

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-563-570

IMPACT OF FLOODS IN THE KOLYMA RIVER DELTA ON NAVIGATION CONDITIONS IN THE EAST SIBERIAN SEA

A. V. Kholoptsev^{1,2}, S. A. Podporin^{1, 2}

¹ — Sevastopol branch of FSBI “N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute”, Sevastopol, Russian Federation

² — Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

The problem of improving the quality of medium- and long-term forecasting of changes in the ice situation on the Northern Sea Route, and in particular in the East Siberian Sea, where one of the methods for choosing waterways is the passage of vessels in the areas of flaw polynya, is considered. The hypothesis that in the summer months such changes can be significantly affected by the terms of floods onset in the Kolyma River Delta is tested. The data of the GLORYS12v1 global reanalysis supported by the Copernicus Marine Service are used as factual material on the ice cover and levels of the East Siberian Sea in the months from May to October of 1993–2019. The reanalysis is based on mathematical models of the NEMO family, verified using altimetry data from satellite measurements. Using the developed methodology for the selected periods of the year, the dates of sharp changes in the level and ice cover on the pre-estuary seaside of the Kolyma River are estimated. Using statistical methods, the validity of the stated hypothesis for a number of the East Siberian Sea areas, along which the shipping lanes of the Northern Sea Route pass, is confirmed. It has been established that the greatest influence of the floods terms on the ice situation and navigation conditions in such areas takes place in July. It has been shown that early floods in the Kolyma delta generally lead to an improvement in the ice situation, and late floods lead to its complication. The identified relationships are recommended for use in forecasting changes in ice conditions. The assumption that with further climate warming and a shift in the flood terms to earlier dates, it is possible that the ice conditions will become more complicated due to the freezing of the formed polynya, is made.

Ключевые слова: Arctic, Northern Sea Route, shipping, water level, East-Siberian Sea, Ice cover.

For citation:

Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. “Impact of floods in the Kolyma river delta on navigation conditions in the East Siberian Sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 563–570. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-563-570.

УДК 656.61.052: 551.583

ВЛИЯНИЕ ПОЛОВОДИЙ В ДЕЛЬТЕ КОЛЫМЫ НА УСЛОВИЯ СУДОХОДСТВА В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ

А. В. Холопцев^{1,2}, С. А. Подпорин^{1, 2}

¹ — Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация

² — ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

Рассматривается проблема повышения качества средне- и долгосрочного прогнозирования изменений ледовой обстановки на Северном морском пути и в частности в Восточно-Сибирском море, где одним из методов выбора водных путей является проход судов в районах заприпайной полыни. Проверяется гипотеза о том, что в летние месяцы на такие изменения могут оказывать значительное влияние сроки наступления половодья в дельте реки Колыма. В качестве фактического материала по ледовитости и уровням Восточно-Сибирского моря в месяцы с мая по октябрь периода 1993–2019 гг. использованы данные глобального реанализа GLORYS12v1, поддерживаемого европейской службой Copernicus Marine Service, основанного на математических моделях семейства NEMO, верифицированных с помощью альтиметрических данных спутниковых измерений. С использованием разработанной методики для выбранных периодов года оценены даты резких изменений уровня и ледовитости на предустьевом взморье реки Колыма. В исследовании с помощью статистических методов подтверждается справедливость высказанной гипотезы для ряда районов Восточно-Сибирского моря, по которым проходят судоходные трассы Северного морского пути.

Установлено, что наибольшее влияние сроков половодий на ледовую обстановку и условия судоходства в таких районах имеет место в июле. Показано, что ранние половодья в дельте Колымы в целом приводят к улучшению ледовой обстановки, а поздние — к ее усложнению. Выявленные взаимосвязи рекомендованы к использованию при составлении прогнозов изменений ледовой обстановки. Сделано предположение о том, что при дальнейшем потеплении климата и смещении сроков половодья на более ранние даты не исключено усложнение ледовых условий из-за замерзания образовавшейся полыни.

Ключевые слова: Арктика, Северный морской путь, судоходство, уровень воды, Восточно-Сибирское море, ледовитость.

Для цитирования:

Холопцев А. В. Влияние половодий в дельте Колымы на условия судоходства в Восточно-Сибирском море / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 563–570. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-563-570.

Введение (Introduction)

Участки Северного Морского пути (далее — СМП), проходящие через Восточно-Сибирское море (далее — ВСМ), отличаются повышенной сложностью для судоходства и не используются большую часть года. Это вызвано тяжелыми ледовыми условиями в зимне-весенней навигации, а также проблемами, связанными с отсутствием прогнозных моделей ледовой обстановки и их адекватной оценкой для судоходства [1], [2] как при самостоятельном плавании судов, так и при использовании ледокольного сопровождения, что является особенно актуальным для всего Восточного сектора СМП [3]–[5].

Доступность и достоверность прогнозной информации по ледовой обстановке важны как для планирования судоходными компаниями переходов своих судов по СМП [6], [7], так и для сохранения экологической безопасности арктических морей [8]. Качество ледовых прогнозов на несколько недель и месяцев вперед во многом определяется тем, насколько полно они учитывают факторы, вызывающие изменения ледовых условий в средне- и долгосрочной перспективе. В настоящее время такие прогнозы недостаточно точны [2]. В этой связи развитие методов и технологий прогнозирования ледовой обстановки является актуальной проблемой океанографии и гидрографии при обеспечении безопасности судоходства.

Ввиду того, что на динамику развития ледовой обстановки оказывает влияние комплекс факторов, при прогнозировании широко применяются *статистические методы*. Последние являются наиболее эффективными при наличии значимой причинной связи прогнозируемых процессов с опережающими их по времени на десятки суток предикторами, которыми являются единицы месяцев. В летние месяцы плавание судов в ВСМ происходит, как правило, по полыньям, активно образуемым в периоды половодий в устьевых областях сибирских рек. Наиболее полноводной в данном регионе является река Колыма, образующая при впадении в Колымский залив ВСМ дельту длиной 110 км, шириной 75 км и площадью 3000 км². Сток реки поступает в море через три главные протоки: Каменную Колыму (судоходную), а также Походскую Колыму и Чукочью Колыму, которые покрыты льдом в среднем 286 дней в году и вскрываются в конце мая – начале июня, что в отдельные годы приводит к наводнениям. Кроме того, для организации круглогодичного судоходства по СМП важным фактором является *прогноз перемещения дрейфующих льдин* [9].

Во время половодья реки Колымы уровень Колымского залива существенно повышается, что приводит к взламыванию покрывающего его льда и появлению течений, уносящих его обломки от побережья. В результате ледовитость участков, расположенных на приустьевом взморье реки, резко снижается и образуется полынь, дальнейшее развитие которой зависит от знака теплового баланса ее поверхностных вод. Если количество поглощаемой ими солнечной радиации больше, чем количество тепла, уходящего в атмосферу, площадь полыни увеличивается, в противном случае она повторно покрывается льдом.

Наиболее интенсивно свободная водная поверхность поглощает солнечную радиацию в течение полярного дня. Поэтому площадь полыни в июле–августе зависит от ее размеров на 1 июля. Чем

меньший промежуток времени отделяет этот период от даты образования полыни, тем меньше будут средние значения ее площади в июле–августе и тем более сложными будут ледовые условия в регионе. Последнее обстоятельство позволяет выдвинуть гипотезу о том, что *межгодовые изменения ледовитости некоторых участков акватории ВСМ могут быть значимо и положительно коррелированы с возможным времененным отрезком образования полыни в Колымском заливе*. Владение информацией о расположении таких участков позволит лучше понимать и прогнозировать формирование ледовых условий с целью планирования судоходных маршрутов в регионе в летний период.

Целью настоящей работы является проверка выдвинутой гипотезы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследование проводилось в два этапа:

1-й этап — оценка дат начала половодий в дельте реки Колыма за период 1993–2019 гг. на основе информации о среднесуточных значениях среднего уровня водной поверхности и ледовитости участков ее предустьевого взморья;

2-й этап — оценка значимости статистических связей межгодовых изменений ледовитости различных участков акватории ВСМ с различными вариантами дат начала колымских половодий.

В качестве фактического материала по ледовитости и уровням ВСМ в месяцы с мая по октябрь в 1993–2019 гг. были использованы данные глобального реанализа GLORYS12v1, поддерживаемого европейской службой Copernicus Marine Service [10]. Методические основы глобального реанализа для транспортных маршрутов судов в акватории СМП изложены в работах [11], [12].

Реанализ основан на математических моделях семейства NEMO, верифицированных с помощью альтиметрических данных спутниковых измерений [13], [14]. Оценки среднесуточных значений средней ледовитости и уровня моря представлены для всех участков акватории Мирового океана с дискретностью 5 угл. мин по широте и долготе. В настоящем исследовании дополнительная проверка данных реанализа выборочно проводилась путем сопоставления с картами, взятыми из источников [15], [16]. В отдельные годы в период с 2010 по 2019 гг. информация о фактических сроках начала половодий в дельте Колымы и вызванных ими наводнений также сверялась с данными из архива МЧС РФ.

На 1-м этапе учитывалось, что информативным признаком выявляемого процесса в дельте Колымы является значительное повышение уровня водной поверхности на ее предустьевом взморье, за которым следует существенное снижение его ледовитости. В качестве примера, иллюстрирующего характерные изменения указанных показателей в период половодья в дельте Колымы, на рис. 1 показаны зависимости среднесуточных значений средней ледовитости и среднего уровня на взморье Колымы от количества суток, прошедших с условной даты — 30 апреля 1994 и 2016 гг.

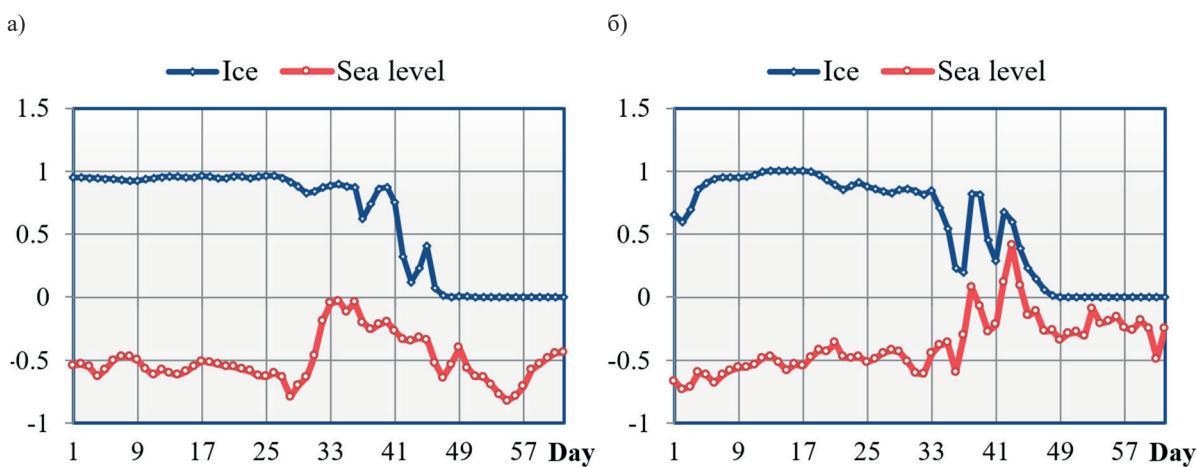


Рис. 1. Примеры изменений средних значений ледовитости и уровня участков предустьевого взморья реки Колымы в период с 1 мая по 30 июня на период: а — 1994 г.; б — 2016 г.

На графиках, приведенных на рис. 1, видно, что в 1994 г. повышение уровня на взморье началось 30 мая (непосредственно в период фактического начала половодья), а резкое снижение ледовитости произошло с запаздыванием на семь суток — 6 июня. В 2016 г. оба процесса начались практически одновременно, откуда следует, что началом половодий целесообразно считать даты значительных повышений уровня при условии, что затем следует резкое снижение ледовитости. Для всех лет периода 1993–2019 гг. таким образом были определены пороговые уровни указанных изменений и дана оценка дат начала половодий.

На 2-м этапе был применен метод корреляционного анализа и критерий Стьюдента. За период 1993–2019 гг. была выполнена оценка пороговых значений коэффициента корреляции, превышения которых свидетельствуют о достоверности статистического вывода о значимости рассматриваемой связи не ниже 0,9, 0,95 и 0,99 (они составляют 0,36, 0,4 и 0,53 соответственно). Перед выполнением корреляционного анализа в сопоставляемых рядах были скомпенсированы линейные тренды.

Результаты исследования и их анализ (Research Results and Analysis)

На 1-м этапе с использованием описанной методики для каждого года периода 1993–2019 гг. была выполнена оценка дат резких изменений уровня и ледовитости на предустьевом взморье реки Колымы. Зависимости этих дат от времени представлены на рис. 2, откуда видно, что межгодовые изменения даты начала половодья в дельте р. Колымы носят колебательный характер. Амплитуды этих колебаний настолько велики, что значимой тенденции изменения этих дат не выявлено. Временные зависимости оценок рассматриваемых дат практически подобны.

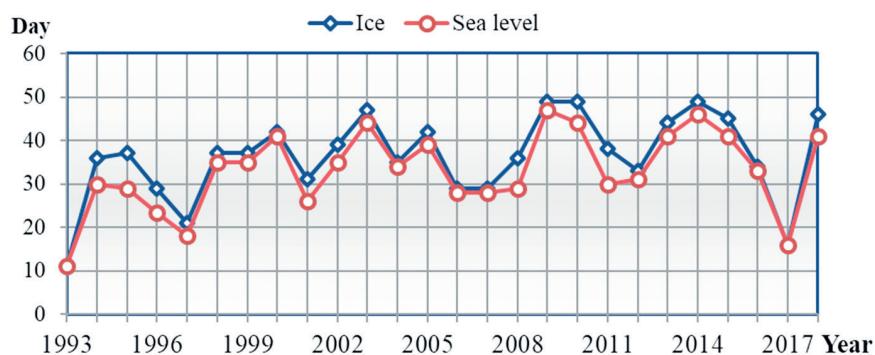


Рис. 2. Оценки дат начала половодья в дельте реки Колымы по информации об изменениях средних значений ледовитости и уровней участков ее предустьевого взморья

На 2-м этапе для месяцев с июля по октябрь выявлены участки акватории ВСМ, в которых связи межгодовых изменений среднемесячных значений их ледовитости с изменениями дат начала половодий были статистически значимы. В качестве примера на рис. 3 показаны расположения таких участков в июле и августе, откуда видно, что такие участки наблюдаются как в июле, так и в августе. При этом в июле они расположены в проливе Санникова и в открытых районах моря, расположенных к северу от Колымского залива непосредственно на высокомаршрутном и прибрежном маршрутах СМП. Достоверность выводов о значимости изучаемых связей для многих участков значительно превышает 0,99. В августе суммарная площадь рассматриваемых участков меньше. Расположены они лишь на участках высокомаршрутных трасс СМП. В сентябре их еще меньше, а в октябре не выявлено вообще. Следовательно, степень влияния сроков половодья в дельте Колымы и образования на ее взморье полыни на ледовитость и, как следствие, условия судоходства в ВСМ ослабевают с июля по сентябрь. Таким образом, полученные результаты подтверждают справедливость выдвинутой гипотезы.

Обсуждение полученных результатов (Discussion of the Results Obtained)

Из полученных результатов следует, что изменения сроков образования полыни на предустьевом взморье р. Колымы оказывают значительное влияние на ее дальнейшее развитие.

Чем раньше она образуется, тем больших размеров достигает к 1 июля (именно поэтому корреляция изучаемых процессов положительна). Это происходит потому, что при более раннем образовании полыни увеличение ее размеров происходит дольше.

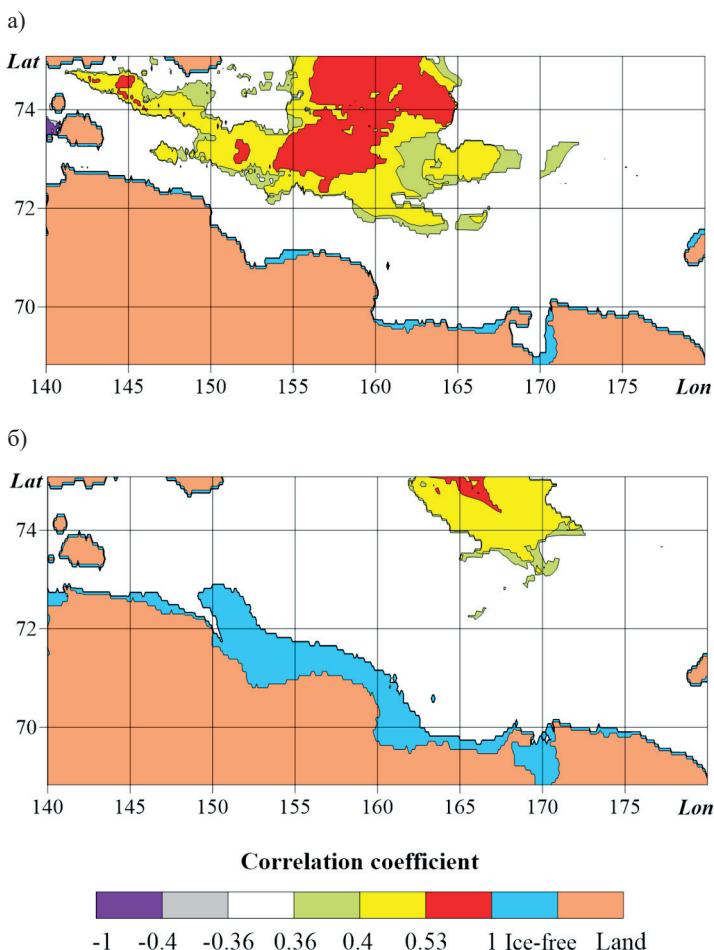


Рис. 3. Участки Восточно-Сибирского моря со значимой корреляцией межгодовых изменений среднемесячных значений ледовитости и дат начала половодья в дельте р. Колымы в июле (а) и августе (б)

Сроки начала половодья в дельте Колымы в целом определяются сроками половодья в области ее питания. Из-за продолжающегося потепления местного климата можно прогнозировать дальнейший сдвиг этих сроков на более ранний период. Вместе с тем, если полынья будет формироваться слишком рано, когда Солнце еще низко поднимается над горизонтом, количество поглощенного ей тепла за сутки будет невелико [17]. Количество тепла, теряемого водами полыни за первые дни ее существования, от даты наступления этого события практически не зависит. Поэтому при раннем образовании полыни суточное значение ее теплового баланса может уменьшаться и даже становиться отрицательным. В последнем случае водная поверхность будет покрываться льдом. Следовательно, дальнейшее потепление климата в области бассейна реки Колымы, вызывающее в ней более раннее половодье, способно привести к снижению темпов увеличения ее площади, а в перспективе даже к уменьшению ее площади.

Учитывая изложенное, представляется вероятным, что в ближайшие годы сплоченность ледяного покрова ВСМ в летние месяцы продолжит снижаться, однако в дальнейшем эта тенденция может измениться, в результате чего в более отдаленном будущем сплоченность ледяного покрова районов СМП, расположенных в ВСМ, может возрастать. Последнее противоречит выводам [18], [19], тем не менее, подобный сценарий при дальнейшем потеплении климата Сибири видится вполне вероятным. При его осуществлении в текущем десятилетии условия для самостоятельного плавания

судов в акватории ВСМ будут благоприятны. Тем не менее возможно, что в следующем десятилетии ледокольная проводка судов по районам СМП, расположенным в ВСМ, будет требоваться чаще, поскольку условия судоходства на нем могут усложниться [20].

С учетом ранее изложенного, стратегия Российской Федерации, направленная на постройку и ввод в эксплуатацию новых атомных ледоколов, а также увеличение флота морских судов высокого арктического класса является полностью оправданной.

Заключение (Conclusion)

В результате исследования было установлено, что сроки возникновения половодья в дельте Колымы в летние месяцы оказывают значительное влияние на ледовитость и условия судоходства на некоторых участках трасс СМП, расположенных в Восточно-Сибирском море, наиболее существенное влияние имеет место в июле.

Поскольку сроки разлива Колымы в ее дельте и образования полыни могут быть спрогнозированы по времени начала половодья на створах этой реки, расположенных выше по течению, а также в области ее питания, данный фактор целесообразно учитывать при составлении среднесрочных и долгосрочных прогнозов изменений ледовой обстановки на таких участках.

Более ранние половодья в целом приводят к улучшению ледовой обстановки. Вместе с тем в процессе дальнейшего потепления климата сроки половодья смещаются на еще более ранние даты. После того как эти даты будут соответствовать периодам до начала полярного дня, темпы межгодовых изменений ледовитости (в сторону ее снижения) замедляются. В дальнейшем, возможно, наступит фаза изучаемого процесса, в которой его развитие будет происходить в противоположном направлении. При этом полынья будет образовываться в апреле или даже ранее, вследствие чего ее поверхность будет сковываться льдом, а ледовые условия в ВСМ в конце июня–июле будут усложняться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Думанская И. О. Ледовые условия морей азиатской части России / И. О. Думанская. — М.: Обнинск: ООО «ИГ-СОЦИН», 2017. — 640 с.
2. 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.
3. Tezikov A. Studying the factors affecting the navigation duration along the Northern Sea Route / A. Tezikov, E. Ol'Khovik // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 678. — Is. 1. — Pp. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/678/1/012013.
4. Tezikov A. Generalized model of maritime transport of the Northern Sea Route / A. Tezikov, E. Ol'khovik // Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. — 2021. June 14–18, 2021, Moscow, Russia.
5. Ol'khovik E. Shipping development trends in the Eastern sector of the Northern Sea Route / E. Ol'khovik, A. Tezikov // Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14–18, 2021, Moscow, Russia. — 2021.
6. Chen J. Changes in sea ice and future accessibility along the Arctic Northeast Passage / J. Chen, S. Kang, C. Chen, Q. You, W. Du, M. Xu, X. Zhong, W. Zhang, J. Chen // Global and Planetary Change. — 2020. — Vol. 195. — Pp. 103319. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103319.
7. Ostreng W. Shipping in Arctic waters: a comparison of the Northeast, Northwest and trans polar passages / W. Ostreng, K. M. Eger, B. Fløistad, A. Jørgensen-Dahl, L. Lothe, M. Mejlaender-Larsen, T. Wergeland. — Springer Science & Business Media, 2013. — 433 p.
8. Protection of the Arctic Marine Environment (PAME), 2020. The increase in Arctic shipping 2013–2019. Arctic shipping status report [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://pame.is/document-library/shipping-documents/arctic-ship-traffic-database/documents/reports/752-arctic-shipping-report-1-the-increase-in-arctic-shipping-2013-2019-pdf-version-1/file> (дата обращения: 22.02.2022).

9. Dobrodeev A. A. Ice interaction of carrier ships in drifting ice and under ice compression: theoretical description / A. A. Dobrodeev, K. E. Sazonov, A. B. Elizaveta // Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June. — 2021. — Pp. 14–18.

10. Global Ocean Physics Reanalysis [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://resources.marine.copernicus.eu/products> (дата обращения: 22.02.2022).

11. Kholoptsev A. V. Variation in the sea level, ice concentration and ice drift speed near northern land archipelago in the autumn-winter period / A. V. Kholoptsev, S. A. Podporin, V. V. Karetnikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 867. — Is. 1. — Pp. 012025. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012025.

12. 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.

13. Vichi M. Coupling BFM with Ocean models: the NEMO model (Nucleus for the European Modelling of the Ocean). BFM report series. No. 2. Release 1.0. / M. Vichi, T. Lovato, E. Gutierrez Mlot, W. McKiver. — The BFM System Team, 2015. — 31 p.

14. Teleti P. R. Sea Ice Observations in Polar Regions: Evolution of Technologies in Remote Sensing / P. R. Teleti, A. J. Luis // International Journal of Geosciences. — 2013. — Vol. 4. — No. 7. — Pp. 1031–1050. DOI: 10.4236/ijg.2013.47097.

15. Карты ледовой обстановки [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.nsra.ru/ru/navigatsionnaya_i_gidrometinformatsiya/icecharts.html (дата обращения: 22.02.2022).

16. Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.psmsl.org/> (дата обращения: 22.02.2022).

17. Федоров В. М. Солнечная радиация и климат Земли: монография / В. М. Федоров. — М.: Физматлит, 2018. — 232 с.

18. 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.

19. Фролов И. Е. Изменения климата Арктики и Антарктики — результат действия естественных причин / И. Е. Фролов, З. М. Гудкович, В. П. Карклин, В. М. Смоляницкий // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2010. — № 2 (85). — С. 52–61.

20. Фисенко А. И. Риски организации морского грузового транзита по Северному морскому пути / А. И. Фисенко // Полярная механика. — 2016. — № 3. — С. 347–358.

REFERENCES

1. Dumanskaya, I. O. *Ledovye usloviya morei aziatskoi chasti Rossii*. M.; Obninsk: IG–SOTsIN, 2017.
2. 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.
3. Tezikov, Aleksandr, and Evgeniy Ol’khovik. “Studying the factors affecting the navigation duration along the Northern Sea Route.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 678. No. 1. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/678/1/012013.
4. Tezikov, Aleksandr, and Evgeniy Ol’khovik. “Generalized model of maritime transport of the Northern Sea Route.” *Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. 2021.
5. Ol’khovik, Evgeniy, and Aleksandr Tezikov. “Shipping development trends in the Eastern sector of the Northern Sea Route.” *Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. 2021.
6. Chen, Jinlei, Shichang Kang, Changsheng Chen, Qinglong You, Wentao Du, Min Xu, Xinyue Zhong, Wei Zhang, and Jizu Chen. “Changes in sea ice and future accessibility along the Arctic Northeast Passage.” *Global and Planetary Change* 195 (2020): 103319. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103319.
7. Ostreng, Willy, Karl Magnus Eger, Brit Fløistad, Arnfinn Jørgensen-Dahl, Lars Lothe, Morten Mejlaender-Larsen, and Tor Wergeland. *Shipping in Arctic waters: a comparison of the Northeast, Northwest and trans polar passages*. Springer Science & Business Media, 2013.

8. Protection of the Arctic Marine Environment (PAME), 2020. The increase in Arctic shipping 2013–2019. Arctic shipping status report. Web. 22 Feb. 2022 <<https://pame.is/document-library/shipping-documents/arctic-ship-traffic-database/documents/reports/752-arctic-shipping-report-1-the-increase-in-arctic-shipping-2013–2019-pdf-version-1/file>>.

9. Dobrodeev, Aleksei A., Kirill E. Sazonov, and A. Bokatova Elizaveta. “Ice interaction of carrier ships in drifting ice and under ice compression: theoretical description.” *Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June*. 2021. 14–18.

10. Global Ocean Physics Reanalysis. Web. 22 Feb. 2022 <<https://resources.marine.copernicus.eu/products>>.

11. Kholoptsev, A. V., S. A. Podporin, and V. V. Karetnikov. “Variation in the sea level, ice concentration and ice drift speed near northern land archipelago in the autumn-winter period.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 867. No. 1. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012025.

12. 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.

13. Vichi, M., T. Lovato, E. Gutierrez Mlot, and W. McKiver. *Coupling BFM with Ocean models: the NEMO model (Nucleus for the European Modelling of the Ocean)*. BFM report series. No. 2. Release 1.0. The BFM System Team, 2015.

14. Teleti, Praveen Rao, and Alvarinho J. Luis. “Sea Ice Observations in Polar Regions: Evolution of Technologies in Remote Sensing.” *International Journal of Geosciences* 4.7 (2013): 1031–1050. DOI: 10.4236/ijg.2013.47097.

15. Karty ledovoi obstanovki. Web. 22 Feb. 2022 <http://www.nsra.ru/ru/navigatsionnaya_i_gidrometinformatsiya/icecharts.html>.

16. Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL). Web. 22 Feb. 2022 <<http://www.psmsl.org/>>.

17. Fedorov, V. M. *Solnechnaya radiatsiya i klimat Zemli*. M.: Fizmatlit, 2018.

18. Dumanskaya, I.O. “Some tendencies in change of ice parameters of the arctic seas in the 21st century.” *Hydrometeorological Research and Forecasting* 362 (2016): 129–154.

19. Frolov, I.E., Z. M. Gudkovich, V. P. Karklin, and V. M. Smolyanitskii. “Izmeneniya klimata Arktiki i Antarktiki — rezul’tat deistviya estestvennykh prichin.” *Problemy Arktiki i Antarktiki* 2(85) (2010): 52–61.

20. Fisenko, Andrei. “Main risks of sea cargo transit management in the Northern sea route.” *Polyarnaya mehanika* 3 (2016): 347–358.

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 Sovetskaya Str., Sevastopol, 299011,
Russian Federation
Sevastopol State University
33 Universitetsky Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: kholoptsev@mail.ru

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