данным спутникового мониторинга [34] доказано существенное улучшение ледовых условий плавания по СМП. По результатам моделирования [35] проанализирована доступность СМП для судов разных классов, отмечена большая неопределенность возможностей плавания. По спутниковым данным и ансамблю климатических моделей СМП в XXI в. рассматривается как потенциально судоходная трасса с минимизацией ледокольной поддержки [36]. На основании климатических моделей утверждается о резком увеличении транспортной доступности СЛО к середине XXI в. [37]. Большая роль в обеспечении судоходства по СМП принадлежит ФБГУ «Администрация Северного Морского Пути». На ее сайте приводятся текущие ледовые карты ААНИИ, прогнозы ледовых условий, карты типов ледовых условий для судов 13-ти ледовых классов, показывающие возможность самостоятельного плавания или необходимость ледокольной проводки.

Методика исследований

Выполнена обработка данных за период максимального развития ледяного покрова – апрель и май. Выбор этого периода обусловлен тем, что в это время морские льды на трассах Северного Морского Пути достигают максимальной толщины и, соответственно, наблюдаются наиболее тяжелые ледовые условия плавания. Обработка ледовых карт выполнялась в среде ArcGIS. При помощи написанных на языке Python программ производилось перепроецирование слоев ледовых карт и их объединение, пересечение участками маршрута плаваний, выполнение атрибутивных запросов, объединение линейных объектов, удовлетворяющих определенным условиям, расчеты протяженностей линейных объектов.

В таблицах атрибутов шейпфайлов ледовых карт информация о параметрах ледяного покрова включает общую сплоченность, возрастные градации льдов, категории размеров льдин (форму) и частные концентрации возрастных категорий льдов. В соответствии с российской номенклатурой морских льдов [38] выделяются 3 возрастные градации. Поэтому присутствуют 3 поля со значениями частных концентраций отдельных категорий льдов. В каждой возрастной категории выделяются 3 градации форм льда, т.е. размеров отдельных дрейфующих льдин, и соответствующие им 3 градации возраста льда.

Проанализирована межгодовая изменчивость суммарных протяженностей участков маршрута в припае, в сплоченных льдах, суммарных протяженностей участков маршрута в сплоченных льдах при наличии старых, толстых однолетних льдов, однолетних льдов средней толщины, а также суммарных

протяженностей участков маршрута в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых льдов 5 и более баллов и суммой частных концентраций толстых и средних однолетних льдов 5 и более баллов для 6 декад апреля-мая. На рис. 1 представлена карта маршрута плаваний, по которому выполнена обработка ледовой информации.

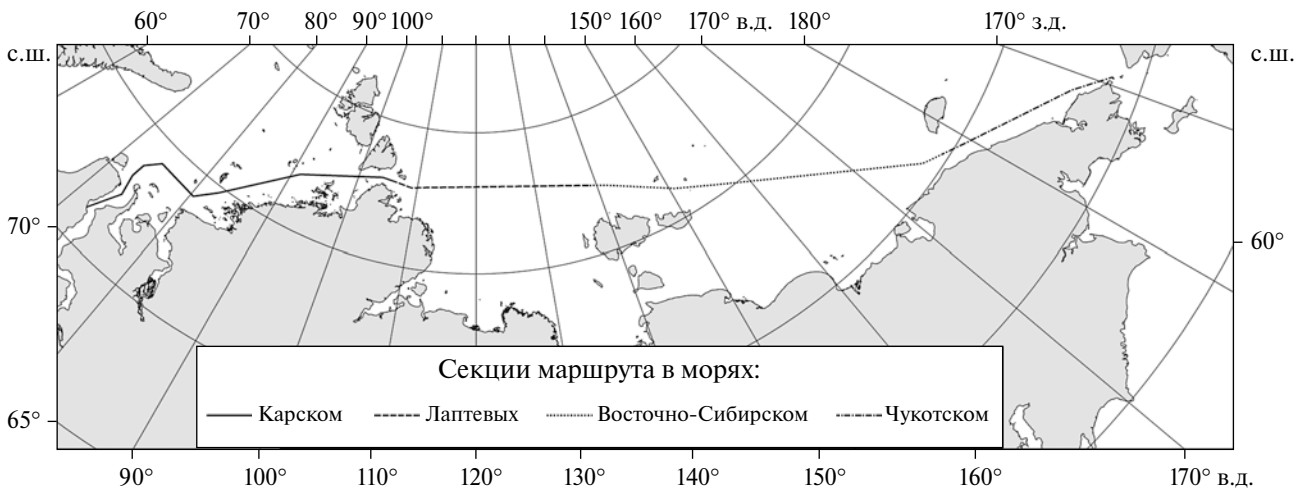


Рис. 1. Маршрут плаваний «Обская губа – Берингов пролив».

Fig. 1. Navigation route “Obskaya Guba – Bering Strait”.

Зачастую к одной декаде относились 2 периода дистанционного зондирования, по результатам которого созданы ледовые карты. В таких случаях выполнялось осреднение значений с формированием новых шейпфайлов, в атрибутивные таблицы которых записывались средние значения протяженностей для декад в целом. Далее для каждой декады апреля-мая создавались шейпфайлы, атрибутивные таблицы которых содержали значения протяженностей за весь период 1998–2018 гг. Для участков маршрута в каждом из 4-х морей (Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском, Чукотском) было получено по 860 значений протяженностей. Они рассчитаны для 6 декад апреля и мая каждого из 21 года. Это протяженности маршрута плавания в: 1) в припае; 2) в сплоченных льдах; 3) в сплоченных льдах с наличием однолетних льдов средней толщины; 4) в сплоченных льдах с наличием толстых однолетних льдов; 5) в сплоченных льдах с наличием старых льдов; 6) в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых однолетних льдов 5 баллов и более; 7) в сплоченных льдах с суммой частных концентраций толстых и средних однолетних льдов 5 баллов и более. Число 860 объясняется отсутствием некоторых данных за 2002 г. На рис. 2 представлена карта участков маршрута с суммой частных концентраций толстых и средних однолетних льдов 5 и более баллов. Суммарные протяженности участков маршрута в разных морях, отвечающие одним и тем же условиям запросов и относящиеся к одинаковым декадам одних и тех же лет, складывались, и с помощью компьютерных программ формировались ряды межгодовой изменчивости суммарных протяженностей участков маршрута с определенными параметрами ледяного покрова для всего маршрута в целом.

В среде MathCAD выполнялась статистическая обработка полученных результатов. Ряды межгодовой изменчивости подекадных значений суммарных протяженностей участков маршрута, удовлетворяющих определенным ледовым условиям, проверялись на присутствие или отсутствие тренда изменений методом интегральных кривых (накопленных сумм) [39]. Суть метода: на графике по оси X откладываются года, по оси Y – накопленные суммы значений, т.е. суммы значений параметра за все годы от первого до данного, включая последний. Точки графика соединяются линией. Если ее форма близка к прямой, то выраженный тренд отсутствует. Присутствие на линии изломов служит признаком тренда межгодовой изменчивости и неоднородности ряда исходных значений. Затем ряды исходных значений подразделялись на 2 части по местам наиболее ярко выраженных изломов, при отсутствии последних – поровну. Количество элементов (21) в числовых рядах межгодовой изменчивости характеристик маршрута было недостаточным для их более детального разбиения на части из-за невозможности в этом случае применять статистические критерии однородности [40–42]. Далее выполнялась проверка рядов на однородность при помощи ранговых непараметрических критериев

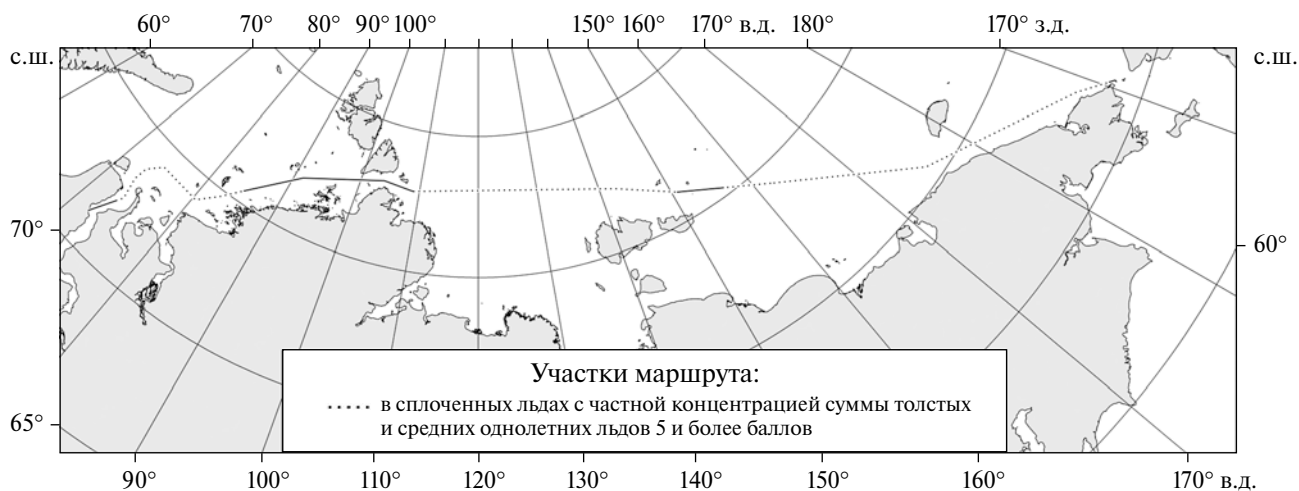


Рис. 2. Участки маршрута с суммой частных концентраций толстых и средних однолетних льдов 5 и более баллов, 2-я декада мая 2018 г.

Fig. 2. Legs of the route with summary concentration of thick and medium first-year ice in five or more tenths, the second ten-day period of May 2018.

Уилкоксона–Манна–Уитни и Зигеля–Тьюки. Для каждого из критериев рассчитывалась величина верности в процентах нулевой гипотезы о принадлежности двух частей ряда к одной генеральной совокупности, т.е. об отсутствии значимых изменений значений за период 1998–2018 гг. Ряд считался неоднородным, если гипотеза об однородности ряда опровергалась хотя бы одним из критериев, или если хотя бы по одному из критериев нулевая гипотеза однородности подтверждалась с вероятностью, меньшей 50%. Статистические характеристики двух частей рядов сравнивались между собой для выявления направленности изменений.

Рассчитаны значения суммарных приведенных протяженностей участков маршрута в старых и толстых однолетних льдах. Приведенная протяженность льдов определенной возрастной градации на участке маршрута рассчитывается умножением протяженности этого участка на долю льдов этой градации.

Результаты исследования

Результаты проверки рядов межгодовой динамики протяженностей на однородность представлены в табл. 1. Видно, что большинство рядов неоднородны. В табл. 2 приводятся результаты сравнения средних значений протяженностей в первой и второй частях рядов. Для большинства возрастных градаций льдов наблюдается увеличение значений протяженностей во вторых половинах числовых рядов.

Таблица 1

Результаты проверки рядов протяженностей на однородность
The results of the length series testing for homogeneity

Протяженность маршрута плавания	Число рядов		% неоднородных рядов
	однородных	неоднородных	
В припае	0	6	100
В сплоченных льдах	0	6	100
В сплоченных льдах с наличием льдов следующих градаций возраста:			
однолетних средних	0	6	100
однолетних толстых льдов	2	4	67
старых льдов	3	3	50
В сплоченных льдах с частной концентрацией 5 баллов и более:			
толстых льдов	0	6	100
суммы толстых и средних льдов	0	6	100

Результаты сравнения первой и второй половин рядов
The results of comparison of the first and second halves of the series

Протяженность маршрута плавания	Число неоднородных рядов с		Общая направленность изменений
	уменьшением протяженности	увеличением протяженности	
В припае	6	0	уменьшение
В сплоченных льдах	0	6	увеличение
В сплоченных льдах с наличием льдов следующих градаций возраста:			
однолетних средних	0	6	увеличение
однолетних толстых льдов	0	4	увеличение
старых льдов	3	0	уменьшение
В сплоченных льдах с частной концентрацией 5 баллов и более:			
толстых льдов	0	6	увеличение
суммы толстых и средних льдов	0	6	увеличение

На рис. 3 представлена ядерная оценка плотности распределения протяженностей маршрута в сплоченных льдах при наличии старых льдов по маршруту в апреле и мае. Этот график представляет собой «улучшенную частотную гистограмму». График построен в среде разработки «R». Видно уменьшение протяженности маршрута в сплоченных льдах при наличии старых льдов. В 2009–2018 гг. во время максимального развития ледяного покрова старые льды все реже появляются на маршруте, а максимальные значения суммарных протяженностей участков маршрута с присутствием старых льдов едва превышают 500 морских миль, тогда как в период 1998–2008 гг. старые льды встречались на большей части маршрута.

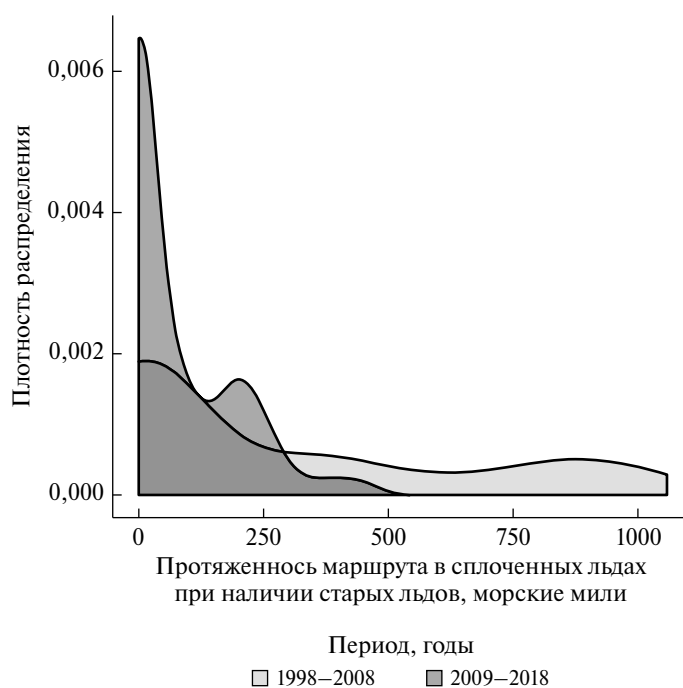


Рис. 3. Ядерная оценка плотности распределения суммарной протяженности участков маршрута в сплоченных льдах при наличии старых льдов в апреле и мае.

Fig. 3. Kernel density of distribution of the route length within close floating ice with presence of old ice in April and May.

При присутствии на маршруте старых льдов их частная концентрация в большинстве случаев не превышала 2–3 балла. В 1998, 1999 и в 2001 гг. частная концентрация старых льдов достигала 9 баллов, а суммарная протяженность таких участков маршрута в Восточно-Сибирском море в майские декады превышала 200 морских миль. Однако уже в 2003 и 2004 гг. старые льды на маршруте исчезли, а в последующие годы частные концентрации старых льдов в сплоченных льдах не превышали 3–5 баллов. Редкое появление старых льдов на маршруте в последние годы, вероятно, объясняется усилением циклонической активности и ускорением трансарктического дрейфа льдов в Арктическом бассейне. В 2014 г. на маршруте в Карском море в апреле и мае были обнаружены участки маршрута с наличием старых льдов. В море Лаптевых участки маршрута с присутствием старых льдов были отмечены во все декады апреля 2018 г. Суммарная протяженность участков маршрута с наличием старых льдов в море Лаптевых в 1998–2007 гг. составила 421,1 морских миль, в 2008–2018 гг. — 296,2 морских миль.

Уменьшение средней приведенной протяженности пути плавания в старых льдах по всему маршруту в апреле и мае на 160 морских миль при сравнении периодов 1998–2007 гг. и 2008–2018 гг. частично компенсируется увеличением практически на эту же величину (166 морских миль) приведенной протяженности пути плавания в толстых однолетних льдах. Прочность толстого однолетнего и старого льда практически одинакова. Поэтому в случае одинаковой толщины ровного толстого однолетнего и старого льда можно было бы говорить о полной компенсации. Однако в апреле-мае в общем случае толщина ровного старого льда больше толщины ровного толстого однолетнего, т.к. рост в течение зимы (начиная с октября-ноября) толщины однолетнего льда начинается с 1–2 см, а старого – с большей толщины. Величина этой начальной «форы» зависит от того, до какой толщины старый лед стоял за период летнего таяния. Однако наибольшую трудность для плавания в сплоченных льдах представляют не ровные льды, а гряды торосов. В большинстве случаев торосы образуются в молодых и тонких однолетних льдах, и они состоят из отдельных блоков такой же толщины, что и «исходные льды». Но со временем в грядах торосов отдельные блоки смерзаются в консолидированный слой, представляющий серьезное препятствие при преодолении ледоколом гряды торосов. Обнаружены взаимосвязи между суммой градусо-дней мороза, толщиной ровного льда и толщиной консолидированного слоя гряд торосов [43, 44]. В общем случае толщины консолидированного слоя гряд торосов в старых льдах больше, чем в однолетних льдах. Поэтому «замещение» старых льдов толстыми однолетними льдами только «частично компенсирует» трудность ледового плавания.

Обсуждение результатов

Эксплуатация морской транспортной системы «Обская губа – пролив Вилькицкого – Берингов пролив» требует дальнейшего совершенствования как компьютеризированных систем оперативной поддержки морских транспортных операций, так и компьютерных моделей оценки рисков возникновения аварийных ситуаций за весь период эксплуатации морской транспортной системы. Именно применение метода Монте-Карло в компьютерном имитационном моделировании случайных процессов позволяет использовать статистические параметры ледяного покрова. При имитации плаваний нельзя оперировать только средними значениями параметров, необходимо учитывать все их возможные значения с вероятностями, соответствующими статистическим распределениям параметров. Выполнив достаточно большое количество модельных расчетов, получаем объективный результат в виде случайной величины со всеми ее характеристиками: МО, СКО и т.д. Системы оперативной поддержки морских транспортных операций и компьютерные модели оценки рисков возникновения аварийных ситуаций требуют статистических распределений характеристик ледяного покрова для их использования при моделировании плаваний с применением метода Монте-Карло. В частности, нужны распределения суммарных протяженностей участков маршрута при определенных ледовых условиях. Результаты этого исследования будут использованы для построения таких статистических распределений.

При компьютерном моделировании применение подхода Монте-Карло для расчетов времени плавания судна по всему маршруту позволит более объективно оценивать затраты времени, а время прохождения маршрута должно рассматриваться в качестве случайной величины со статистическим распределением, МО и СКО. Возможны два подхода для построения компьютерных моделей расчета затрат времени в зависимости от характеристик ледяного покрова: эмпирико-статистический и аналитический. При первом подходе используется значительный объем судовых ледовых наблюдений, достаточный для построения регрессионной зависимости скорости движения судна определенного типа от характеристик ледяного покрова. Разумеется, этот подход годится только для оперативной поддержки морских транспортных операций, выполняемых судами уже давно существующих типов. Естественно, в этих случаях также может использоваться и аналитический подход. При планировании и поддержке плаваний судов вновь созданных типов необходимо использовать аналитические модели, которые строятся по проектным характеристикам прочности корпусов судов и прочностным характеристикам ледяного покрова. Эмпирико-статистические модели для новых типов судов строить невозможно, т.к. еще просто нет данных о параметрах движения этих судов во льдах.

Результаты выполненного исследования могут использоваться как при применении эмпирико-статистических, так и при построении аналитических моделей плавания судов в условиях существования ледяного покрова.

Заключение

В результате исследования сделаны следующие выводы:

1) За 1998–2018 гг. в период максимального развития ледяного покрова в апреле–мае уменьшилась суммарная протяженность участков маршрута плаваний «Обская губа – пролив Вилькицкого – Берингов пролив» в припае и в сплоченных льдах при наличии старых льдов;

2) При этом увеличилась суммарная протяженность участков маршрута плаваний в сплоченных льдах, в сплоченных льдах при наличии толстых однолетних льдов, однолетних льдов средней толщины;

3) Увеличилась суммарная протяженность пути в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых однолетних льдов 5 и более баллов, в сплоченных льдах с суммой частных концентраций толстых однолетних льдов и однолетних льдов средней толщины 5 и более баллов;

4) Уменьшение приведенной протяженности пути плавания в старых льдах частично компенсируется увеличением практически на эту же величину приведенной протяженности пути плавания в толстых однолетних льдах.

Статья написана в рамках выполнения научно-исследовательской работы по теме 1.5.3.6 ЦНТП «Моря российской Арктики в современных климатических условиях».

Литература

1. Лебедев Г. Модернизация инфраструктуры Арктической морской транспортной системы // Морской сборник. 2013. № 10. С. 40–45.
2. Актуальное интервью. Приоритетные направления арктических исследований определяются вызовами, с которыми сталкивается общество при освоении высоких широт. Интервью с директором ГНЦ РФ ААНИИ Александром Сергеевичем Макаровым // Российские полярные исследования. 2018. № 1. С. 3–8.
3. Лебедев Г., Кудрявцев О. Проблемы снабжения северных регионов России // Морской сборник. 2018. № 7. С. 65–70.
4. Буянов А.С., Петров В.А., Чигишева А.В. Экспедиционные круизы в полярных регионах // Техническая эксплуатация морского транспорта. 2014. СПб. С. 95–100.
5. Буянов А., Лихачева М., Штрек А. Условия реализации проекта создания Арктической контейнерной линии // Морские вести России. Арктические перевозки. URL: http://www.morvesti.ru/tems/detail.php? ID=62459&phrase_id=260872 (дата обращения: 16.02.2019).
6. Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Клейн А.Э. Оценка рисков плаваний с использованием измерений цифрового телевизионного комплекса // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 1 (78). Доклады научной конференции «Моря высоких широт и морская криосфера» 25–27.10.07. СПб., ААНИИ. С. 104–111.
7. Третьяков В.Ю., Фролов С.В. Модель оценки риска плаваний судов во льдах // Метеорологический вестник. 2009. № 4(5). С. 1–36.
8. Третьяков В.Ю., Фролов С.В. Модель оценки рисков транспортных операций в условиях ледяного покрова // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 3(97). С. 21–27.
9. Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Терентьева Д.В. Моделирование экологических рисков загрязнения окружающей среды углеводородами при их транспортировке в Карском море танкерами // Метеорологический вестник. 2016. Т. 8, № 1. С. 59–87.
10. Бресткин С.В., Бычков Ю.Д., Девятаев О.С., Фоломеев О.В. Обеспечение гидрометеорологической безопасности в Арктическом регионе // Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктическом регионе. Безопасный город в Арктике» 2016. МЧС России. С. 68–72.
11. Миронов Е.У., Смирнов В.Г., Бычкова И.А. и др. Экспериментальный аппаратно-программный комплекс спутникового мониторинга и прогноза ледовой обстановки // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 2 (212). С. 15–26.
12. Tretyakov V., Fedorova I., Frolov S., Belozerski G., Kulesh V. Liquid gas traffic in the Arctic under climate warming // 18th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM2018. Conference proceedings. V. 18, Issue 5.2. Ecology and environmental protection. Albena, Bulgaria, 2018. P. 585–592.
13. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Региональные особенности климатических изменений морского ледяного покрова в XX – начале XXI века и их причины // Лед и Снег. 2011. № 3 (115). С. 91–98.
14. Comiso J.C. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover // J. Climate. 2012. V. 25. P. 1176–1193. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00113.1
15. Serreze M.C. and Stroeve J. Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting // Phil. Trans. R. Soc. A. 2015. V. 373. DOI: 10.1098/rsta.2014.0159

16. *Comiso J.C., Meier W.N. and Gersten R.* Variability and trends in the Arctic sea ice cover: results from different techniques // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122. P. 6883–9000.
17. *Алексеев Г.В.* Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундаментальная и прикладная климатология.* 2015. № 1. С. 11–26.
18. *Репина И.А., Иванов В.В.* Применение методов дистанционного зондирования в исследовании динамики ледового покрова и современной климатической изменчивости Арктики // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2012. Т. 9, № 5. С. 89–103.
19. *Катцов В.М., Порфирьев Б.Н.* Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // *Арктика: экология и экономика.* 2012. № 2 (6). С. 66–79.
20. *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. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-28-41
21. *Юлин А.В., Шаратунова М.В., Павлова Е.А., Иванов В.В.* Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2018. Т. 64, № 3. С. 229–240.
22. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М.* Региональные особенности климатических изменений морского ледяного покрова в XX – начале XXI века и их причины // *Лед и Снег.* 2011. № 3 (115). С. 91–98.
23. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М.* Шестидесятилетняя цикличность в изменениях климата полярных регионов // *Материалы гляциологических исследований.* 2008. № 105. С. 158–165.
24. *Цой Л.Г.* Опыт тяжелых арктических навигаций // *Морские вести России.* URL: <http://www.morvesti.ru/tems/detail.php?ID=73102> (дата обращения: 24.01.2019).
25. *Ашик И.М., Иванов В.В., Кассенс Х., Махотин М.С., Поляков И.В., Тимохов Л.А., Фролов И.Е., Хёлеманн Й.* Основные результаты океанологических исследований Северного Ледовитого океана в последнее десятилетие // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2015. № 1(103). С. 42–56.
26. *Lars H. Smedsrud, Igor Esau, Randi B. Ingvaldsen, Tor Eldevik, Peter M. Haugan, Camille Li, Vidar S. Lien, Are Olsen, Abdirahman M. Omar, Odd H. Ottera, Bjorg Risebrobakken, Anne B. Sando, Vladimir A. Semenov, Svetlana A. Sorokina.* The role of the Barents Sea in the Arctic climate system // *Reviews of Geophysics.* 2013. V. 51, Issue 3. P. 415–449.
27. *Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Пнюшков А.В., Балакин А.А.* Изменения климата в морской Арктике в начале XXI века // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2010. № 3(86). С. 22–34.
28. *Данилов А.И., Алексеев Г.В., Клепиков А.В.* Последствия изменения климата для морской деятельности в Арктике // *Лед и Снег.* 2014. Т. 54, № 3. С. 91–99.
29. *Солдатенко С.А., Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Вязилова А.Е., Харланенкова Н.Е.* Об оценке климатических рисков и уязвимости природных и хозяйственных систем в морской арктической зоне РФ // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2018. Т. 64, № 1. С. 55–70.
30. *Матишов Г.Г., Дженюк С.Л., Мусеев Д.В.* Климат и большие экосистемы Арктики // *Вестник Российской Академии Наук.* 2017. Т. 87, № 2. С. 110–120.
31. *Paul Wassmann, Carlos M. Duarte, Susana Agustí, Mikael K. Sejr.* Footprints of climate change in the Arctic marine ecosystem // *Global Change Biology.* 2011. V. 17(2). P. 1235–1249.
32. *Ковалевский Д.В., Алексеев Г.В., Бобылев Л.П., Данилов А.И.* Последствия изменений климата для некоторых видов хозяйственной деятельности в Арктике // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2012. № 4(94). С. 90–98.
33. Сайт информационного агентства «Вести. Экономика», URL: <https://www.vestifinance.ru/articles/103595> (дата обращения: 24.01.2019).
34. *Шалина Е.В.* Изменение ледовитости Северных морей России и оценка доступности Северного морского пути по данным спутникового мониторинга // *Исследование Земли из космоса.* 2015. № 4. С. 67–78.
35. *Stephenson S.R., Lawson W. Brigham & Laurence C. Smith.* Marine accessibility along Russia’s Northern Sea Route // *Polar Geography.* 2014. V. 37:2. P. 111–133. DOI:10.1080/1088937X.2013.845859
36. *Khon V., Mokhov I., Semenov V.* Transit navigation through Northern Sea Route from satellite data and CMIP5 simulations // *Environmental Research Letters.* 2017. V. 12(2). DOI:024010 10.1088/1748–9326/aa5841
37. *Stephenson S.R., Wang W., Zender C.S., Wang H., Davis S.J., Rasch P.J.* Climatic Responses to Future Trans-Arctic Shipping // *Geophysical Research Letters.* 2018. V. 45(18). P. 9898–9908.
38. Номенклатура морских льдов. Условные обозначения для ледовых карт. 1974. Л., ГМИ. 77 с.
39. Государственное учреждение «Государственный гидрологический институт». Стандарт организации СТО ГГИ 52.08.41–2017, «Основные гидрологические характеристики при нестационарности временных рядов, обусловленной влиянием климатических факторов, Рекомендации по расчету». СПб.: 2017
40. *Дружинин В.С., Сикан А.В.* Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебное пособие. Направление «Гидрометеорология». Специальность «Гидрология» / Под ред. А.М. Владимирова. СПб.: Изд. РГГМУ, 2001. 168 с.

41. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебник. Специальность «Гидрология» направления подготовки «Гидрометеорология». СПб.: Изд. РГГМУ, 2007. 279 с.
42. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник. СПб.: Изд. РГГМУ. 2008. 408 с.
43. Roman B. Guzenko, Yevgeny U. Mironov, Ruslan I. May etc. Morphometry and Internal Structure of Ice Ridges in the Kara and Laptev Seas // Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference Honolulu, Hawaii, USA, June 16–21, 2019. P. 647–654.
44. Evgenii Salganik, Knut Vilhelm Høyland, Aleksey Shestov. Thermodynamics and Consolidation of Ice Ridges for Laboratory Scale // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11–16, 2017, Busan, Korea.

References

1. Lebedev G. Modernization of the infrastructure of the Arctic Maritime Transport System. *Morskoy Sbornik*. 2013, 10, 40–45 (in Russian).
2. Actual interview. Priority areas of Arctic research are determined by the challenges faced by society in the development of high latitudes. Interview with Alexander Sergeevich Makarov, Director of the SSC RF AARI. *Rossijskie Polyarnye Issledovaniya*. 2018, 1, 3–8 (in Russian).
3. Lebedev G., Kudryavtsev O. Problems of supplying the northern regions of Russia. *Morskoy Sbornik*. 2018, 7, 65–70 (in Russian).
4. Buyanov A.S., Petrov V.A., CHigisheva A.V. Expeditionary cruises in the Polar Regions. *Tekhnicheskaya Ekspluatatsiya Morskogo Transporta*. 2014, SPb., 95–100 (in Russian).
5. Buyanov A., Lihacheva M., SHtrek A. Terms of the project for the creation of the Arctic container line. *Morskije vesti Rossii. Arkticheskie perevozki*. URL: http://www.morvesti.ru/tems/detail.php? ID=62459&sphrase_id=260872 (date of access: 02.16.2019) (in Russian).
6. Tretyakov V.Yu., Frolov S.V., Klein A.E. navigation risk assessment with use of digital television complex measurements. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2008, 1 (78), 104–111 (in Russian).
7. Tretyakov V.Yu., Frolov S.V. Model of an estimation of risk of navigations of vessels in ices. *Meteorological bulletin*. 2009, 4(5), 1–36 (in Russian).
8. Tretyakov V.Yu., Frolov S.V. Model of an estimation of navigation risks in drifting ice. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2013, 3 (97), 21–27 (in Russian).
9. Tretyakov V.Yu., Frolov S.V., Terentyeva D.V. Simulation of ecological risks of environment pollution by hydrocarbons during their transportation within the Kara Sea by tankers. *Meteorological Bulletin*. 2016, 8, 1, 59–87 (in Russian).
10. Brestkin S.V., Bychenkov Yu.D., Devyataev O.S., Folomeev O.V. Ensuring hydrometeorological safety in the Arctic region. *Materials of the International Scientific-Practical Conference “Problemy preduprezhdeniya i likvidatsii chrezvychajnyh situacij v Arkticheskom regione. Bezopasnyj gorod v Arktike”*. 2016, MCHS Rossii, 68–72 (in Russian).
11. Mironov E.U., Smirnov V.G., Bychkova I.A. Experimental hardware-software complex for satellite monitoring and ice forecasting. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2017, 2(212), 15–26 (in Russian).
12. Tretyakov V., Fedorova I., Frolov S., Belozerski G., Kulesh V. Liquid gas traffic in the Arctic under climate warming. *18th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM2018. Conference Proceedings*. V. 18, Iss. 5.2. *Ecology and environmental protection*. Albena, Bulgaria, 2018, 585–592.
13. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolyanickij V.M. Regional features of climatic changes in sea ice cover in the XX – early XXI century and their causes. *Led i Sneg*. 2011, 3 (115), 91–98 (in Russian).
14. Comiso J.C. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover. *J. Climate*. 2012, 25, 1176–1193. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00113.1
15. Serreze M.C. and Stroeve J. Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting. *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2015, 373. DOI: 10.1098/rsta.2014.0159
16. Comiso J.C., Meier W.N. and Gersten R. Variability and trends in the Arctic sea ice cover: results from different techniques. *J. Geophys. Res*. 2017, 122, 6883–9000.
17. Alekseev G.V. Proyavlenie i usilenie global'nogo potepeniya v Arktike. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Klimatologiya*. 2015, 1, 11–26 (in Russian).
18. Repina I.A., Ivanov V.V. Remote sensing in ice sea dynamic and modern Arctic climate investigation. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2012, 9, 5, 89–103 (in Russian).
19. Katczov V.M., Porfir'ev B.N. Klimaticheskie izmeneniya v Arktike: posledstviya dlya okruzhayushhej sredy i e'konomiki. *Arktika: Ekologiya i Ekonomika*. 2012, 2(6), 66–79 (in Russian).
20. Shalina E.V., Bobylev L.P. Sea ice transformations in the Arctic from satellite observations. *Sovremennye Problemy Distantionnogo zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2017, 14, 6, 28–41 (in Russian).

21. Yulin A.V., Sharatunova M.V., Pavlova E.A., Ivanov V.V. Seasonal and interannual changes of ice massifs in the East Siberian Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2018, 64, 3, 229–240 (in Russian).
22. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolyanickij V.M. Regional features of climatic changes in sea ice cover in the XX – early XXI century and their causes. *Led i Sneg*. 2011, 3 (115), 91–98 (in Russian).
23. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolyanickij V.M. Sixty-year cyclical nature of climate change in the polar regions. *Materialy Glyaciologicheskikh Issledovanij*. 2008, 105, 158–165 (in Russian).
24. Coj L.G. Experience arctic heavy navigation. *Morskie Vesti Rossii*. URL: <http://www.morvesti.ru/tems/detail.php? ID=73102> (date of access: 01.24.2019) (in Russian).
25. Ashik I.M., Ivanov V.V., Kassens H., Mahotin M.S., Polyakov I.V., Timohov L.A., Frolov I.E., Hyolemann J. The main results of ocean studies of the Arctic Ocean in the last decade. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2015, 1(103), 42–56 (in Russian).
26. Lars H. Smedsrud, Igor Esau, Randi B. Ingvaldsen, Tor Eldevik, Peter M. Haugan, Camille Li, Vidar S. Lien, Are Olsen, Abdirahman M. Omar, Odd H. Ottera, Bjorg Risebrobakken, Anne B. Sando, Vladimir A. Semenov, Svetlana A. Sorokina. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Reviews of Geophysics*. 2013, 51, 3, 415–449.
27. Alekseev G.V., Ivanov N.E., Pnyushkov A.V., Balakin A.A. Climate change in the marine Arctic at the beginning of the twenty-first century. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2010, 3(86), 22–34 (in Russian).
28. Danilov A.I., Alekseev G.V., Klepikov A.V. Implications of climate change for marine activities in the Arctic. *Led i Sneg*. 2014, 54, 3, 91–99 (in Russian).
29. Soldatenko S.A., Alekseev G.V., Ivanov N.E., Vyazilova A.E., Harlanenkova N.E. On climate risk assessment and vulnerability of natural and economic systems in the marine Arctic zone of the Russian Federation. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2018, 64, 1, 55–70 (in Russian).
30. Matishov G.G., Dzhenyuk S.L., Moiseev D.V. Climate and large Arctic ecosystems. *Vestnik Rossijskoj Akademii Nauk*. 2017, 87, 2, 110–120 (in Russian).
31. Paul Wassmann, Carlos M. Duarte, Susana Agustí, Mikael K. Sejr. Footprints of climate change in the Arctic marine ecosystem. *Global Change Biology*. 2011, 17(2), 1235–1249.
32. Kovalevskij D.V., Alekseev G.V., Bobylev L.P., Danilov A.I. Implications of climate change for some of the economic activities in the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2012, 4(94), 90–98 (in Russian).
33. The site of the news agency “Vesti. Ekonomika”. URL: <https://www.vestifinance.ru /articles/103595> (date of access: 01.24.2019) (in Russian).
34. Shalina E.V. Ice Retreat in the Seas of the Russian Arctic and Increased Availability of the Northern Sea Route from Satellite Passive Microwave Observations. *Earth Observation and Remote Sensing*. 2015, 4, 67–78 (in Russian).
35. Stephenson S.R., Lawson W. Brigham & Laurence C. Smith. Marine accessibility along Russia’s Northern Sea Route. *Polar Geography*. 2014, 37:2, 111–133. DOI: 10.1080/1088937X.2013.845859
36. Khon V., Mokhov I., Semenov V. Transit navigation through Northern Sea Route from satellite data and CMIP5 simulations. *Environmental Research Letters*. 2017, 12(2). DOI: 024010 10.1088/1748–9326/aa5841
37. Stephenson S.R., Wang W., Zender C.S., Wang H., Davis S.J., Rasch P.J. Climatic Responses to Future Trans-Arctic Shipping. *Geophysical Research Letters*. 2018, 45(18), 9898–9908.
38. Nomenclature of sea ices. Symbols for ice cards. 1974. L., GMI. 77 p. (in Russian).
39. Public institution “State hydrological institute”. Standard of the organization STO GGI 52.08.41-2017, “The main hydrological characteristics at not stationarity of temporary ranks caused by influence of climatic factors, Recommendations about calculation”. SPb., 2017 (in Russian).
40. Druzhinin V.S., Sikan A.V. Methods of statistical processing of hydrometeorological information. Manual. *Gidrometeorologiya* direction. Specialty “Hydrology” / Ed. by A.M. Vladimirov. SPb., Izd. RGGMU, 2001. 168 p. (in Russian).
41. Sikan A.V. Methods of statistical processing of hydrometeorological information. Textbook. Specialty “Hydrology” of the direction of preparation “Hydrometeorology”. SPb., Izd. RGGMU, 2007. 279 p. (in Russian).
42. Malinin V.N. Statistical methods of the analysis of hydrometeorological information. Textbook. SPb., Izd. RGGMU, 2008. 408 p. (in Russian).
43. Roman B. Guzenko, Yevgeny U. Mironov, Ruslan I. May etc. Morphometry and Internal Structure of Ice Ridges in the Kara and Laptev Seas. *Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference Honolulu, Hawaii, USA, June 16–21, 2019*, 647–654.
44. Evgenii Salganik, Knut Vilhelm Høyland, Aleksey Shestov. Thermodynamics and Consolidation of Ice Ridges for Laboratory Scale. *Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. June 11–16, 2017, Busan, Korea.