

УДК 504.42 + 551.326.7

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-328-340

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ ПЛАВАНИЯ
ПО ТРАССАМ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ
ЗА ПЕРИОД 1997–2018 гг.**

В.Ю. ТРЕТЬЯКОВ^{1,2}, С.В. ФРОЛОВ¹, М.И. САРАФАНОВ^{1,2}*

¹ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² — Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург, Россия

*v_yu_tretyakov@mail.ru

**THE VARIABILITY OF ICE CONDITIONS
ALONG THE NORTHERN SEA ROUTE
FOR THE PERIOD 1997–2018**

V.Yu. TRETYAKOV^{1,2}, S.V. FROLOV¹, M.I. SARAFANOV^{1,2}*

¹ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² — Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*v_yu_tretyakov@mail.ru

Received June, 20, 2019

Accepted July, 24, 2019

Keywords: ice navigation conditions, sea ice.

Summary

The paper discusses the methodology and results of electronic ice charts processing. The charts taken from AARI archive. The Barents, Kara, Laptev, East Siberian and Chukchi seas Ice maps reflect ice conditions for the period from 1997 to 2018 for the April-May inter-annual interval. The total stage lengths of «Sabetta – the Kara Gate –Murmansk» and «Sabetta – the Vilkitski Strait – the Bering Strait» standard routes were calculated at certain conditions of ice navigation. The route “Sabetta – the Bering Strait” was divided into sections within the Kara sea, Laptev Sea, East Siberian and Chukchi Seas for analysis. The purpose of the study is to obtain the values of the length of the routes in different categories of ice and to analyze changes trend of navigation in ice conditions for the period 1997-2018. The series were checked for the presence of trends using the integral curves method. The homogeneity of the series was checked using Wilcoxon - Mann-Whitney and Siegel - Tukey rank non-parametric criteria. Most of the series proved to be non-homogeneous. The following **Citation:** Tretyakov V.Yu., Frolov S.V., Sarafanov M.I. The variability of ice conditions along the Northern sea route for the period 1997–2018. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research.* 2019, 65, 3: 328–340. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-328-340.

conclusions were made: there was some improvement of ice navigation conditions along the route Sabetta – the Kara Gate – Murmansk due to the decrease of the route length in hard ice conditions. The ice navigation conditions along the Sabetta – the Bering Strait route changed little, if at all, the navigation conditions along the route within the Kara Sea and the Laptev Sea have changed for the worse, and within the East Siberian Sea ice conditions scarcely changed. Some slight improvement of the navigation conditions was noted within the Chukchi Sea. In general, the decrease of the route Sabetta – the Bering Strait length in compact drift ice with total concentration equal to 9 tenths or more and in the presence of old ice is partially compensated by increase of the route length in compact ice in the presence of thick first-year ice. The decrease and the increase are relatively equal.

Поступила 20 июня 2019 г.

Принята к печати 24 июля 2019 г.

Ключевые слова: ледовые условия плавания, морской лед.

В работе приводятся методика и результаты обработки ледовых карт из архива Арктического и антарктического научно-исследовательского института по Баренцеву, Карскому, Лаптевых, Восточно-Сибирскому и Чукотскому морям за период с 1997 по 2018 г., относящихся к внутригодовому интервалу «апрель – май». Цель исследования — получить значения протяженностей маршрутов плаваний в определенных категориях льдов и произвести анализ направленности произошедших за период 1997–2018 гг. изменений ледовых условий плавания. Получены протяженности маршрутов Сабетта – Мурманск и Сабетта – Берингов пролив с различными ледовыми условиями, относящиеся к десятидневным (декадным) интервалам. Проверка рядов протяженностей на наличие трендов выполнена методом интегральных кривых; осуществлена проверка однородности рядов с помощью критериев Уилкоксона – Манна – Уитни и Зигеля – Тьюки. Получены следующие выводы: на маршруте Сабетта – Карские Ворота – Мурманск за двадцать последних лет произошло улучшение ледовых условий плавания. На маршруте Сабетта – Берингов пролив условия плавания изменились незначительно.

ВВЕДЕНИЕ

Морские транспортные операции по Северному морскому пути, являясь широко востребованными, в том числе и для транспортировки добытого сырья, осложнены практически круглогодичным наличием ледяного покрова. Ряд авторов указывает на высокие темпы потепления Арктики и, как следствие, уменьшение ледовитости Северного Ледовитого океана (СЛО) [1]. В то же время согласно другим источникам современная тенденция потепления может смениться похолоданием [2]. В любом случае именно изменение ледовой обстановки будет играть ключевую роль при стратегическом планировании морских транспортных систем [3]. Исходя из вышперечисленных потребностей в информации о состоянии ледяного покрова по стандартным маршрутам плаваний, в данной работе исследована динамика ледовых условий по трассам Сабетта – Мурманск и Сабетта – Берингов пролив (рис. 1) за более чем двадцатилетний период.

Цель исследования — получить значения протяженностей маршрутов плаваний в определенных категориях льдов и произвести анализ направленности произошедших за период 1997–2018 гг. изменений ледовых условий плавания. Для этого была произведена обработка электронных карт из архива Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ), где содержится информация о распределении морских льдов, их сплоченности и возрастном составе [4]. Впервые для данных маршрутов были получены значения протяженностей в различных категориях льдов с использованием современных продуктов исследований в области наук о Земле — электронных карт, составленных на основе данных спутникового зондирования.

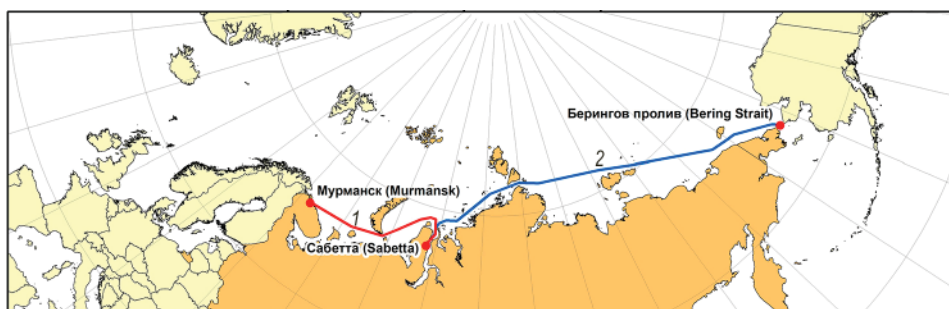


Рис. 1. Карта исследованных стандартных маршрутов плавания.

1 — Сабетта – Мурманск; 2 — Сабетта – Берингов пролив

Fig. 1. Map of the standard routes.

1 — Sabetta – Murmansk; 2 — Sabetta – The Bering Strait

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вдоль маршрутов Сабетта – Мурманск и Сабетта – Берингов пролив произведена обработка электронных векторных карт ледовой обстановки в среде ГИС ArcGIS при помощи написанных на языке Python программ. Для маршрута Сабетта – Берингов пролив выполнен как анализ маршрута в целом, так и его секций в пределах отдельных морей. Данные анализировались подекадно для месяцев с наибольшим развитием ледяного покрова — апреля и мая.

В среде ГИС выполнялась оверлейная операция пересечения полигональных объектов слоя ледовой информации слоем маршрута плаваний и генерацией нового слоя линейных объектов, наследующих ледовые характеристики пересеченных объектов векторной ледовой карты. Затем производились атрибутивные запросы к объектам этого слоя с условиями их соответствия определенным параметрам ледяного покрова с генерацией новых слоев, куда экспортировались выбранные объекты, и расчеты протяженностей объектов. Сперва выделялись объекты с общей сплоченностью дрейфующих льдов 9 и более баллов, если только их ледяной покров не состоял исключительно из начальных видов льда, и экспортировались во вновь создаваемые слои электронных карт. Затем к этим слоям применялись новые атрибутивные запросы с генерацией слоев карты, содержащих участки маршрута с наличием льдов определенных возрастных категорий. Рассчитывались как протяженности отдельных объектов, так и суммарные протяженности всех участков маршрута, удовлетворяющих определенным условиям, например: всех участков маршрута в сплоченных льдах с присутствием толстых однолетних льдов.

Для каждой из декад апреля–мая были получены ряды протяженностей маршрутов плавания в припае, в сплоченных льдах, то есть во льдах с общей сплоченностью 9 и более баллов, в сплоченных льдах при наличии льдов различных возрастных категорий. Также получены значения протяженностей маршрутов плаваний в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых льдов 5 и более баллов и протяженностей маршрутов в сплоченных льдах с частной концентрацией суммы средних и толстых однолетних льдов 5 и более баллов. Для маршрута Сабетта – Мурманск протяженность в припае не рассматривалась, так как данный маршрут проходит вдали от прибрежных участков и припая.

Выполнены расчеты приведенных суммарных протяженностей участков маршрута во льдах разных возрастных категорий. Приведенная протяженность маршрута

во льдах определенной возрастной категории — это условная протяженность пути только в этих льдах.

Приведенная протяженность пути во льдах определенной возрастной категории на однородном участке маршрута рассчитывается как произведение его протяженности на долю площади акватории, занимаемую здесь этими льдами.

Рассчитаны приведенные протяженности старых и толстых однолетних льдов по маршруту Сабетта – пролив Вилькицкого – Берингов пролив.

Полученные ряды межгодовой изменчивости декадных значений протяженностей были проанализированы на наличие межгодового тренда методом интегральных кривых. Этот метод уже давно применяется при исследованиях межгодовой динамики годовых расходов рек [5] и стал применяться для анализа изменчивости ледовых характеристик [6, 7].

Если на интегральной кривой присутствуют изломы и/или изгибы, это является признаком межгодового тренда исходных значений. В этом случае для проверки нулевой гипотезы об однородности ряда исходных значений он подразделяется на части по местам этих изломов или изгибов. Если изломов несколько, то число элементов в отдельных частях ряда может быть меньше необходимого для применения критериев однородности. В этом случае разделение исходного числового ряда на две части производится по месту самого выраженного излома или изгиба.

Затем выполняется проверка нулевой гипотезы о принадлежности двух частей ряда к одной генеральной совокупности, т.е. проверяется гипотеза об отсутствии существенных различий между этими частями [8, 9, 10].

Эта проверка выполнялась в среде системы MathCAD с помощью ранговых непараметрических критериев однородности Уилкоксона–Манна–итни и Зигеля–Тьюки. Для этого были специально разработаны компьютерные программы (рабочие области) MathCAD.

Если нулевая гипотеза об однородности числового ряда не опровергалась, то рассчитывалась вероятность ее верности в процентах. Ряд считался неоднородным, если гипотеза об однородности ряда опровергалась хотя бы одним из критериев или если хотя бы по одному из критериев вероятность верности нулевой гипотезы оказывалась менее 50 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате анализа рядов протяженностей маршрутов Сабетта – Мурманск и Сабетта – Берингов пролив была установлена неоднородность для большинства рядов. Это говорит о статистически значимых изменениях суммарных протяженностей участков маршрутов, отвечающих определенным параметрам ледяного покрова. По маршруту Сабетта – Мурманск (табл. 1) выявлено уменьшение протяженностей маршрутов в сплоченных льдах, в сплоченных льдах при наличии однолетних льдов средней толщины, в сплоченных льдах при наличии толстых льдов, в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых льдов 5 и более баллов, в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых и средних льдов более 5 баллов.

По маршруту Сабетта – Берингов пролив (табл. 2) было обнаружено уменьшение протяженности маршрута в припае, а также в сплоченных льдах при наличии старых льдов.

Необходимо отметить увеличение во вторую половину периода 1997–2018 гг. суммарных протяженностей участков маршрута Сабетта – Берингов пролив в спло-

Таблица 1

Результаты проверки на неоднородность и сравнения значений первой (1997–2007 гг.) и второй (2008–2018 гг.) половин рядов протяженностей по маршруту Сабетта – Мурманск

Протяженность маршрута плавания	Число рядов		% неоднородных рядов	Направленность изменений при сравнении первой и второй половин рядов
	однородных	неоднородных		
В сплоченных льдах	0	6	100	Уменьшение
В сплоченных льдах с наличием льдов следующих градаций возраста:				
однолетних средней толщины	1	5	83	Уменьшение
толстых однолетних старых льдов	1	5	83	Уменьшение
Не были обнаружены на маршруте				
В сплоченных льдах с частной концентрацией 5 баллов и более:				
толстых льдов	0	6	100	Уменьшение
суммы толстых и средних толщин льдов	1	5	83	Уменьшение

Таблица 2

Результаты проверки на неоднородность и сравнения значений первой (1997–2007 гг.) и второй (2008–2018 гг.) половин рядов протяженностей по маршруту Сабетта – Берингов пролив

Протяженность маршрута плавания	Число рядов		% неоднородных рядов	Направленность изменений при сравнении первой и второй половин рядов
	однородных	неоднородных		
в припае	0	6	100	Уменьшение
в сплоченных льдах	0	6	100	Увеличение
В сплоченных льдах с наличием льдов следующих градаций возраста:				
однолетних средней толщины	0	6	100	Увеличение
толстых однолетних старых	2	4	67	Увеличение
	3	3	50	Уменьшение
В сплоченных льдах с частной концентрацией 5 баллов и более:				
толстых однолетних	0	6	100	Увеличение

ченных льдах; в сплоченных льдах с наличием однолетних льдов средней толщины, толстых однолетних льдов; в сплоченных льдах с частной концентрацией 5 и более баллов толстых однолетних льдов и суммы толстых и средних льдов.

На рис. 2 и 3 приведены сравнения характеристик первой (1997–2007 гг.) и второй (2008–2018 гг.) половин рядов суммарных протяженностей участков маршрутов Сабетта – Мурманск и Сабетта – Берингов пролив в первую декаду мая, в сплоченных льдах при наличии тонких льдов, в сплоченных льдах при наличии однолетних льдов средней толщины и в сплоченных льдах при наличии толстых льдов.

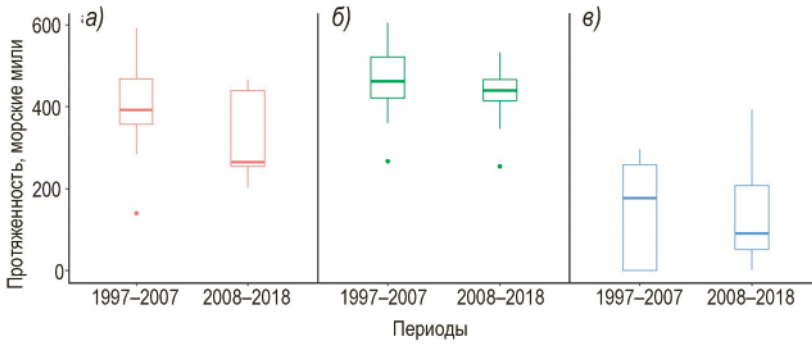


Рис. 2. Изменения суммарных протяженностей участков маршрута Сабетта – Мурманск при определенных условиях ледового плавания в первую декаду мая. Медиана показана жирной линией:

а) — в сплоченных льдах при наличии тонких льдов; б) — в сплоченных льдах при наличии однолетних льдов средней толщины; в) — в сплоченных льдах при наличии толстых льдов

Fig. 2. Changes of the Sabetta – Murmansk route lengths at certain conditions of ice navigation for the first decade of May. The median is shown by bold solid line:

а) — within compact drift ice with presence of thin first-year ice; б) — within compact drift ice with presence of medium first-year ice; в) — within compact drift ice with presence of thick first-year ice

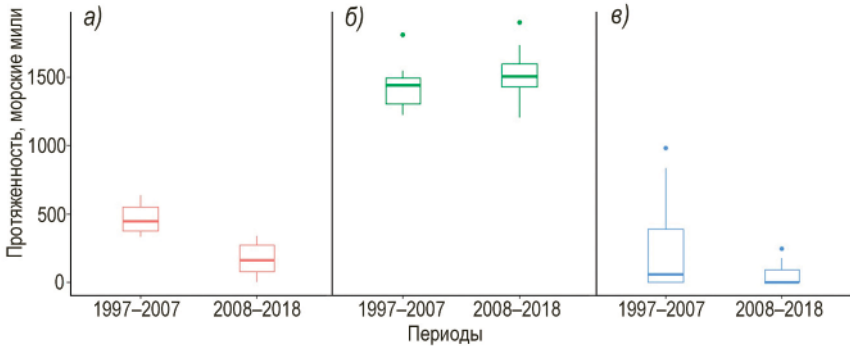


Рис. 3. Изменения суммарных протяженностей участков маршрута Сабетта – Берингов пролив при определенных условиях ледового плавания в первую декаду мая. Медиана показана жирной линией:

а) — в припае; б) — в сплоченных льдах при наличии толстых льдов; в) — в сплоченных льдах при наличии старых льдов

Fig. 3. Changes of the Sabetta – Bering Strait route lengths at certain conditions of ice navigation for the first decade of May. The median is shown by bold solid line:

а) — within fast ice; б) — within compact drift ice with presence of thick first-year ice; в) — within compact drift ice with presence of old ice

Рис. 2 и 3 демонстрируют существенное изменение ледовых условий плавания от первого периода ко второму. Так, средняя суммарная протяженность участков маршрута Сабетта – Мурманск в сплоченных льдах в первую декаду мая в период 1997–2007 гг. составляла 513 морских миль, а в период 2008–2018 гг. — 451 морскую милю. Средняя суммарная протяженность участков маршрута Сабетта – Берингов

пролив» в сплоченных льдах в первую декаду мая увеличилась с 1796 морских миль в период 1997–2007 гг. до 2035 морских миль в период 2008–2018 гг. На участке этого маршрута в Карском море средняя суммарная протяженность участков пути в сплоченных льдах увеличилась с 275 морских миль в период 1997–2007 гг. до 512 морских миль в период 2008–2018 гг., в море Лаптевых — с 402 до 406, в Восточно-Сибирском море — с 744 до 746, а в Чукотском море — уменьшилась с 376 до 371 морской мили. Таким образом, наибольшее увеличение суммарной протяженности участков маршрута в сплоченных льдах произошло в Карском море, в остальных морях подобное увеличение незначительно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Уменьшение средних значений суммарных протяженностей участков маршрута Сабетта – Мурманск в сплоченных льдах с присутствием тонких однолетних льдов, однолетних льдов средней толщины и толстых однолетних льдов свидетельствует об улучшении условий плавания в первую декаду мая за период 1997–2018 гг. Анализ числовых рядов межгодовой изменчивости протяженностей методом интегральных кривых показал, что большинство изломов приходилось на 2003–2007 гг., т.е. в эти годы произошло изменение ледовых условий по маршруту плаваний.

Вероятно, произошло усиление процессов таяния в летний период, выражающееся в уменьшении количества остаточных льдов, что подтверждается и другими исследованиями [11]. Так, средняя площадь, занимаемая льдами Северного Ледовитого океана в летний период, значительно сократилась в сравнении с 1980-ми гг. и продолжает уменьшаться. Линейный тренд сокращения морского льда в летний период с 1979 по 2019 г. составляет 48 000 км² в год, или 4,08 % за десятилетие, по сравнению со средним показателем за период с 1981 по 2010 г. [12].

Изменяется процентное соотношение возрастных категорий льдов и в конце периода нарастания ледяного покрова (в мае), так, в море Лаптевых средняя величина количества толстых однолетних льдов за период 1997–2017 гг. на 20 % меньше, чем за период с конца 1930-х до начала 1970-х гг. [13].

Суммарная протяженность участков маршрута Сабетта – Берингов пролив сплоченных льдах, в сплоченных льдах при наличии толстых и средних однолетних льдов увеличилась. Таким образом, частично место старых льдов на трассе заняли однолетние льды.

Уменьшение суммарной протяженности участков маршрута Сабетта – Берингов пролив в сплоченных льдах при наличии старых льдов, вероятно, может быть объяснено усилением выноса льдов в приполюсный район при смене систем атмосферной циркуляции. В работе [14] указано, что синоптические процессы двух групп (А и К) способствуют разрушению ледяного покрова. Процессы группы А приводят к развитию циклонической деятельности над большей частью Арктического бассейна (АБ), а группы К — над западной и восточной частями Арктического бассейна. Современное уменьшение ледовитости происходило при отрицательных аномалиях повторяемости процессов группы Б и росте повторяемости процессов других групп. В период с 1997 по 2006 г. в атмосфере наблюдались синоптические процессы с развитой циклонической деятельностью над Северо-Европейским бассейном и в южной части восточного сектора Арктики, что привело к усиленному разрушению льда в АБ и, вероятнее всего, обусловило исторические минимумы площади ледяного покрова в сентябре 2007 г. и затем 2012 г. [14].

Изменения ледовых условий плавания в первую декаду мая на отдельных участках маршрута плаваний Сабетта – Берингов пролив за период 1997–2018 гг. существенно различаются. Так, ледовые условия плавания на участках маршрута в Карском море и море Лаптевых ухудшились из-за увеличения суммарной протяженности участков пути с присутствием льдов наиболее возрастных категорий: однолетних средней толщины, толстых однолетних и старых льдов. На участке маршрута в Восточно-Сибирском море уменьшение протяженности пути в присутствии старых льдов частично компенсируется увеличением протяженности пути с наличием толстых однолетних льдов. В Чукотском море отмечено незначительное улучшение ледовых условий плавания.

Прочность старого льда, толстого однолетнего льда и однолетнего льда средней толщины практически одинакова. Поэтому для оценки степени трудности плавания не столь важно, однолетний лед или старый приходится преодолевать, важны толщина ровного льда и параметры торосов. Торошение же происходит в основном с молодыми и тонкими однолетними льдами. Следовательно, характеристики консолидированного слоя гряды торосов старого льда должны совпадать с характеристиками консолидированного слоя гряды однолетнего льда, т.к. в обоих случаях гряды были сформированы на стадиях молодых или однолетних льдов.

ВЫВОДЫ

В результате сделаны следующие выводы:

1. За период 1997–2018 гг. на трассе СМП Сабетта – Карские Ворота – Мурманск в среднем уменьшилась суммарная протяженность участков пути в сплоченных льдах, 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.

2. За период 1997–2018 гг. на трассе СМП Сабетта – пролив Вилькицкого – Берингов пролив в среднем увеличилась суммарная протяженность участков маршрута в сплоченных льдах, в сплоченных льдах при наличии однолетних льдов средней толщины, 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. При этом в среднем уменьшилась суммарная протяженность участков маршрута в сплоченных льдах при наличии старых льдов и в припае.

3. Уменьшение в 2008–2018 гг. по сравнению с 1997–2007 гг. средней приведенной протяженности маршрута плаваний Сабетта – пролив Вилькицкого – Берингов пролив в старых льдах в апреле–мае на 160 морских миль «частично компенсируется» увеличением практически на эту же величину (на 166 морских миль) средней приведенной протяженности пути плавания в толстых однолетних льдах. Говорить о «полной компенсации» условий плавания заменой старых льдов на толстые однолетние льды некорректно из-за различного сопротивления старых и толстых однолетних льдов движению судов. Поскольку прочность толстого однолетнего и старого льдов практически одинакова [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25], то в случае одинаковой толщины ровного толстого однолетнего и старого льдов они оказывают одинаковое сопротивление движению ледокола и одинаковое давление на борт судна при сжатиях льдов. Однако в апреле–мае толщина ровного старого льда больше

толщины ровного толстого однолетнего льда, т.к. рост толщины старого льда начинается осенью не с нуля, как у однолетнего льда. При плаваниях в сплоченных дрейфующих льдах наибольшим препятствием являются не ровные льды, а гряды торосов. Обычно гряды торосов формируются в молодых и тонких однолетних льдах. Первоначально гряды состоят из отдельных, не скрепленных между собой блоков такой же толщины, что и ровные льды, из которых они образовались. По прохождении некоторого времени блоки смерзаются в консолидированный слой, который является серьезным препятствием при преодолении ледоколом гряды торосов и опасным ледяным образованием при сжатиях судов. Чередование похолоданий и потеплений способствует образованию и росту консолидированного слоя. Существуют взаимосвязи между суммой градусо-дней мороза, толщиной ровного льда и толщиной консолидированного слоя гряд торосов [26, 27]. Поэтому обычно толщина консолидированного слоя гряд торосов в старых льдах больше, чем в грядах однолетних льдах. Следовательно, при «замещении» старых льдов толстыми однолетними льдами трудность ледового плавания должна несколько снижаться.

На маршруте плаваний Сабетта – Карские Ворота – Мурманск за период 1997–2018 гг. отмечено улучшение ледовых условий плавания в апреле–мае. На маршруте Сабетта – пролив Вилькицкого – Берингов пролив условия ледового плавания в апреле–мае практически не изменились.

Компьютерное имитационное моделирование морских транспортных операций в условиях дрейфующих морских льдов предполагает применение метода Монте-Карло, позволяющего учитывать все многообразие значений параметров ледяного покрова.

Результаты данного исследования необходимы для построения статистических распределений ряда параметров, используемых в компьютерной модели оценки вероятности аварийных ситуаций из-за сжатий судов дрейфующими льдами. Также они могут быть задействованы при модернизации компьютерной системы выбора оптимального маршрута плаваний.

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

Acknowledgments. The work was performed in accordance with the Roshydromet Targeted Scientific and Technical Program (TSTP) 1.5.3.6 «The Russian Arctic seas under present climatic conditions».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Munshi J.* Trends in Polar Sea Ice Extent 1979–2015 (April 23, 2015). URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2598152> (дата обращения 13.06.2019).
2. *Большаинов Д.Ю., Макаров А.С., Морозова Е.А., Павлов М.В., Саватюгин Л.М.* Развитие природной среды полярных областей Земли последнего тысячелетия по данным изучения донных отложений озер // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1 (81). С. 108–115.
3. *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.
4. *Бресткин С.В., Быченков Ю.Д., Десятаяев О.С., Фоломеев О.В.* Обеспечение гидрометеорологической безопасности в Арктическом регионе // Материалы международной научно-прак-

- тической конференции «Проблемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктическом регионе. Безопасный город в Арктике». МЧС России. 2016. С. 68–72.
5. 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.: ГГИ, 2017. 46 с.
6. Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Сарафанов М.И. Анализ межгодовой изменчивости ледовых условий на маршруте Сабетта – Карские Ворота – Мурманск за 1997–2017 гг. // География: Развитие науки и образования: (По материалам международной научно-практической конференции «LXXI Герценовские чтения». РГПУ им. А.И. Герцена, 18–21 апреля 2018 года). СПб.: РГПИ им. А.И. Герцена, 2018. С. 261–265.
7. Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Сарафанов М.И., Федяков В.Е. Геоинформационные технологии для обеспечения морских транспортных операций в Арктике и замерзающих морях // Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации». СПб.: РГПИ им. А.И. Герцена, 2019. С. 491–493.
8. Дружинин В.С., Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2001. 167 с.
9. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. 279 с.
10. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2008. 408 с.
11. 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.
12. National snow & Ice Data Center. «Melt season shifts into high gear». URL: <https://nsidc.org/arcticseaicenews/> (дата обращения 14.07.2019)
13. Хотченков С.В. Формирование возрастного состава ледяного покрова в море Лаптевых // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. Т. 63. № 4. С. 5–15.
14. Волков В.А., Мушта А.В., Демчев Д.М., Коржиков А.Я., Сандвен С. Связь крупномасштабной изменчивости поля дрейфа льда в Северном Ледовитом океане с климатическими изменениями общей ледовитости, происходящими в течение последних десятилетий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 2 (108). С. 50–63.
15. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 384 с.
16. Гаврило В.П., Ковалев С.М., Недошивин О.А. Расчетные и среднемноголетние характеристики механических свойств однолетнего льда Баренцева и Карского морей / Под ред. В.П. Гаврило. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 42 с.
17. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под ред. Е.У. Миронова. СПб.: ААНИИ, 2010. 319 с.
18. Апель И.Л. О силах сжатия и внутреннего сопротивления в ледяном покрове при нажимном дрейфе // Труды ААНИИ. 1976. Т. 320. С. 153–160.
19. Фаддеев О.В., Хейсин Д.Е. Определение структуры формул для оценки взаимодействия ледяного покрова с конструкциями // Труды ААНИИ. 1985. Т. 391. С. 55–62.
20. Алексеев Ю.Н., Афанасьев В.П., Литоков О.Е., Мануров М.Н., Панов В.В., Трусков П.А. Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений нефти и газа. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 360 с.
21. Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е. Морской лед. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 318 с.

22. Никитин В.А., Сухоруков К.К. Прочность морских ледяных полей и ледовые нагрузки // Метеорология и гидрология. 1998. № 12. С. 88–95.
23. Смирнов В.Н., Шушлебин А.И., Ковалев С.М., Шейкин И.Б. Методическое пособие по изучению физико-механических характеристик ледяных образований как исходных данных для расчета ледовых нагрузок на берега, дно и морские сооружения. СПб.: ААНИИ, 2011. 180 с.
24. Ледяные образования морей западной Арктики / Под. ред. Г.К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. 272 с.
25. СНиП 2.06.04-82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М.: Стройиздат, 1995. 46 с.
26. Guzenko R.B., Mironov E.U., May R.I. Morphometry and internal structure of ice ridges in the Kara and Laptev Seas // Proceedings of the Twenty-ninth International Ocean and Polar Engineering Conference. Honolulu. 2019. P. 647–654.
27. Salganik E., Høyland K.V., Shestov A. 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. 2017. Paper POAC17-078. URL: http://www.poac.com/Papers/2017/pdf/POAC17_078_Evgenii.pdf (дата обращения 29.08.2019).

REFERENCES

1. Munshi J. Trends in Polar Sea Ice Extent 1979–2015 (April 23, 2015). Available at SSRN: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2598152> (accessed 13.06.2019).
2. Bol'shijanov D.Ju., Makarov A.S., Morozova E.A., Pavlov M.V., Savatjugin L.M. Polar regions environment during last millennium on the base of lake sediments investigations. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2009, 1 (81): 108–115. [In Russian].
3. Kovalevskij D.V., Alekseev G.V., Bobylev L.P., Danilov A.I. The consequences of climate change for some types of economic activity in the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2012, 4 (94): 90–98. [In Russian].
4. Brestkin S.V., Bychenkov Iu.D., Deviataev O.S., Folomeev O.V. Ensuring hydrometeorological safety in the Arctic region // Problems of prevention and emergency response in the Arctic region. Safe city in the Arctic. EMERCOM of Russia, 2016: 68–72. [In Russian].
5. State institution “State Hydrological Institute”. *Standard organization STO GGI 52.08.41-2017. Osnovnye gidrologicheskie harakteristiki pri nestacionarnosti vremennyh rjadov, obuslovlennoj vlijaniem klimaticheskikh faktorov. Rekomendacii po raschetu*. The main hydrological characteristics of non-stationary time series, due to the influence of climatic factors. Calculation recommendations. St. Petersburg, State Hydrological Institute, 2017: 46 p. [In Russian].
6. Tret'iakov V.Iu., Frolov S.V., Sarafanov M.I. Analysis of the interannual variability of ice conditions on the route Sabetta – Kara Gate – Murmansk for 1997–2017. *Geografija: Razvitie nauki i obrazovanija (Po materialam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «LXXI Gertsenovskie chteniia». RGPU im. A.I. Gertsena, 18–21 aprelia 2018 goda)*. “Geography: Development of Science and Education” based on the materials of the international scientific-practical conference «LXXI Herzen readings. Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen, April 18–21, 2018». 2018: 261–265. [In Russian].
7. Tret'iakov V.Iu., Frolov S.V., Sarafanov M.I., Fediakov V. Geo-information technologies for ensuring maritime transport operations in the Arctic and freezing seas // *Sovremennye problemy gidrometeorologii i ustoichivogo razvitiia Rossijskoi Federatsii*. Modern problems of hydrometeorology and sustainable development of the Russian Federation. St. Petersburg: Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen, 2019: 491–493. [In Russian].
8. Druzhinin V.S., Sikan A.V. *Metody statisticheskoy obrabotki gidrometeorologicheskoy informacii*. Methods of statistical processing of hydrometeorological information. St. Petersburg: Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen, 2001: 167 p. [In Russian].

9. Sikan A.V. *Metody statisticheskoy obrabotki gidrometeorologicheskoy informacii*. Methods of statistical processing of hydrometeorological information. St. Petersburg: Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen, 2007: 279 p. [In Russian].
10. Malinin V.N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoi informatsii*. Statistical methods for analyzing hydrometeorological information. St. Petersburg: Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen, 2008: 408 p. [In Russian].
11. Julin A.V., Sharatunova M.V., Pavlova E.A., Ivanov V.V. Seasonal and inter-annual variability of the ice massifs of the East Siberian Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2018, 64, 3: 229–240. [In Russian].
12. National snow & Ice Data Center. Melt season shifts into high gear. Available at: <https://nsidc.org/arcticseaicenews/> (accessed 14.07.2019).
13. Hotchenkov S.V. Formation of the age composition of the ice cover in the Laptev Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2017, 63, 4: 5–15. [In Russian].
14. Volkov V.A., Mushta A.V., Demchev D.M., Korzhikov A.Ja., Sandven S. Connection of large-scale variability of the ice drift field in the Arctic Ocean with climatic changes in the total ice cover occurring during the last decades. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2016, 2 (108): 50–63. [In Russian].
15. Bogorodskii V.V., Gavrilov V.P. *Led. Fizicheskie svoystva. Sovremennye metody gliatsiologii*. Ice. Physical properties. Modern methods of glaciology. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980: 384 p. [In Russian].
16. Gavrilov V.P., Kovalev S.M., Nedoshivin O.A. *Raschetnye i srednemnogoletnie kharakteristiki mekhanicheskikh svoystv odnoletnego l'da Barentseva i Karskogo morei*. Calculated and average long-term characteristics of the mechanical properties of the annual ice of the Barents and Kara seas. Handbook ed. V.P. Gavrilov. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1996: 42 p. [In Russian].
17. *Opasnye ledovye iavleniia dlia sudokhodstva v Arktike*. Dangerous ice phenomena for shipping in the Arctic. Ed. Mironov E.U. St. Petersburg: AARI, 2010: 319 p. [In Russian].
18. Appel' I.L. On the forces of compression and internal resistance in the ice cover under pressure drift. *Trudy AANII*. Proceedings of AARI. 1976, 320: 153–160. [In Russian].
19. Faddeev O.V., Kheisin D.E. Determining the structure of formulas for evaluating the interaction of ice cover with structures. *Trudy AANII*. Proceedings of AARI. 1985, 391: 55–62. [In Russian].
20. Alekseev Iu.N., Afanas'ev V.P., Litokov O.E., Manurov M.N., Panov V.V., Truskov P.A. *Ledotekhnicheskie aspekty osvoeniia morskikh mestorozhdenii nefi i gaza*. Ice engineering aspects of the development of offshore oil and gas fields. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 2001: 360 p. [In Russian].
21. Doronin Iu.P., Kheisin D.E. *Morskoi led*. Sea ice. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1975: 318 p. [In Russian].
22. Nikitin V.A., Sukhorukov K.K. Durability of sea ice fields and ice loads. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 1998, 12: 88–95. [In Russian].
23. Smirnov V.N., Shushlebin A.I., Kovalev S.M., Sheikin I.B. *Metodicheskoe posobie po izucheniiu fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik ledianykh obrazovaniy kak iskhodnykh dannykh dlia rascheta ledovykh nagruzok na berega, dno i morskije sooruzheniia*. Methodological manual for the study of the physico-mechanical characteristics of ice formations as initial data for the calculation of ice loads on the shores, bottom and offshore structures. St. Petersburg: AARI, 2011: 180 p. [In Russian].
24. *Ledianye obrazovaniia morei zapadnoi Arktiki*. Ice Formations of the Western Arctic Seas. Ed. G.K. Zubakin. St. Petersburg: AARI, 2006: 272 p. [In Russian].
25. SNiP 2.06.04-82. *Nagruzki i vozdeistviia na gidrotekhnicheskie sooruzheniia (volnovye, ledovye i ot sudov)*. Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships). Moscow: Stroizdat, 1995: 46 p. [In Russian].

26. *Guzenko R.B., Mironov E.U., May R.I.* Morphometry and internal structure of ice ridges in the Kara and Laptev Seas. Proceedings of the Twenty-ninth International Ocean and Polar Engineering Conference. Honolulu. 2019: 647–654.

27. *Salganik E., Høyland K.V., Shestov A.* 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. 2017. Paper POAC17 -078. Available et: http://www.poac.com/Papers/2017/pdf/POAC17_078_Evgenii.pdf (accessed 29.08.2019).