

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-923-931

CHANGE TRENDS OF MEAN ICE THICKNESS, WATER LEVEL, AND SURFACE SALINITY IN THE LAPTEV SEA IN WINTER-SPRING PERIOD UNDER FURTHER CLIMATE WARMING CONDITIONS

S. A. Podporin, A. V. Kholoptsev

Sevastopol branch of FSBI “N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute”,
Sevastopol, Russian Federation

The purpose of the paper is to identify the most likely trends in interannual changes of the ice cover thickness on sections of the Northern Sea Route in the Laptev Sea in the winter-spring months under conditions of further climate warming. A hypothesis that in the modern period such changes can be significantly impacted by melting of submarine permafrost layers located inside the sea shelf, — a process caused by their heat exchange with bottom sea waters, is put forward. To verify the hypothesis, trends in interannual changes in ice thickness are compared with trends in variations in sea level and surface salinity. As factual material, data from the global reanalysis GLORYS12v1 is used. The research methodology is based on the standard methods of mathematical statistics. A correlation between the trends of the above processes has been found. It allows us to confirm the hypothesis put forward. The results obtained indicate that, under the conditions of ongoing climate warming, there remains a high probability that the average thickness of the ice cover will not decrease, and the ice situation in the Laptev Sea in the winter-spring months will not improve significantly. The latter confirms the need and feasibility of further development of the Russian icebreaker fleet.

Keywords: Laptev Sea, Northern Sea Route, shipping, ice conditions, ice thickness, salinity, sea level, climate warming, trend.

For citation:

Podporin, Sergey A., and Aleksandr V. Kholoptsev. “Change trends of mean ice thickness, water level, and surface salinity in the Laptev Sea in winter-spring period under further climate warming conditions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 923–931. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-923-931.

УДК 656.61.052: 551.583

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ СРЕДНЕЙ ТОЛЩИНЫ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА, УРОВНЯ И ПОВЕРХНОСТНОЙ СОЛЕННОСТИ ВОД МОРЯ ЛАПТЕВЫХ В ЗИМНЕ-ВЕСЕННИЙ ПЕРИОД ПРИ ДАЛЬНЕЙШЕМ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА

С. А. Подпорин, А. В. Холопцев

Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт
имени Н. Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация

В работе выполнено исследование проблемы выявления наиболее вероятных тенденций ледовой обстановки и ее изменений в период зимне-весенней навигации при различных сценариях дальнейших перемен климата, актуальной для физической географии, климатологии, развития и обеспечения безопасности судоходства. Целью статьи является выявление наиболее вероятных тенденций межгодовых изменений толщины ледяного покрова на участках маршрутов Северного морского пути в море Лаптевых в зимне-весенние месяцы в условиях дальнейшего потепления климата. Выдвинута гипотеза о том, что в современном периоде на такие изменения может оказывать значительное влияние процесс таяния присутствующих в недрах шельфа многолетнемерзлых пород, вызванный их теплообменом с морскими придонными водами.

Для проверки указанной гипотезы сопоставлены тенденции межгодовых изменений толщины ледяного покрова моря Лаптевых с тенденциями вариаций его уровня и поверхностной солёности. В качестве фактического материала использованы данные глобального реанализа GLORYS12v1. Методика исследования основана на применении стандартных методов математической статистики. Между тенденциями указанных процессов выявлено соответствие, что позволяет подтвердить выдвинутую гипотезу. Отмечается, что одним из факторов, способствующих сохранению сложной ледовой обстановки в море Лаптевых, может являться глобальное потепление климата, которое ускорило процесс таяния субмаринных толщ многолетнемерзлых пород на его шельфе и вызвало опреснение его поверхностных вод. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в условиях происходящего потепления климата высокой остается вероятность того, что средняя толщина ледяного покрова не будет снижаться, а ледовая обстановка в море Лаптевых в зимне-весенние месяцы существенно не улучшится. Последнее подтверждает необходимость и целесообразность дальнейшего развития ледокольного флота России.

Ключевые слова: море Лаптевых, Северный морской путь, судоходство, ледовые условия, толщина льда, солёность, уровень моря, потепление климата, тенденция.

Для цитирования:

Подпорин С. А. Тенденции изменения средней толщины ледяного покрова, уровня и поверхностной солёности вод моря Лаптевых в зимне-весенний период при дальнейшем потеплении климата / С. А. Подпорин, А. В. Холопцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 923–931. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-923-931.

Введение (Introduction)

Одним из приоритетов Российской Федерации в Арктике является дальнейшее развитие судоходства по Северному морскому пути (далее — СМП)¹. Основным препятствующим этому фактором является ледовая обстановка, которая в зимне-весенние месяцы на большинстве его участков отличается повышенной сложностью. В связи с этим выявление наиболее вероятных тенденций ее изменения в периоды зимне-весенней навигации при различных сценариях дальнейших перемен климата является актуальной проблемой физической географии, климатологии и безопасности судоходства.

Наибольший интерес решение указанной проблемы представляет для районов СМП, характеризующихся особенно суровым климатом и повышенной ледовитостью. К ним, в частности, относятся районы № 11–17, расположенные в море Лаптевых², в которых сплоченность ледяного покрова в зимне-весенние месяцы достигает 10 баллов, а его средняя толщина превышает 1,5 м [1]. Актуальность круглогодичной навигации в море Лаптевых в настоящее время возрастает [2]. Так, за последние пять лет в зимне-весенний сезон был выполнен ряд пробных транзитных рейсов танкерами класса Ямалмакс в январе-феврале, а также мае [3], [4]. Их целью являлась оценка возможности разумного расширения временных рамок навигационного периода на СМП. Было продемонстрировано, что навигация в эти месяцы судами такого типа в принципе осуществима, однако несет высокие риски не только из-за тяжелой ледовой обстановки, но и ввиду недостаточности оперативного гидрометеорологического и гидрографического обеспечения [5].

Вопросы дальнейшего развития судоходства в восточных морях российской Арктики в зимне-весенний период достаточно часто исследуются в профильных научных периодических изданиях. Так, в работе [4] проанализированы вопросы соответствия технических характеристик современных судов ледового класса Arc7 фактически существующим условиям зимне-весенней навигации в море Лаптевых, а в работе [6] дополнительно отмечается, что безопасное плавание в этот период возможно только при должном и своевременном учете состояния и расположения заприпайных полыней и ледовых массивов.

¹ План развития Северного морского пути до 2035 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://government.ru/news/46171> (дата обращения: 10.10.2023).

² Правила плавания в акватории Северного морского пути [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nsra.ru/ru/ofitsialnaya_informatsiya/pravila_plavaniya/f137.html (дата обращения: 20.10.2023).

Согласно существующим представлениям о тенденциях изменения характеристик ледяного покрова арктических морей в период современного потепления климата (с конца 70-х гг. XX в. и до настоящего времени), их среднемесячные значения повсеместно снижались [7]–[9]. Вместе с тем в источниках [10], [11] показано, что в период 2012–2020 гг. в Сибирском и Дальневосточном секторах Арктики, включающих акваторию моря Лаптевых, в летние месяцы прекратилось снижение суммарной площади и объема ледяного покрова и началось их увеличение. Причины этого феномена, обнаруженного также в некоторых других арктических морях в другие сезоны, до конца не выяснены, что не позволяет учитывать их при ориентировочном прогнозировании характеристик ледяного покрова (и прежде всего толщины льда) на водных путях российской Арктики. В связи с этим авторами данной работы (*Прим. ред.*) была выдвинута гипотеза о том, что значимой причиной выявленной перемены тенденций межгодовых изменений толщины и объема льда в море Лаптевых является таяние субмаринных толщ многолетнемерзлых пород (далее — СММП), присутствие которых подтверждено в недрах его шельфа [12].

Данный процесс является следствием глобального потепления климата, при котором температура придонных вод повышается и СММП постепенно разрушаются («деградируют»). Скорость этого процесса оценивается в 12–18 см/год [13]. Поскольку в составе СММП практически отсутствует морская соль, образующаяся талая вода поднимается на поверхность, снижая общую поверхностную соленость (ПС) на определенных участках акватории моря. Опресненная вода быстрее замерзает и если на поверхности моря присутствует ледяной покров, то способствует увеличению его средней толщины (далее — СТЛ) и объема. За счет деградации СММП происходит локальное увеличение впадины моря, что приводит к снижению уровня его водной поверхности (далее — УВП). Образующийся вследствие намерзания опресненной воды дополнительный ледяной покров вместе с дрейфующим льдом далее может уноситься в северные районы моря и Центральный Арктический бассейн. Справедливость выдвинутой гипотезы не очевидна, поскольку объем талой воды, образующейся в море Лаптевых вследствие таяния СММП, неизвестен. Ее подтверждением могло бы служить выявление в этом море районов, где для зимне-весенних месяцев значимые тенденции увеличения СТЛ сочетаются со значимыми тенденциями уменьшения УВП и ПС.

Косвенным свидетельством в пользу выдвинутой гипотезы являются результаты работы [14], где на примере Карского моря показано, что межгодовые изменения ледовых условий в некоторых районах арктических морей могут быть связаны с происходящими в них изменениями УВП и ПС. Тем не менее для моря Лаптевых ее справедливость для зимне-весенних месяцев ранее не оценивалась, а тенденции изменений СТЛ, УВП и ПС не учитывались при ориентировочном прогнозировании условий навигации и освоении природных ресурсов шельфа в данном регионе.

Целью настоящей работы является проверка выдвинутой гипотезы, а также выявление районов моря Лаптевых, в которых между изменениями среднемесячных значений СТЛ, УВП и ПС имеет место указанное ранее соответствие.

Для достижения данной цели необходимо решение следующих задач:

- 1) оценка современных тенденций изменений средней толщины ледяного покрова различных районов моря Лаптевых для зимне-весенних месяцев;
- 2) выявление тенденций межгодовых изменений УВП и ПС в этом море в те же месяцы;
- 3) проверка наличия соответствия между тенденциями межгодовых изменений указанных показателей, позволяющая подтвердить выдвинутую гипотезу.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В процессе решения указанных задач в качестве фактического материала использована информация о среднесуточных значениях толщины ледяного покрова, уровня водной поверхности и поверхностной солености моря Лаптевых, полученная из реанализа GLORYS12v1¹. На момент исследования данные были доступны за период с 1.01.1993 по 31.12.2019 с дискретностью по координатам 0,0833°.

¹ База данных реанализа GLORYS12v1 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030/INFORMATION.

Методика решения первой и второй задачи предполагала оценку тенденций межгодовых изменений СТЛ, УВП и ПС для различных участков акватории изучаемого моря, соответствующих зимне-весенним месяцам, за периоды 1993–2006 гг. и 2007–2019 гг. С этой целью для всех пунктов, соответствующих узлам координатной сетки реанализа, для каждого зимне-весеннего месяца из его данных были сформированы временные ряды значений рассматриваемых показателей.

В качестве количественной меры оцениваемой тенденции рассматривался угловой коэффициент линейного тренда соответствующего временного ряда, вычисленный по методу наименьших квадратов. При оценке статистической значимости тенденции были использованы стандартные методы математической статистики [15]. Тенденция межгодовых изменений каждого изучаемого процесса признавалась значимой, если достоверность такого статистического вывода составляла не менее 0,9. При решении третьей задачи применялся метод сравнения.

Результаты исследования и их анализ (Research Results And Analysis)

При решении первой задачи была выполнена оценка статистически значимых тенденций межгодовых изменений СТЛ в море Лаптевых в зимне-весенние месяцы. На рис. 1 в качестве примера приведены результаты для января и февраля.

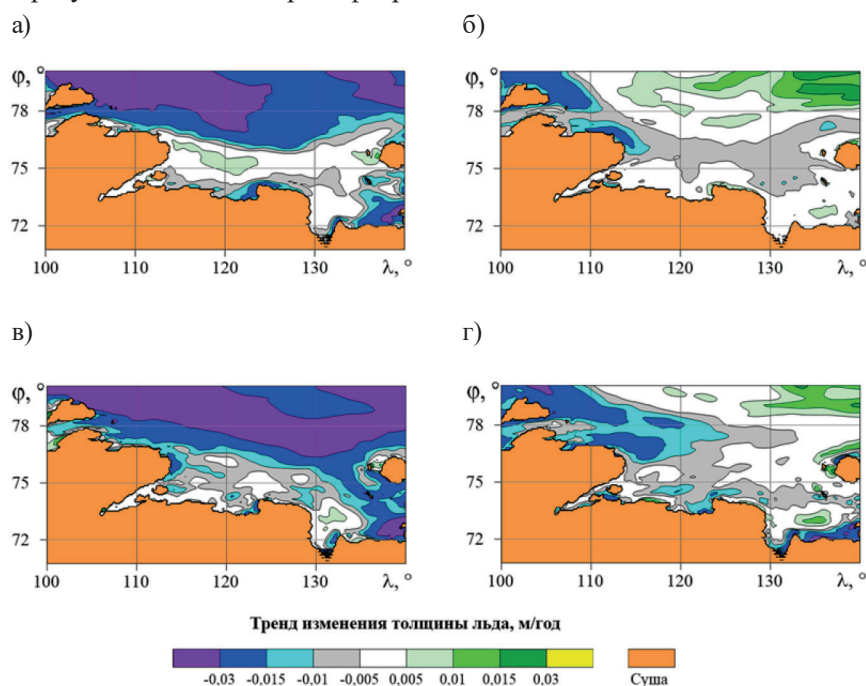


Рис. 1. Тенденции межгодовых изменений средней толщины льда в море Лаптевых:

а — январь 1993–2006 гг.; б — январь 2006–2019 гг.;
в — февраль 2006–2019 гг.; г — февраль (2006–2019 гг.)

Как следует из рис. 1, а, в, в 1993–2006 гг. на большей части моря Лаптевых преобладали явно выраженные тенденции к уменьшению СТЛ. Менее выраженными (или вообще отсутствующими) они оставались в южной части моря и в районе Новосибирских островов. В 2006–2019 гг. тенденции существенно изменились (рис. 1, б, г). Уменьшение СТЛ продолжилось только в западной части моря, при этом во всех остальных районах этот процесс либо остановился, либо сменился на противоположный. Данные по другим зимне-весенним месяцам в целом схожи. Полученные результаты наглядно подтверждают факт сохранения сложных ледовых условий в изучаемом море в современном периоде.

При решении второй задачи аналогичным образом выполнена оценка тенденции межгодовых изменений УВП и ПС. В качестве примера на рис. 2 приведены распределения по акватории моря Лаптевых значимых оценок тенденций межгодовых изменений УВП для января и февраля.

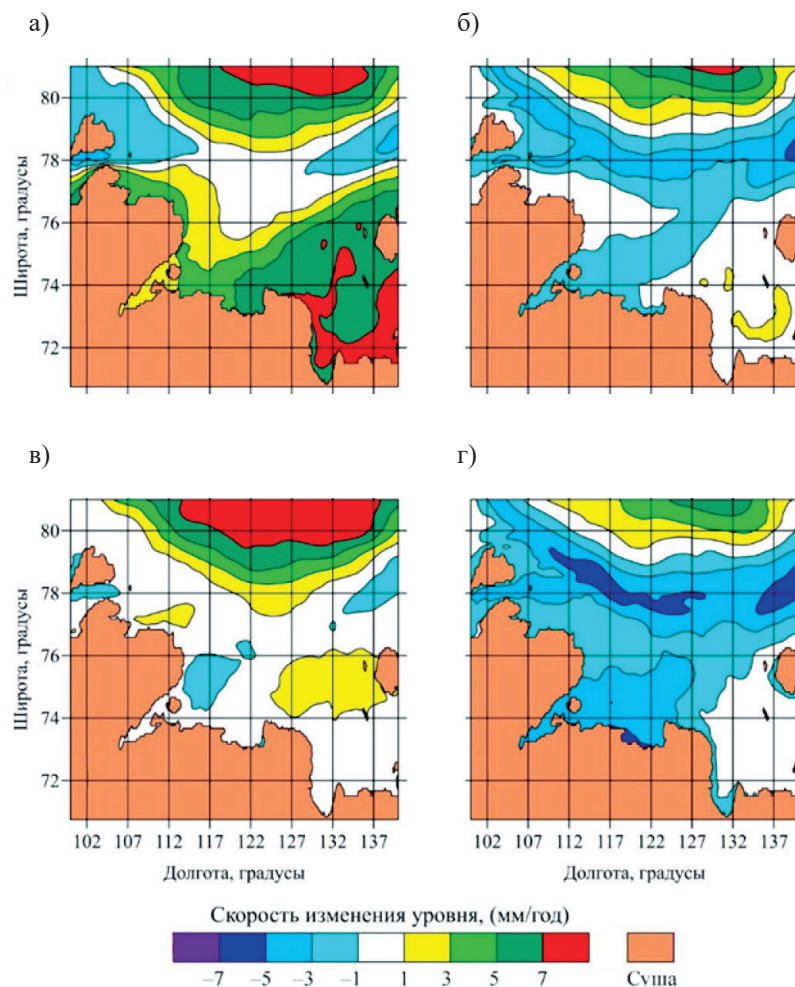


Рис. 2. Тенденции межгодовых изменений уровня водной поверхности в море Лаптевых:
а — январь 1993–2006 гг.; б — январь 2006–2019 гг.;
в — февраль 2006–2019 гг.; г — февраль (2006–2019 гг.)

Анализ рис. 2, а, в показал, что в 1993–2006 гг. в море Лаптевых преобладали возрастающие тренды УВП (что в полной мере соответствует представлениям [7], [8], [16] о последствиях потепления регионального климата). В 2006–2019 гг. ситуация изменилась (рис. 2, б, г) — стали преобладать районы, где уровень значительно снижался. Они включали прежде всего центральную и южную части моря, в том числе участки, относящиеся к Великой Сибирской полынье, используемой в судоходстве. В целом можно констатировать, что во многих районах моря Лаптевых в 1993–2019 гг. происходило значимое снижение УВП с декабря по март, причем в 2006–2019 гг. суммарная площадь таких районов значительно увеличилась. Тенденции изменения ПС в различных районах моря Лаптевых приведены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, в целом по морю значимых изменений поверхностной солености, согласно данным реанализа, не происходило. Однако был обнаружен участок акватории, расположенный между северной частью дельты реки Лены и западной оконечностью острова Котельный (на рис. 3 выделен красным кругом), в котором во все зимне-весенние месяцы ПС уменьшалась. Этот и окружающие районы моря являются местом формирования Западной Новосибирской заприпайной полыньи (входит в состав Великой Сибирской полыньи), в процессе которого в поверхностном слое моря выделяется достаточно большое количество соли. Следовательно, полученный результат возможен лишь при условии существования в указанном районе моря Лаптевых мощного источника пресной воды, значительно снижающего ПС в изучаемые месяцы.

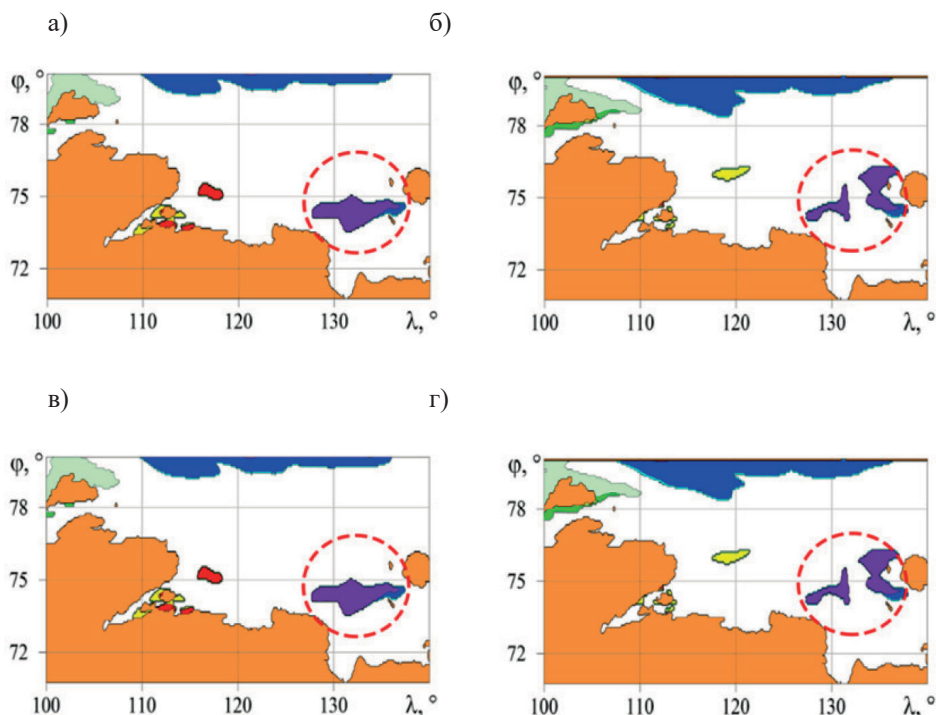


Рис. 3. Тенденции межгодовых изменений поверхностной солености в море Лаптевых по месяцам:

a — декабрь; *б* — январь; *в* — февраль; *г* — март

При решении третьей задачи установлено, что районы моря Лаптевых, где в зимне-весенние месяцы между тенденциями межгодовых изменений СТЛ, УВП и ПС имеет место искомое соответствие, существуют и расположены в его восточной и центральной частях. Это позволяет подтвердить справедливость выдвинутой гипотезы.

Обсуждение полученных результатов (Discussion of the Results Obtained)

Полученные результаты в целом соответствуют существующим представлениям о причинах изменений УВП и ПС различных районов моря Лаптевых в зимне-весенний период [9], а также изменений их СТЛ [16]. Они позволяют на качественном уровне объяснить выявленный в течение последних двух десятилетий феномен сохранения сложной ледовой обстановки в этом регионе в условиях продолжающегося потепления климата [10], а также допустить справедливость такого предположения для других морей Российской Арктики, в которых присутствуют аналогичные компоненты субмаринной криолитосферы.

Влияние процесса таяния СММП на изменения СТЛ для зимне-весенних месяцев можно считать значимым для выявленных районов моря Лаптевых. Наиболее вероятной причиной перемены тенденций сокращения ледяного покрова в этом регионе в сторону его роста, как ни парадоксально, является глобальное потепление климата, вызывающее ускоренное таяние СММП в недрах его шельфа [12], [13], [17], [18]. С определенной степенью уверенности можно предположить, что в ближайшей перспективе последствия указанного процесса не приведут к облегчению условий навигации в море Лаптевых в зимне-весенний сезон. Очевидно, что таяние СММП на шельфе — не единственный фактор, который может приводить к осложнению ледовых условий в регионе и, например, оказать влияние на скорость движения крупнотоннажных судов [19]. Поэтому вопрос о том, насколько существенным является вклад в формирование ледовой обстановки рассматриваемого процесса, действующего совместно с иными факторами, нуждается в дополнительном изучении.

Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Межгодовые изменения ледовых условий на участках Северного морского пути, расположенных в море Лаптевых (за исключением западной его части), по данным 2006–2019 гг. в зимне-весенний период не демонстрировали тенденций к улучшению.
2. Одним из факторов, способствующих сохранению сложной ледовой обстановки в море Лаптевых, может являться глобальное потепление климата, которое способствовало ускорению процесса таяния субмаринных толщ многолетнемерзлых пород на его шельфе и вызывало опреснение его поверхностных вод.
3. При сохранении текущих тенденций климатических изменений в будущем снижение уровня моря Лаптевых и увеличение толщины его ледяного покрова в зимне-весенние месяцы является вероятным.
4. Выявленные факты подтверждают необходимость и целесообразность дальнейшего развития ледокольного флота России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Думанская И. О. Некоторые тенденции в изменении ледовых характеристик арктических морей в XXI веке / И. О. Думанская // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. — 2016. — № 362. — С. 129–154.
2. Schacha M. Impacts of an ice-free Northeast Passage on LNG markets and geopolitics / M. Schacha, R. Madlenerb // Energy Policy. — 2018. — Vol. 122. — Pp. 438–448. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.07.009.
3. Соколова Ю. В. Сравнение самостоятельного движения и движения под проводкой ледокола газозовозов типа «Yamalmax» / Ю. В. Соколова, О. С. Девятаев, Е. В. Афанасьева, Ю. М. Титова // Российская Арктика. — 2020. — № 11. — С. 39–58. DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12115.
4. 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.
5. Шаронов А. Ю. Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море / А. Ю. Шаронов, В. А. Шматов // 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.
6. Исаулова К. Я. Исследование навигационно-гидрографических характеристик заприпайных полыней восточного сектора Северного морского пути / К. Я. Исаулова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 394–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-394-402.
7. Мохов И. И. Особенности современных изменений климата в Арктике и их последствий / И. И. Мохов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2020. — Т. 66. — С. 446–462. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462.
8. Алексеев Г. В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике / Г. В. Алексеев // Фундаментальная и прикладная климатология. — 2015. — Т. 1. — С. 11–26.
9. Моря Российской Арктики в современных климатических условиях / под ред. И. М. Ашика. — СПб.: Изд. ААНИИ. — 2021. — 360 с.
10. Kholoptsev A. V. Meridional components of atmospheric circulation and Arctic ice cover in summer / A. V. Kholoptsev, S. A. Podporin // Russian Meteorology and Hydrology. — 2021. — No. 6. — Pp. 372–378. DOI: 10.3103/S1068373921060030.
11. Kholoptsev A. V. Current trends in the ice thickness and concentration on the waterways of the arctic / A. V. Kholoptsev, S. A. Podporin, V. V. Karetnikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 867. — Is. 1. — Pp. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012013.
12. Koshurnikov A. V. Submarine permafrost in the Laptev sea / A. V. Koshurnikov, V. E. Tumskoy, V. V. Skosar, Y. O. Efimov, K. A. Kornishin, A. T. Bekker, Yu. G. Piskunov, N. Ya. Tsimbelman, D. A. Kosmach // International Journal of Offshore and Polar Engineering. — 2020. — Vol. 30. — Is. 01. — Pp. 86–93. DOI: 10.17736/ijope.2020.jc783.

13. Charkin A. N. Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: a case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea / A. N. Charkin, M. Rutgers van der Loeff, N. E. Shakhova, Ö. Gustafsson, O. V. Dudarev, M. S. Cherepnev, A. N. Salyuk, A. V. Koshurnikov, E. A. Spivak, A. Y. Gunar, A. S. Ruban, I. P. Semiletov // *The Cryosphere*. — 2017. — Vol. 11. — Is. 5. — Pp. 2305–2327. DOI: 10.5194/tc-11-2305-2017.
14. Kholoptsev A. V. Variations in the Kara Sea Level, Their Steric Factors, and Solar Radiation during 1993–2018 / A. V. Kholoptsev, S. A. Podporin, V. A. Safonov // *Russian Meteorology and Hydrology*. — 2021. — Vol. 46. — Is. 8. — Pp. 519–529. DOI: 10.3103/S1068373921080033.
15. Айвазян С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. — М.: Юнити, 1998. — 1022 с.
16. Катцов В. М. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики / В. М. Катцов, Б. Н. Порфирьев // *Арктика: экология и экономика*. — 2012. — № 2 (6). — С. 066–079.
17. Кошурников А. В. Основы комплексного геокриолого-геофизического анализа для исследования многолетнемерзлых пород и газогидратов на арктическом шельфе России / А. В. Кошурников // *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*. — 2020. — № 3. — С. 116–125. DOI: 10.33623/0579-9406-2020-3-116-125.
18. Холопцев А. В. Связи изменений ледовой обстановки на Северном морском пути с движением планет Солнечной системы / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин, Е. О. Ольховик // *Арктика: экология и экономика*. — 2023. — Т. 13. — № 2. — С. 310–321. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-310-321.
19. Ольховик Е. О. Исследование изменения скорости крупнотажных судов в ледовых условиях акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 705–712. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-705-712.

REFERENCES

1. Dumanskaya, Irina O. “Some tendencies in change of ice parameters of the Arctic seas in the 21st century.” *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation* 362 (2016): 129–154.
2. 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.
3. Sokolova, Yu. V., O. S. Devyataev, E. V. Afanasyeva, and Yu. M. Titova. “Comparison of independent navigation of LNG carriers of type Yamalmax and their transition with an icebreaker escort.” *Russian Arctic* 4(11) (2020): 39–58. DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12115.
4. 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.
5. 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.
6. Isaulova, Kristina Ya. “Research of navigational and hydrographic characteristics of flaw polynyas of the eastern sector of the Northern Sea Route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 394–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-394-402.
7. Mokhov, Igor I. “Features of modern climate change in the Arctic and their consequences.” *Arctic and Antarctic Research* 66 (2020): 446–462. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462.
8. Alekseev, G.V. “Development and amplification of global warming in the Arctic.” *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* 1 (2015): 11–26.
9. Ashik I. M., ed. *Morya Rossiyskoy Arktiki v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh*. SPb.: AANIL, 2021.
10. Kholoptsev, A. V., and S. A. Podporin. “Meridional components of atmospheric circulation and Arctic ice cover in summer.” *Russian Meteorology and Hydrology* 46 (2021): 372–378. DOI: 10.3103/S1068373921060030.
11. Kholoptsev, A. V., S. A. Podporin, and V. V. Karetnikov. “Current trends in the ice thickness and concentration on the waterways of the arctic.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 867. No. 1. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012013.
12. Koshurnikov, Andrey V., Vladimir E. Tumskoy, Vladimir V. Skosar, Yaroslav O. Efimov, Konstantin A. Kornishin, Alexander T. Bekker, Yuri G. Piskunov, Nikita Ya. Tsimbelman, and Denis A. Kosmach. “Submarine

permafrost in the Laptev sea.” *International Journal of Offshore and Polar Engineering* 30.01 (2020): 86–93. DOI: 10.17736/ijope.2020.jc783.

13. Charkin, Alexander N., Michiel Rutgers van der Loeff, Natalia E. Shakhova, Örjan Gustafsson, Oleg V. Dudarev, Maxim S. Cherepnev, Anatoly N. Salyuk, Andrey V. Koshurnikov, Eduard A. Spivak, Alexey Y. Gunar, Alexey S. Ruban, and Igor P. Semiletov. “Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: a case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea.” *The Cryosphere* 11.5 (2017): 2305–2327. DOI: 10.5194/tc-11-2305-2017.

14. Kholoptsev, A. V., S. A. Podporin, and V. A. Safonov. “Variations in the Kara Sea Level, Their Steric Factors, and Solar Radiation during 1993–2018.” *Russian Meteorology and Hydrology* 46.8 (2021): 519–529. DOI: 10.3103/S1068373921080033.

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

16. Kattsov, V. M., and B. N. Porfiriev. “Climate Changes in the Arctic: Impact on Environment and Economy.” *Arctic: Ecology and Economy* 2(6) (2012): 066–079.

17. Koshurnikov, A. V. “Basics of complex geocryological-geophysical analysis for the research of permafrost and gas-hydrogates on the Arctic shelf of Russia.” *Moscow University Geology Bulletin. Series 4. Geology* 3 (2020): 116–125. DOI: 10.33623/0579-9406-2020-3-116-125.

18. Kholoptsev, A. V., S. A. Podporin, and E. O. Ol’Khovik. “Changes in the ice situation on the Northern Sea Route depending on the movement of the Solar system planets.” *Arctic: Ecology and Economy* 13.2 (2023): 310–321. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-310-321.

19. Ol’Khovik, Evgeniy O. “Research the change of ship’s speed with large-capacity in ice conditions on area of the Northern Sea Route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 705-712. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-705-712.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Подпорин Сергей Анатольевич —
кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
Севастопольское отделение ФГБУ
«Государственный океанографический институт
имени Н. Н. Зубова»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Советская, 61
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

Холопцев Александр Вадимович —
доктор географических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
Севастопольское отделение ФГБУ
«Государственный океанографический институт
имени Н. Н. Зубова»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Советская, 61
e-mail: kholoptsev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Podporin, Sergey A. —
PhD, associate professor,
leading researcher
Sevastopol branch
of FSBI “N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute”
61 Sovetskaya Str.,
Sevastopol, 299011,
Russian Federation
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

Kholoptsev, Aleksandr V. —
Dr. of Geographical Sciences, professor,
leading researcher
Sevastopol branch
of FSBI “N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute”
61 Sovetskaya Str.,
Sevastopol, 299011,
Russian Federation
e-mail: kholoptsev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30 октября 2023 г.
Received: October 30, 2023.