ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-71-84

ANALYSIS OF ICE SITUATION CHANGES ON THE NORTHERN SEA ROUTE IN THE LATE XX — EARLY XXI CENTURY

A. V. Kholoptsev[1,2], S. A. Podporin[1]

[1] — Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation
[2] — Sevastopol branch of FSBI "N.N. Zubov's State Oceanographic Institute", Sevastopol, Russian Federation

As global climate changes are becoming a major concern for climatologists and earth scientists, substantial sea ice decline in the Arctic, on the contrary, brings new possibilities for shipping, cargo transportation, and coastal mineral development. Ice cover dynamics in the Russian Arctic in the late XX — early XXI century has been investigated in the paper. On this basis, the aim to assess the prospects for ice situation improvement on the Northern Sea Route during the next decades is set. Thorough analysis of numerous scientific papers addressing this issue reveals that there is a great variety of views and forecasts on this matter. The Arctic ice, as some researchers predict, is expected to completely vanish in the summer months by the middle of the XXI century, however other insights suggest the Arctic climate cooling and subsequent sea ice growth due to the Solar constant lessening by approximately the same time.

In this paper, the major factors influencing the Arctic ice dynamics, including the Arctic–North Atlantic water exchange, formation of polynyas around river estuaries, solar activity variations, are considered. The most essential indicators of the ice situation such as the ice extent of the water areas, the average and the maximum ice thickness therein, and the total area of polynyas are investigated. The time series for the above indicators are obtained by use of the ICDC reanalysis data provided by the University of Hamburg.

Reanalysis datasets available for 1979–2017 are used to reveal the major trends in the ice situation dynamics for this period. It is shown that the ice cover had been having an overall tendency to decline in the European and the West-Siberian sectors of the Russian Arctic, which in turn had been improved navigability therein. Similar trends are likely to be seen in the next two decades. In the East-Siberian and the Chukchi sectors, the similar dynamics for sea ice decline was obvious until 2007, and then the opposite trend leading to the ice situation aggravation emerged. It is thus feasible to assume that substantial improvement of ice conditions in the East-Siberian and the Chukchi Seas in the summer months is not to be expected in the next decades. Shipping safety therein will remain highly dependent on icebreaker services. It is also quite clear that in the next at least two decades the prospects for opening the transpolar shipping routes will remain illusory, whereas the Northern Sea Route will serve as the main transport artery in the Arctic.

Keywords: Northern Sea Route, Arctic, ice situation, climate changes, shipping safety, trend, polynya, ice extent.

For citation:
Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. "Analysis of ice situation changes on the Northern Sea Route in the late XX — early XXI century." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 71–84. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-71-84.

УДК 656.61.052: 551.583

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ НА СЕВЕРНОМ МОРСКОМ ПУТИ В КОНЦЕ XX – НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

А. В. Холопцев[1, 2], С. А. Подпорин[1]

[1] — ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация
[2] — Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация

Исследована динамика изменений ледовой обстановки в российском сегменте Арктики в конце XX — начале XXI в. в летние месяцы в свете глобального потепления климата. На основе полученных данных выполнена оценка перспектив улучшения ледовых условий и развития судоходства на Северном морском пути в ближайшие десятилетия. По результатам анализа научных публикаций выявлены существенные расхождения в прогнозах разных авторов о динамике развития ледового покрова Арктики и отмечено многообразие научных точек зрения — от полного таяния льдов в летний период к середине XXI в. до, наоборот, значительного увеличения их площади. Выделены основные факторы, влияющие на динамику ледового покрова, включая водообмен с Северной Атлантикой, образование полыней в устьях рек, а также изменение солнечной активности. Исследованы наиболее характерные показатели ледовой обстановки: ледовитость акваторий, средняя и максимальная толщина льда, суммарная площадь полыней. Данные для построения временных рядов указанных показателей получены на основе реанализа ICDC, предоставленного университетом Гамбурга.

По результатам статистического анализа массива данных за 1979–2017 гг. выявлены основные тенденции изменений ледовой обстановки в течение этого периода. Показано, что в Европейском и Западно-Сибирском секторах Российской Арктики ледовый покров уменьшался, а условия судоходства на расположенных там трассах Севморпути улучшались. Такую же динамику следует ожидать и в ближайшие десятилетия. В Восточно-Сибирском и Чукотском секторах происходили аналогичные изменения до 2007 г., затем проявился противоположный тренд. Прогнозируется, что в ближайшие годы заметного улучшения ледовой обстановки в Восточно-Сибирском и Чукотском морях в летние месяцы ожидать не следует. Судоходство в регионе останется крайне зависимым от доступности ледокольных услуг. Показано, что в ближайшие два десятилетия перспективы открытия трансполярных трасс остаются иллюзорными, а Севморпуть сохранит свою роль основной транспортной магистрали в Арктике.

Ключевые слова: Северный морской путь, Арктика, ледовая обстановка, климатические изменения, безопасность судоходства, тренд, полынья, ледовитость

Для цитирования:
Холопцев А. В. Анализ изменений ледовых условий на Северном морском пути в конце XX – начале XXI века / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 71–84. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-71-84.

Введение (Introduction)

Развитие устойчивого судоходства в Российской Арктике является одним из приоритетов транспортной стратегии Российской Федерации [1]. На побережьях и шельфе арктических морей в настоящее время активно осваиваются новые месторождения, в том числе нефтегазоносные районы Ямала и Гыдана, угольный бассейн Таймыра и ряд других, обслуживание которых требует развития арктического флота. Вместе с тем суровый климат и ледовитость накладывают серьезные ограничения на работу морского транспорта в замерзающих арктических морях. На сегодняшний день лишь небольшое количество судов с высоким классом ледовых усилений способно выполнять круглогодичную навигацию на акватории Северного морского пути (СМП). При этом зимне-весенняя навигация осуществляется, как правило, только в западной части СМП (Баренцево и Карское моря). Восточная часть СМП со второй половины января по май остается практически недоступной для любых типов судов [2].

Современные представления о глобальных климатических изменениях, вызванных прежде всего парниковым эффектом, позволяют в целом прогнозировать сокращение ледового покрова Арктики в ближайшие десятилетия. Этой теме уделяется пристальное внимание со стороны ведущих ученых в области арктической климатологии и морской логистики. Так, в работах [3], [4] даны долгосрочные прогнозные оценки доступности судоходных путей в Арктике в XXI в. Отмечается, что при сохранении нынешних темпов таяния арктических льдов к середине текущего столетия для массового судоходства будут открыты высокоширотные, в том числе трансполярные арктические маршруты. В работе [5], на основе данных реанализа ERA-Interim и современных математических моделей, прогнозируются значения средней толщины льда и ледовитости акваторий СМП до 2040 г. Авторы отмечают явную тенденцию к их снижению,

однако указывают на большую неопределенность подобных оценок, в силу чего невозможно делать однозначные выводы о доступности для судоходства тех или иных арктических акваторий. В этой же работе, а также в работах [6]–[8] отмечается высокая вероятность сохранения тяжелых ледовых условий в традиционно сложных для навигации районах Новосибирских островов и пролива Вилькицкого. В работе [9] исследуется возможность краткосрочных сезонных прогнозов ледовых условий на СМП. Отмечается принципиальная реализуемость таких прогнозов, однако указывается на необходимость дальнейшего совершенствования используемых прогнозных моделей.

Значительное количество публикаций посвящено растущему потенциалу СМП в целях торгового судоходства между Европой и Азией [10]–[14]. В свете сокращающегося ледового покрова Арктики авторы исследуют выгоды использования СМП для различных типов грузоперевозок, в том числе СПГ, танкерных и контейнерных. Большинство исследователей приходят к выводам о том, что маршрут по СМП выгоден при его безледокольном прохождении, что в настоящий момент возможно лишь при наличии у судна ледового класса и только в ограниченный период года — как правило, с июля по ноябрь.

Существуют также противоположные точки зрения на перспективы развития ледовой обстановки в Арктике. Так, в работе [15] отмечается наблюдающаяся в настоящее время тенденция к снижению величины солнечной постоянной и, как следствие, уменьшению поступления на Землю солнечного тепла. По мнению автора этой работы, начало фазы глубокого похолодания ожидается примерно в 2060 г. ± 11 лет, что, в свою очередь, приведет к существенному ухудшению ледовых условий в Арктике вплоть до полной остановки любых работ по освоению арктического шельфа.

Как показывает обзор научной литературы, точные прогнозы состояния судоходных трасс в Арктике в середине – конце XXI в. затруднены из-за сложности комплексного учета ряда климатических, географических и гидрологических и иных факторов. Очевидно, что экстраполяция современных темпов изменения ледового покрова и температурного режима в Арктике до конца XXI в., даже при использовании самых современных математических моделей, не может обеспечить надежное долгосрочное прогнозирование в силу изменчивости указанных факторов. Тем не менее для среднесрочных прогнозов такой подход вполне эффективен.

Среди наиболее существенных факторов, определяющих состояние ледового покрова Российской Арктики, следует выделить водообмен Арктики с Северной Атлантикой, который осуществляется посредством океанических течений и, в первую очередь, теплого Норвежского. Дальнейшее повышение температур поверхностных вод Атлантики, по которым проходит это течение, способно значительно ускорить процесс таяния льдов в Западном секторе Российской Арктики. Еще одним значимым фактором сокращения ледового покрова является образование полыней в устьевых областях сибирских рек, которые активно поглощают солнечную радиацию (особенно в условиях полярного дня) и нагреваясь, способствуют интенсивному разрушению там дрейфующего льда. Обратный эффект может иметь место при подтверждении гипотезы [15] о влиянии солнечной постоянной на похолодание и наступление в середине XXI в. так называемого «малого ледникового периода».

Целью настоящей работы является анализ изменений ледового покрова Российской Арктики, имевших место в конце XX – начале XXI в., и выявление основных тенденций изменения условий судоходства на СМП в ближайшие десятилетия, принимая во внимание влияние наиболее существенных факторов.

Для достижения указанной цели рассмотрены следующие задачи:

1-я задача — формирование временных рядов для основных параметров, характеризующих ледовую обстановку в изучаемом секторе Арктики в теплые месяцы года (апрель – сентябрь): средней толщины льда, ледовитости, суммарной площади полыней;

2-я задача — выявление и анализ тенденций в межгодовой изменчивости указанных параметров;

3-я задача — оценка перспектив улучшения условий судоходства на СМП в ближайшие десятилетия.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследование выполнено для акватории Арктики, ограниченной нулевым меридианом с востока и 160° з.д. с запада и полностью включающей трассы СМП, а также Норвежское и Баренцево моря и приполярные регионы Северного Ледовитого океана. С учетом обширности указанной акватории она была условно разбита на четыре сектора, имеющих свои географические и климатические особенности:

1. Европейский сектор (0–60° в. д.), включающий акватории Норвежского и Баренцева морей с прилегающими к ним частями Северного Ледовитого океана. Этот сектор характерен тем, что непосредственно в него поступают теплые воды Атлантики, доставляемые Норвежским и другими поверхностными течениями, вследствие чего ледовые условия здесь наиболее благоприятны для судоходства в любые месяцы [16].

2. Западно-Сибирский сектор (60°–140° в. д), включающий акватории Карского моря и моря Лаптевых. В зимние и весенние месяцы эти моря покрыты льдами, однако в летние месяцы их ледовый покров постепенно разрушается. Существенную роль в этом играют теплые воды Великих Сибирских рек: Енисея и Оби, впадающих в Карское море, а также рек Лены, Хатанги, Анабара, Яны и Оленёк, впадающих в море Лаптевых. В период половодья в устьевые области этих рек доставляются значительные объемы теплых пресных вод, что приводит к разрушению ледового покрова и образованию разводий. Так как на это же время приходится период полярного дня, поглощение свободными ото льда водами солнечной радиации вызывает быстрое повышение их температуры и рост площадей образующихся полыней. Кроме того, их росту способствует также разрушение ледовых полей, которое активизируется в периоды прохождения циклонов. С июля по октябрь в секторе осуществляется активная навигация, в том числе безледокольная.

3. Восточно-Сибирский сектор (140°–180° в. д.), включающий всю акваторию Восточно-Сибирского моря. Данному сектору свойственны более сложные ледовые условия, поскольку количество крупных впадающих рек существенно меньше (Индигирка и Колыма). В этой связи на участках СМП, расположенных к востоку от Новосибирских островов, даже в августе – сентябре весьма часто встречаются сплоченные, в том числе многолетние льды, а навигация выполняется, как правило, под проводкой ледокола [6], [8].

4. Чукотский сектор (180°–160° з. д.), включающий акватории западной части Чукотского моря. В Чукотский сектор крупные реки не впадают, а в разрушении льдов принимают участие прорывающиеся сюда Тихоокеанские циклоны. Несмотря на то, что прибрежные районы в данном секторе расположены южнее, чем в остальных секторах, его акватории также характеризуются усложненными ледовыми условиями в любые месяцы. Наиболее благоприятные условия навигации здесь характерны для августа и сентября [16].

Из числа имеющихся характеристик состояния ледового покрова Арктики, оказывающих существенное влияние на работу водного транспорта, для исследования выбраны распределения среднемесячных значений толщины дрейфующих льдов (ТЛ), ледовитости (Л), а также суммарных площадей полыней (СПП), находящихся в том или ином секторе.

В процессе решения поставленных задач в качестве фактического материала использована информация об изменениях ТЛ и Л в изучаемом регионе Арктики за период 1979–2017 гг., полученная на основе глобального реанализа ICDC (Integrated Climate Data Center)[1], который поддерживается Объединенным центром климатических данных Гамбургского университета. Указанный реанализ содержит ежемесячные оценки ТЛ и Л всех участков акватории Мирового океана с дискретностью 13 × 13 км. Данная информация позволила получить распределения ТЛ и Л и определить значения СПП для любых интересующих секторов изучаемой акватории для любого месяца. Исследование зависимостей указанных показателей от времени позволило выявить тенденции их изменений и на этой основе оценить перспективы изменения условий судоходства на СМП в ближайшие десятилетия.

[1] Integrated Climate Data Center. Ocean. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean/ (дата обращения: 01.010.2019).

Адекватность реанализа ICDC для арктических акваторий была ранее проверена авторами в работах [6], [7] путем сличения с данными реальных наблюдений, доступными через портал ЕСИМО[1]. По полученным из реанализа значениям ТЛ и Л для всех изучаемых участков акватории Арктики для каждого месяца с апреля по сентябрь 1979–2017 гг. были сформированы временные ряды. Суммарная площадь полыней, относящихся к определенному сектору и месяцу, вычислялась следующим образом:

$$\text{СПП} = S - PG,$$

где S — суммарная площадь акваторий Арктики, относящихся к рассматриваемому сектору;

P — площадь одного квадрата координатной сетки реанализа 13·13=169 км^2;

G — суммарное значение ледовитости во всех узлах координатной сетки, относящихся к рассматриваемому сектору.

В качестве количественной меры тенденции межгодовых изменений того или иного показателя было использовано значение углового коэффициента линейного тренда соответствующего временного ряда, вычисленное за отрезок времени длиной 39 лет методом наименьших квадратов.

При оценке статистической значимости трендов каждого временного ряда учитывалось, что отношение величины углового коэффициента этого ряда к стандартной ошибке его определения (t-статистика) характеризует среднее отношение «сигнал – шум». Отношение среднего квадрата значений (F), описываемых регрессией, к среднему квадрату остатков (отклонений от линии регрессии) также характеризует отношение «сигнал – шум», но уже в терминах однофакторного дисперсионного анализа [17].

F-статистика подчиняется распределению Фишера (при том же числе степеней свободы) [18]. Коэффициент детерминации R^2 характеризует долю дисперсии, с учетом аппроксимирующей зависимости, в суммарной дисперсии ряда. Исходя из этого, значимость оценки углового коэффициента тренда определялась с использованием соответствующих распределений вероятности t и F (иными словами, оценивалась вероятность подтверждения «нулевой гипотезы» P_0 о том, что линейный тренд значимым не является) [19].

В данной работе в качестве значимых рассматривались оценки, при которых $P_0 \leq 0{,}05$, т. е. гипотеза о наличии значимого тренда была адекватна с вероятностью ≥ 95 %.

Выявленные тренды во всех сопоставляемых отрезках изучаемых временных рядов были скомпенсированы, после чего для оценки значимости статистических связей между ними был применен корреляционный анализ и критерий Стьюдента [17].

Результаты (Results)

В соответствии с ранее изложенной методикой для каждого сектора и каждого месяца с апреля по сентябрь вычислены зависимости СПП от времени. В качестве примера на рис. 1 представлены такие зависимости для июля, августа и сентября. Из рис. 1, *а* и *б* видно, что в Европейском и Западно-Сибирском секторе изменения площади акваторий, свободных от льда в июле–сентябре, в 1979–2017 гг. представляли собой осцилляции с периодом, близким к трем–четырем годам, в которых присутствовали значимые возрастающие тренды. Характер этих изменений в целом соответствует существующим представлениям об ожидаемых последствиях глобального потепления климата, приводящего к ускорению таяния арктических льдов.

Следует отметить, что на отрезке времени 2007–2017 гг. значимая тенденция к увеличению СПП выявлена лишь в июле. Последнее, по-видимому, объясняется тем, что к августу и сентябрю в Европейском секторе уже практически не остается дрейфующих льдов, образовавшихся там в течение холодного времени года. За период полярного дня они успевают растаять. Встречающиеся в высокоширотных районах этого сектора дрейфующие льды попадают туда, как правило, из более

[1] Единая Государственная система информации об обстановке в Мировом океане [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://data.oceaninfo.ru/ (дата обращения: 01.10.2019).

восточных секторов благодаря Трансарктическому течению. Следовательно, межгодовые изменения СПП в Европейском секторе в ближайшие годы будут определяться состоянием ледового покрова в более восточных секторах.

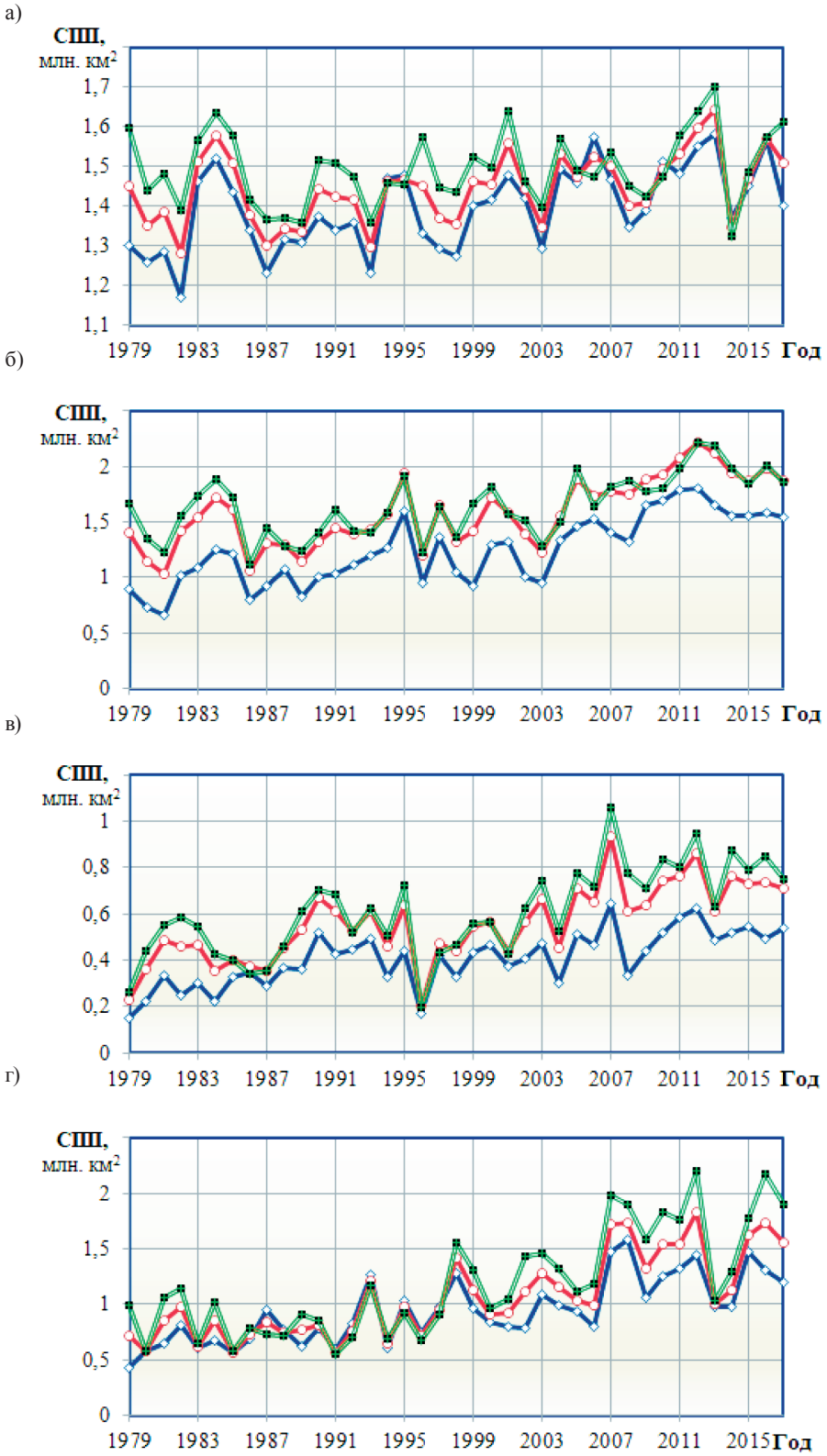

Рис. 1. Зависимости суммарных площадей полыней от времени по секторам:
а — Европейский; *б* — Западно-Сибирский; *в* — Восточно-Сибирский; *г* — Чукотский
Условные обозначения:
— июль; — август; — сентябрь

В изменениях СПП, происходивших в Западно-Сибирском секторе с апреля по сентябрь в 2007–2017 гг., выявлены значимые возрастающие тренды, что, по-видимому, объясняется гораздо меньшими размерами полыней, образующихся в Карском море и море Лаптевых в период половодья на впадающих в них реках. Как следствие, к августу и сентябрю в указанных морях остается довольно много нерастаявшего за полярный день дрейфующего льда местного происхождения. Интенсивность его таяния тем выше, чем теплее вода в полынье. Размеры полыньи, в свою очередь, определяются температурой и объемом пресных вод, поступающих в море во время половодья. Следовательно, при дальнейшем потеплении климата в бассейнах сибирских рек, тенденции к росту СПП в теплый период года в данном секторе, вероятнее всего, сохранятся.

На рис. 1, *в* показано, что в Восточно-Сибирском секторе изменения СПП также носили осциллирующий характер, но содержали возрастающие тренды лишь в период до 2007 г. В последующий период присутствующие в них тренды для сентября и августа являются убывающими, а для июля не являются значимыми. Из рис. 1, *г* следует, что и в Чукотском секторе на отрезке времени 2007–2017 гг. в изменениях СПП значимых возрастающих трендов не выявлено. Значения угловых коэффициентов линейных трендов рассмотренных временных рядов СПП приведены в таблице.

Значения угловых коэффициентов линейных трендов, присутствующих в отрезках рассматриваемых временных рядов СПП в течение 1979–2006 и 2007–2017 гг.

Значения угловых коэффициентов линейных трендов, тыс. км^2/год						
Отрезок времени	1979–2006 гг.			2007–2017 гг.		
Сектор / месяц	Июль	Август	Сентябрь	Июль	Август	Сентябрь
Европейский	**5,5**	2,9	0,1	**5,1**	**6,6**	**8,1**
Западно-Сибирский	**16,7**	**12,1**	**5,3**	**9,4**	**12,9**	**14,1**
Восточно-Сибирский	**7,2**	**8,2**	**7,7**	2,7	**–4,1**	**–10,2**
Чукотский	**14,9**	16,9	18,9	–19,6	–12	–4,3

Примечание. Жирным шрифтом выделены показатели, признанные статистически значимыми

Как видно из рис. 1 и табличных данных, в Европейском и Западно-Сибирском секторах в течение последнего десятилетия ледовые условия в теплые месяцы являлись более благоприятными для судоходства, однако в Восточно-сибирском и Чукотском секторах они усложнялись. Данный факт подтверждается и результатами анализа распределений ТЛ и Л, существовавших в Арктике в теплые месяцы периода 1979–2017 гг. В качестве примера на рис. 2 представлены построенные по данным реанализа ICDC с использованием [17] распределения средних и максимальных значений ледовитости в сентябре за период 2007–2017 гг.

Из рис. 2, *а* видно, что наименьшие значения ледовитости в пределах акватории Российской Арктики в сентябре соответствуют Европейскому сектору. Дрейфующие льды полностью отсутствовали в Норвежском море и лишь эпизодически встречались в Баренцевом. Сплоченные льды наблюдались только севернее 82-й параллели.

Благоприятствующие судоходству ледовые условия в сентябре существовали также в Западно-Сибирском секторе, где северная граница части его акватории со средними значениями Л > 0,2 в Карском море располагалась за параллелью 82°с. ш., а в море Лаптевых — за параллелью 78°с. ш. Наиболее сложные условия для работы судов встречались в Восточно-Сибирском секторе, где средние значения ледовитости превышали 0,2 на любых участках его акватории. К востоку от пролива Лонга (в Чукотском секторе) средние значения этого показателя в сентябре не превосходили уровень 0,2.

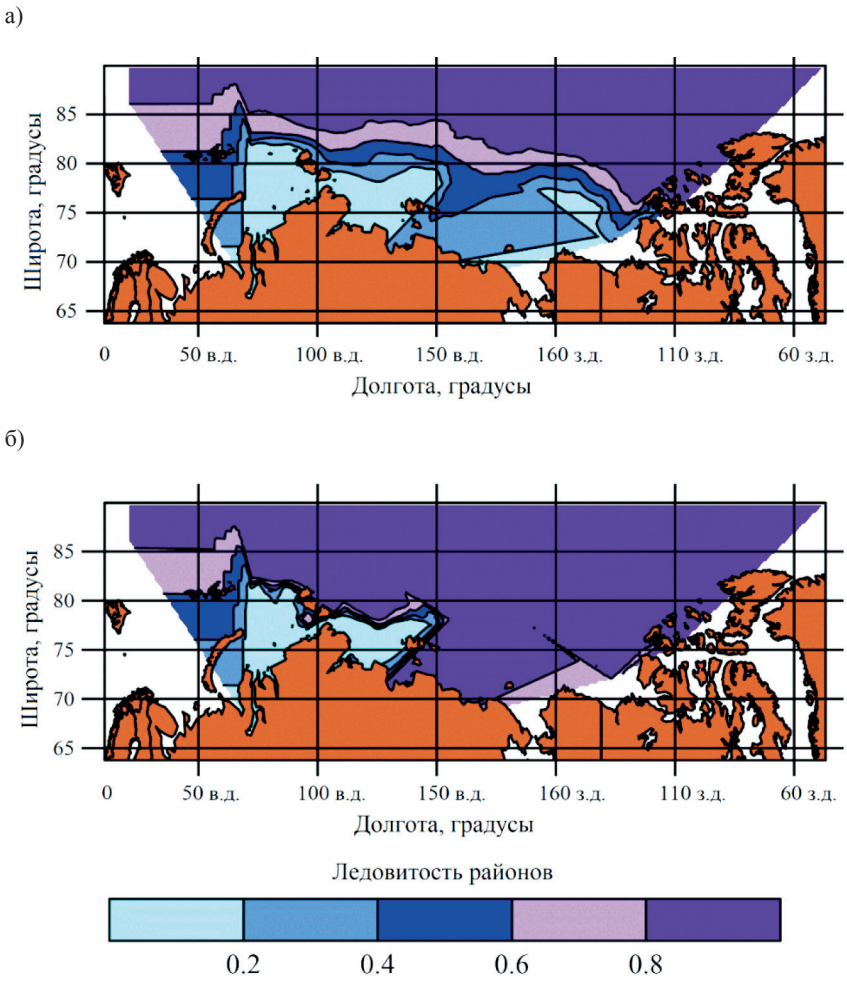

Рис. 2. Распределение ледовитости в сентябре в период 2007–2017 гг.:
а — средние значения; *б* — максимальные значения

Рис. 2, *б* показывает, что в Европейском, Западно-Сибирском и Чукотском секторах особенности распределения максимальных сентябрьских значений ледовитости в 2007–2017 гг. были в целом аналогичны распределениям их средних значений. При этом в Восточно-Сибирском секторе максимальные значения Л на любых участках акватории Восточно-Сибирского моря превышали уровень 0,8. Столь же высокая ледовитость в данном периоде отмечалась и в канадской части акватории Арктики, которая является основным поставщиком дрейфующих льдов, переносимых Трансарктическим течением в высокоширотные районы Российской Арктики. На рис. 3 представлены распределения средних и максимальных значений толщины льда в сентябре, вычисленных за 2007–2017 гг. по данным реанализа ICDC.

Из рис. 3, *а* следует, что распределения средних значений ТЛ в 2007–2017 гг. были, в значительной мере, подобны распределениям ледовитости. В Европейском секторе льды, значения ТЛ которых превышали 0,8 м, в сентябре встречались лишь в его северо-восточной части (начиная от побережья района архипелага Франца-Иосифа). На всей акватории Норвежского и большей части Баренцева морей каких-либо льдов не наблюдалось. В районах сектора, расположенных к северу от параллели 85°с.ш., средняя толщина встречающихся льдов превосходила 1,2 м. За той же параллелью аналогичные льды присутствовали и в Западно-Сибирском секторе. На всех участках прибрежных трасс СМП, проходящих в этом секторе, и практически всех участках акваторий Карского моря (кроме Новоземельского ледового массива) и в море Лаптевых дрейфующих льдов со средними значениями ТЛ > 0,4 м не было. На всей акватории Восточно-Сибирского моря, а также в Чукотском море к северу от параллели 70° с. ш. средние значения ТЛ превышали 0,4 м.

В районах, расположенных севернее 75° с. ш., средние значения ТЛ превышали 0,8 м, а севернее 80° с. ш. — 1,2 м. Льды с наибольшими средними значениями ТЛ (более 2 м) встречались в районах Арктики, расположенных у островов Канадского архипелага.

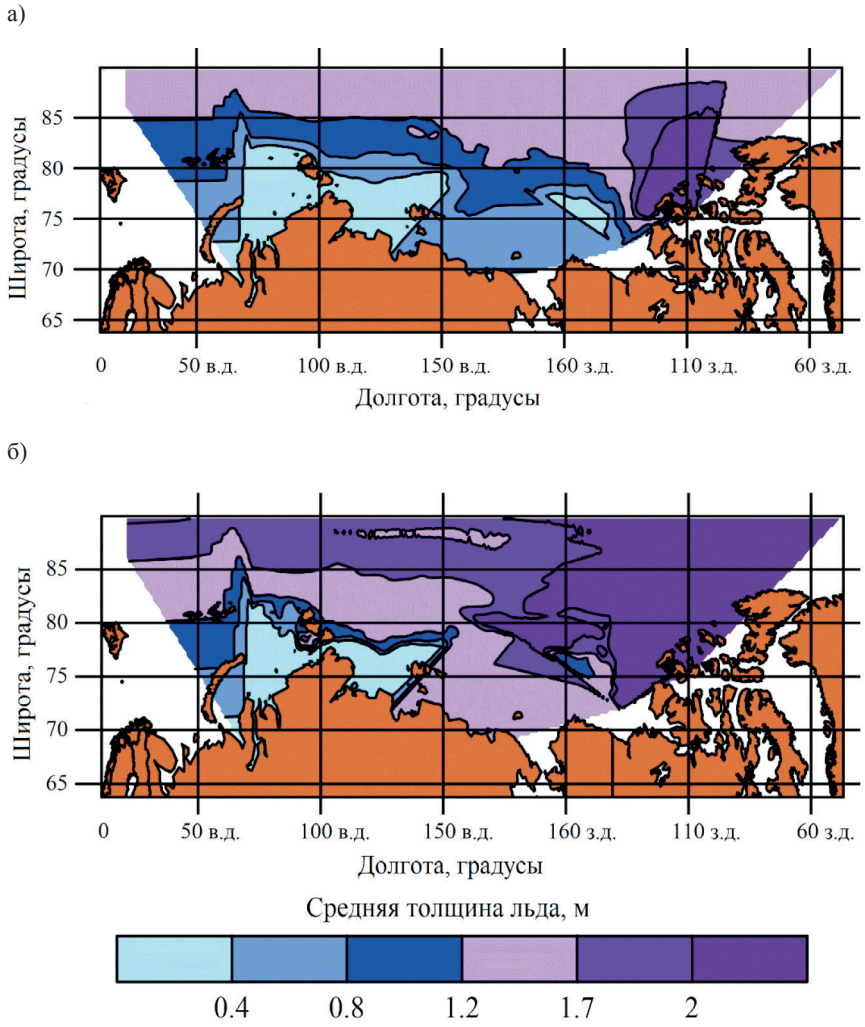

Рис. 3. Распределение толщины льда в сентябре в период 2007–2017 гг.:
а — средние значения; *б* — максимальные значения

Как видно из рис. 3, *б*, распределение максимальных значений ТЛ в изучаемом регионе Арктики было практически таким же, но южные границы областей распространения льдов с теми же показателями располагались южнее. На всех участках маршрутов СМП, относящихся к Европейскому и Западно-Сибирскому секторам, максимальные значения ТЛ не превышали 0,8 м, что, в принципе, позволяло судам ледового класса Arc4 и выше осуществлять здесь самостоятельную навигацию. Непосредственно к востоку от Новосибирских островов максимальные значения ТЛ встречающихся здесь льдов всюду превосходили 1,2 м. Вследствие этого навигация для судов классов Arc4 и ниже была возможна, как правило, лишь в сопровождении ледокола. К северу от параллели 75° с. ш. в Чукотском море и восточнее от него встречались льды с максимальными значениями ТЛ более 2 м (наибольшие значения это показателя в 2008–2017 гг. составляли 5,42 м), преодолевать которые не всегда удавалось даже самым мощным ледоколам.

Обсуждение (Discussion)

Наиболее реалистичным сценарием развития ситуации в Арктике в условиях значительной неопределенности допустимо рассматривать такой, при котором тенденции изменений ледовых

условий, выявленные в 2007–2017 гг., сохранятся в следующем десятилетии. Адекватность такого допущения подтверждают и результаты анализа факторов, которые в современном периоде порождали изменчивость характеристик дрейфующих льдов.

Как отмечалось ранее, в летние месяцы приходную часть ледового баланса любого из рассмотренных секторов Арктики образует миграция дрейфующего льда с водами Трансарктического течения. Основными компонентами его расходной части являются процессы таяния льда, а также вынос его остатков течениями в Гренландское море и далее — в Северную Атлантику.

Как известно из физики моря [20], чем меньше ледовитость некоторой акватории, тем, при прочих равных условиях, меньше ее альбедо и больше коэффициент поглощения солнечной радиации. Поглощение солнечной радиации происходит преимущественно в приповерхностном слое вод и приводит к повышению их температуры. Следовательно, к основным процессам образования тепла, расходуемого при таянии дрейфующих льдов, относится поглощение солнечной радиации участками арктических акваторий с малой ледовитостью. Чем больше на некотором участке водной поверхности образуется тепла, тем интенсивнее на нем происходит таяние дрейфующего льда и быстрее увеличивается СПП. В условиях, когда температуры поверхностных вод положительны, разрушение ледовых полей циклонами также способствует росту СПП. При их разрушении не только увеличивается площадь поверхности, на которой происходит теплообмен льда с окружающими его более теплыми водами, но и повышается коэффициент поглощения солнечной радиации соответствующим участком акватории.

Указанные условия существуют в течение полярного дня в любых районах Арктики, где располагаются обширные полыньи. В другие сезоны в океанических районах с повышенной ледовитостью температуры поверхностных вод близки к точке замерзания. Поэтому увеличение площади поверхности, на которой происходит теплообмен льда с водной средой, не приводит к повышению интенсивности его таяния. Если при этом в таких районах температуры воздуха отрицательны, то разрушенные льды будут, наоборот, смерзаться, увеличиваясь в объеме. В таких условиях разрушение ледовых полей циклонами приведет не к снижению ледовитости, а наоборот — к ее увеличению.

В Европейском секторе тепло, которое летом вызывает таяние дрейфующих льдов, образуется не только в результате поглощения солнечной радиации, но и доставляется приходящими из Атлантики теплыми течениями. В 2007–2017 гг. к началу августа таяние приводило к ликвидации в данном регионе Арктики практически всего льда, формировавшегося в течение холодного периода года. Встречающиеся в высоких широтах этого сектора дрейфующие льды были в основном «неместного» происхождения. Таким образом, можно предположить, что при осуществлении в следующем десятилетии рассматриваемого «сценария», возникновение в Европейском секторе значимых трендов в изменениях СПП, ТЛ и Л в августе и сентябре маловероятно. В июле СПП будет и далее возрастать, а ТЛ и Л будут снижаться.

В Западно-Сибирском и Восточно-Сибирском секторах в течение холодного периода года 2007–2017 гг. дрейфующих льдов образовывалось значительно больше, а теплой воды, участвующей в первоначальном образовании в них разводий, даже в периоды половодий на сибирских реках поступало значительно меньше. Тем не менее разрушение ледового покрова здесь начиналось именно в морских устьях рек в периоды половодья. Поскольку общее количество тепла, которое доставлялось в периоды половодья в моря Лаптевых и Карское реками Енисей, Обь, Лена, Хатанга, Анабар Яна и Оленёк, было гораздо больше, чем в Восточно-Сибирское море реками Индигирка и Колыма, скорость увеличения СПП в летние месяцы в Западно-Сибирском секторе была значительно выше, чем в Восточно-Сибирском. Этому способствовал также более частый приход циклонов в Восточно-Сибирский сектор.

В Чукотском секторе разводья возникали под влиянием тепла, которое приносили в Чукотское море относительно теплые и соленые воды Берингова моря. Поэтому здесь процесс разрушения ледового покрова начинался непосредственно у выхода из Берингова пролива. В Чукотский сектор циклоны в 2008–2017 гг. приходили чаще, чем в Восточно-Сибирский, но расходы

Беринговоморского течения невелики, а доставляемые им воды являются солеными. Вследствие этого приносимая этим течением в Чукотское море вода, сравнительно быстро охлаждаясь, исчезала из поверхностного слоя, а средние температуры на преобладающей части акватории рассматриваемого сектора оставались близкими к точке замерзания. В результате этого воздействие на его ледовый покров циклонов приводило к иным последствиям, а именно полынья в Чукотском море летом появлялась и росла в области влияния Беринговоморского течения быстрее, чем в Восточно-Сибирском море, но значительно медленнее, чем в Карском море и море Лаптевых. Поскольку данные особенности процессов разрушения ледового покрова Арктики в теплые месяцы следующего десятилетия существенно измениться не могут, представляется вероятным, что выявленные тенденции динамики СПП, ТЛ и Л в рассмотренных арктических акваториях сохранятся.

Установленный факт уменьшения СПП в Восточно-Сибирском и Чукотском секторах в 2007–2017 гг. не согласуется с общей теорией ускорения темпа таяния арктических льдов из-за глобального потепления и требует дополнительного изучения. Возможным объяснением может быть ослабление солнечной активности, прогнозируемое в работе [15], которое и далее может, в определенной степени, компенсировать парниковое потепление и сохранять ледовые условия в этой части Арктики тяжелыми.

Из выполненного анализа следует, что при осуществлении рассматриваемого сценария будущего ледовые условия в Западно-Сибирском секторе в следующем десятилетии станут более благоприятными для судоходства, а периоды безледокольной навигации будут постепенно увеличиваться. В Восточно-Сибирском и Чукотском секторах, улучшений ледовых условий, наоборот, не ожидается и даже в летнюю навигацию, как и ранее, будет необходима помощь ледоколов.

Выводы (Conclusion)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В результате исследования установлено, что в Европейском и Западно-Сибирском секторах Российской Арктики в доступный для статистического анализа период 1979–2017 гг. происходили явные изменения состояния ледового покрова в сторону его уменьшения. Это способствовало развитию судоходства на трассах Северного морского пути и увеличению периодов летне-осенней безледокольной навигации.

2. В Восточно-сибирском и Чукотском секторах в период 1979–2007 гг. происходили аналогичные процессы, однако далее стали проявляться обратные тенденции: увеличение ледовитости и толщины льда, уменьшение суммарной площади полыней. Условия для судоходства в этих секторах в последнем десятилетии не улучшались, а безопасность навигации, как и ранее, зависела от своевременного предоставления ледокольной проводки даже в летние месяцы.

3. При осуществлении в ближайших десятилетиях сценария будущего, при котором современные тенденции изменчивости ледового покрова Российской Арктики сохранятся, в ее Европейском и Западно-Сибирском секторах (прежде всего в Карском море и море Лаптевых) будут постепенно увеличиваться периоды безледокольной навигации. В Восточно-Сибирском и Чукотском морях улучшение ледовых условий не ожидается. В этих акваториях даже в теплые месяцы для развития устойчивого судоходства потребуются услуги ледоколов. В этой связи стратегия Российской Федерации, направленная на модернизацию и расширение ледокольного флота, выглядит целиком оправданной.

4. Выявленные особенности изменений состояния ледового покрова Восточно-Сибирского и Чукотского секторов Арктики позволяют с высокой степенью уверенности утверждать, что начало движения по транзитному трансарктическому высокоширотному маршруту в ближайшие два десятилетия не произойдет и главной арктической транспортной магистралью будет оставаться Северный морской путь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Олерский В.* Комплексный проект развития Северного морского пути / В. Олерский // Транспортная стратегия – XXI век. — 2015. — № 29. — С. 8–9.

2. *Ольховик Е. О.* Исследование изменения структуры транспортного флота в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1225–1233. DOI: 10.21821/2309-51802018-10-6-1225-1233.

3. *Aksenov Y.* On the Future Navigability of Arctic Sea Routes: High-resolution Projections of the Arctic Ocean and Sea Ice / Y. Aksenov, E. E. Popova, A. Yool. A. G. Nurser, T. D. Williams, L. Bertino, J. Bergh // Marine Policy. — 2017. — Vol. 75. — Pp. 300–317. DOI: 10.1016/j.marpol.2015.12.027.

4. *Smith L. C.* New Trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury / L. C. Smith, S. R. Stephenson // Proceedings of theNational Academy of Sciences of the United States of America. — 2013. — Vol. 110. — Is. 13. — Pp. E1191–E1195. DOI: 10.1073/pnas.1214212110.

5. *Gascard J.-C.* Future sea ice conditions and weather forecasts in the Arctic: Implications for Arctic shipping / J.-C. Gascard, K. Riemann-Campe, R. Gerdes, H. Schyberg, R. Randriamampianina, M. Karcher, J. Zhang, M. Rafizadeh // Ambio. — 2017. — Vol. 46. — Is. 3. — Pp. 355–367. DOI: 10.1007/s13280-017-0951-5.

6. *Холопцев А. В.* Перспективы безледокольной навигации транзитных судов в районе Новосибирских островов / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета мор-ского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 683–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-683-695.

7. *Холопцев А. В.* Перспективы безледокольной навигации судов класса Arc7 в районе Новосибирских островов в зимний период / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 867–879. DOI: 10.21821/2309-5180- 2019-11-5-867-879.

8. *Шаронов А. Ю.* Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море / А. Ю. Шаронов, В. А. Шматков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 170–182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.

9. *Melia N.* Towards seasonal Arctic shipping route predictions / N. Melia, K. Haines, E. Hawkins, J. J. Day // Environment Research Letters. — 2017. — Vol. 12. — Is. 8. — Pp. 084005. DOI: 10.1088/1748–9326/aa7a60.

10. *Milaković A.*-S. Current status and future operational models for transit shipping along the Northern Sea Route / A.-S. Milaković, B. Gunnarsson, S. Balmasov, S. Hong, K. Kim, P. Schütz, S. Ehlers // Marine Policy. — 2018. — Vol. 94. — Pp. 53–60. DOI: 10.1016/j.marpol.2018.04.027.

11. *Schach M.* Impacts of an ice-free Northeast Passage on LNG markets and geopolitics / M. Schach, R. Madlener // Energy Policy. — 2018. — Vol. 122. — Pp. 438–448. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.07.009.

12. *Faury O.* The Northern Sea Route competitiveness for oil tankers / O. Faury, P. Cariour // Transportation Research Part A: Policy and Practice. — 2016. — Vol. 94. — Pp. 461–469. DOI: 10.1016/j.tra.2016.09.026.

13. *Lee S. W.* Economic Possibilities of Shipping through Northern Sea Route / S. W. Lee, J. M. Song // The Asian Journal of Shipping and Logistics. — 2014. — Vol. 30. — Num. 3. — Pp. 415–430. DOI: 10.1016/j.ajsl.2014.12.009.

14. *Beveridge L.* Interest of Asian Shipping Companies in Navigating the Arctic / L. Beveridge, M. Fournier, F. Lasserre, L. Huang, and P.L. Têtu // Polar Science. — 2016. — Vol. 10. — Is. 3. — Pp. 404–414. DOI: 10.1016/j.polar.2016.04.004.

15. *Абдусаматов Х.И.* Лунная обсерватория для исследования климата Земли в эпоху глубокого похолодания / Х.И. Абдусаматов. — СПб.: Наука, 2017. — 128 с.

16. Pub. 183 Sailing directions (Enroute). North Coast of Russia. — Springfield, Virginia: NGA, 2017. — 191 p.

17. *Айвазян С. А.* Прикладная статистика и основы эконометрики / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. — М.: Юнити, 1998. — 1022 с.

18. *Закс Ш.* Теория статистических выводов / Ш. Закс. Пер. с англ. Е. В. Чепурина; под ред. Ю.К. Беляева. — М.: Мир, 1985. — 776 с.

19. *Крамер Г.* Математические методы статистики / Г. Крамер. — М. Мир, 1975. — 648 с.

20. *Шулейкин В.В.* Физика моря / В.В. Шулейкин. — М.: Ленанд, 2019. — 1096 с.

REFERENCES

1. Olerskii, V. "Kompleksnyi proekt razvitiya Severnogo morskogo puti." *Transportnaya strategiya – XXI vek* 29(2) (2015): 8–9.

2. Ol'khovik, Evgeniy O. "Research of changes in the transport fleet structure in the water area of the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1225–1233. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1225-1233.

3. Aksenov, Yevgeny, E. E. Popova, A. Yool. A. J. G. Nurser, Timothy D. Williams, Laurent Bertino, and Jon Berg. "On the Future Navigability of Arctic Sea Routes: High-resolution Projections of the Arctic Ocean and Sea Ice." *Marine Policy* 75 (2017): 300–317. DOI: 10.1016/j.marpol.2015.12.027.

4. Smith, Laurence C., and Scott R. Stephenson. "New Trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110.13 (2013): 1191–1195. DOI: 10.1073/pnas.1214212110

5. Gascard, Jean-Claude, Kathrin Riemann-Campe, Rüdiger Gerdes, Harald Schyberg, Roger Randriamampianina, Michael Karcher, Jinlun Zhang and Mehrad Rafizadeh. "Future sea ice conditions and weather forecasts in the Arctic: Implications for Arctic shipping." *Ambio* 46.3 (2017): 355–367. DOI: 10.1007/s13280-017-0951-5.

6. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. "Prospects for unescorted navigation of transit vessels in the region of the New Siberian islands." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 683–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-683-695.

7. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. "Prospects for unescorted navigation of arc7 ice-class vessels in the region of the new siberian islands during the winter period." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 867–879. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-867-879.

8. Sharonov, Andrei Yu., and Vladimir A. Shmatkov. "The problem of hydrometeorological maintenance of year-round navigation in the East Siberian Sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 170–182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.

9. Melia, Nathanael, Keith Haines, and Ed Hawkins. "Towards seasonal Arctic shipping route predictions." *Environment Research Letters* 12.8 (2017): 084005. DOI: 10.1088/1748–9326/aa7a60.

10. Milakovic, Aleksandar-Sasa, Bjørn Gunnarsson, Sergey Balmasov, Sungwon Hong, Kitae Kim, Peter Schütz, and Sören Ehlers. "Current status and future operational models for transit shipping along the Northern Sea Route." *Marine Policy* 94 (2018): 53–60. DOI: 10.1016/j.marpol.2018.04.027.

11. Schach, Michael, and Reinhard Madlener. "Impacts of an ice-free Northeast Passage on LNG markets and geopolitics." *Energy Policy* 122 (2018): 438–448. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.07.009.

12. Faury, Olivier, and Pierre Cariou. "The Northern Sea Route competitiveness for oil tankers." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 94 (2016): 461–469. DOI: 10.1016/j.tra.2016.09.026.

13. Lee, Sung-Woo, and Ju-Mi Song. "Economic possibilities of shipping though Northern Sea route." *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 30.3 (2014): 415–430. DOI: 10.1016/j.ajsl.2014.12.009.

14. Beveridge, Leah, Mélanie Fournier, Frédéric Lasserre, Linyan Huang, and Pierre-Louis Têtu. "Interest of Asian Shipping Companies in Navigating the Arctic." *Polar Science* 10.3 (2016): 404–414. DOI: 10.1016/j.polar.2016.04.004.

15. Abdusamatov, Kh. I. *Lunnaya observatoriya dlya issledovaniya klimata zemli v epohu glubokogo pohlodaniya*. SPb: Nauka, 2017.

16. *Pub. 183 Sailing directions (Enroute). North Coast of Russia*. Springfield, Virginia: NGA, 2017.

17. Aivazyan, S.A., and V.S. Mhitaryan. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki*. M.: Yuniti, 1998.

18. Zaks, Sh. *Teoriya statisticheskih vyvodov*. Edited by Yu. K. Belyaev. M.: Mir, 1985.

19. Kramer, G. *Matematicheskie metody statistiki*. M.: Mir, 1975.

20. Shuleikin, V.V. *Fizika morya*. M.: Lenand, 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Холопцев Александр Вадимович —
доктор географических наук, профессор
Севастопольское отделение ФГБУ
«Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Советская, 61
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
e-mail: *kholoptsev@mail.ru*

Подпорин Сергей Анатольевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
e-mail: *s.a.podporin@gmail.com*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kholoptsev, Aleksandr V. —
Dr. of Geographical Sciences, professor
Sevastopol branch of FSBI
"N. N. Zubov's State Oceanographic Institute"
61 Sovetskya Str., Sevastopol, 299011, Russian Federation
Sevastopol State University
33 Universitetskya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
e-mail: *kholoptsev@mail.ru*

Podporin, Sergey A. —
PhD, associate professor
Sevastopol State University
33 Universitetskya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
e-mail: *s.a.podporin@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 8 января 2020 г.
Received: January 8, 2020.